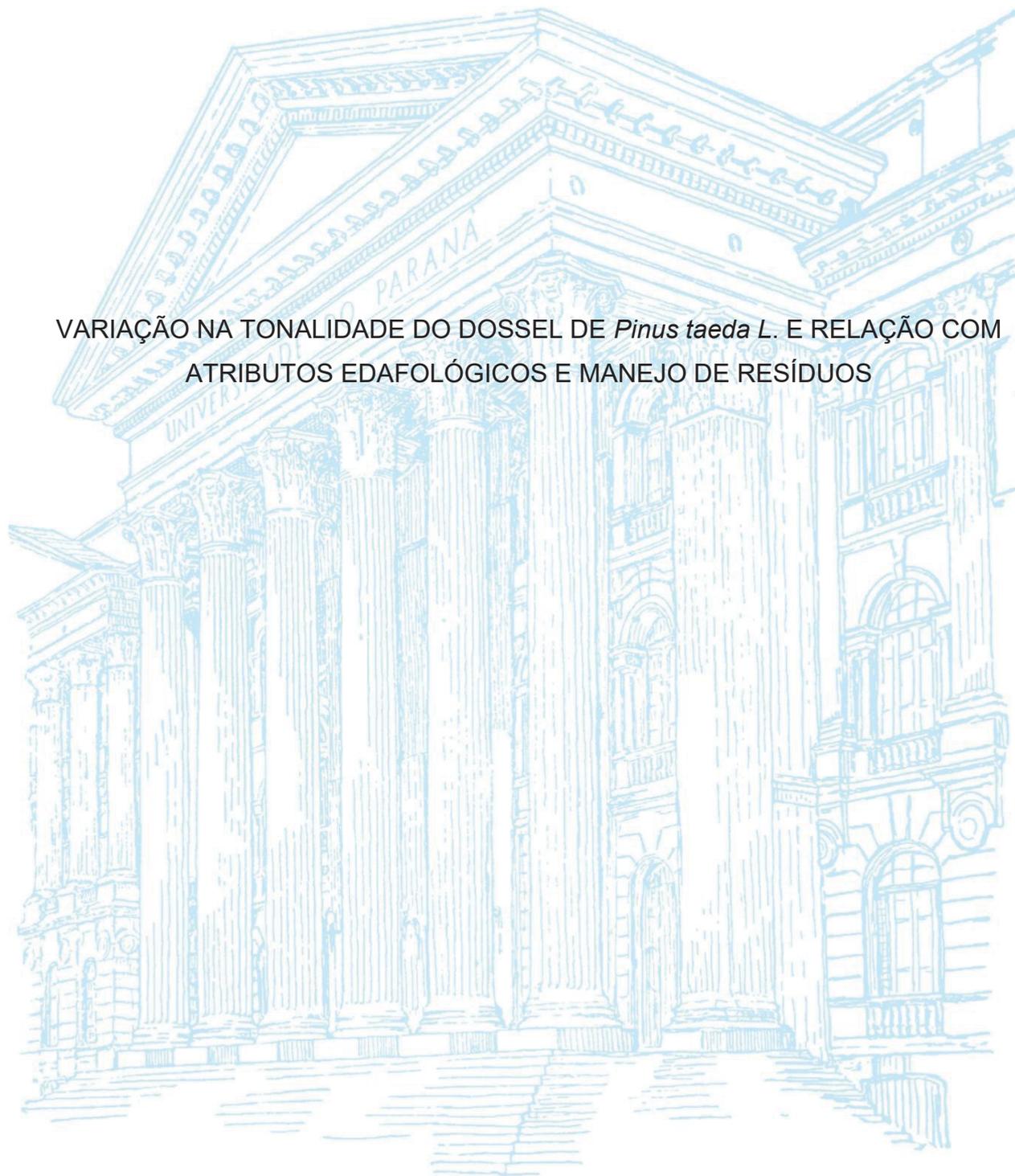


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LETICIA MACHADO DOS SANTOS

VARIAÇÃO NA TONALIDADE DO DOSSEL DE *Pinus taeda* L. E RELAÇÃO COM  
ATRIBUTOS EDAFOLÓGICOS E MANEJO DE RESÍDUOS



CURITIBA

2024

LETICIA MACHADO DOS SANTOS

VARIAÇÃO NA TONALIDADE DO DOSSEL DE *Pinus taeda* L. E RELAÇÃO COM  
ATRIBUTOS EDAFOLÓGICOS E MANEJO DE RESÍDUOS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jairo Calderari de Oliveira Junior

Coorientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Vargas Motta

Coorientador: Dr. Itamar Antônio Bognola

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Santos, Leticia Machado dos

Varição na tonalidade do dossel de *Pinus taeda* L. e relação com atributos edafológicos e manejo de resíduos/ Leticia Machado dos Santos. – Curitiba, 2024.

1 recurso online: PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jairo Calderari de Oliveira Junior

Coorientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Vargas Motta

Coorientador: Dr. Itamar Antônio Bognola

1. Solos florestais. 2. Solos - Manejo. 3. Florestas e silvicultura. I. Oliveira Junior, Jairo Calderari de. II. Motta, Antônio Carlos Vargas. III. Bognola, Itamar Antônio. IV. Universidade Federal do Paraná. Programa Pós-Graduação em Ciência do Solo. V. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO -  
40001016014P4

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **LETICIA MACHADO DOS SANTOS** intitulada: **VARIAÇÃO NA TONALIDADE DO DOSEL DE *Pinus taeda* L. E RELAÇÃO COM ATRIBUTOS EDAFOLÓGICOS E MANEJO DE RESÍDUOS**, sob orientação do Prof. Dr. JAIRO CALDERARI DE OLIVEIRA JUNIOR, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa. A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 27 de Fevereiro de 2024.

Assinatura Eletrônica

27/02/2024 12:09:43.0

JAIRO CALDERARI DE OLIVEIRA JUNIOR

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

27/02/2024 12:18:22.0

MARCOS VINICIUS MARTINS BASSACO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE - IRATI)

Assinatura Eletrônica

04/03/2024 12:06:34.0

RANGEL CONSALTER

Avaliador Externo (ZAGROS SISTEMAS INTELIGENTES LTDA - CAMPO VERDE/MT)

A Deus, fonte de toda a sabedoria e amor, que me guiou durante essa jornada. Em cada desafio e cada conquista senti sua presença constante oferecendo-me força e serenidade. A ele, toda honra e toda glória.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família, em especial aos meus pais Rudimar J. M. dos Santos e Denise S. Neves dos Santos, pelo amor incondicional, apoio e paciência durante a elaboração deste trabalho, foram minha fonte de motivação e meu porto seguro nos momentos mais desafiadores.

Ao meu orientador professor Dr. Jairo Calderari de Oliveira Junior, e coorientador PhD. Antônio Carlos Vargas Motta, pela sabedoria, paciência e dedicação.

Ao coorientador Dr. Itamar Antônio Bognola pela disponibilidade, e apoio para o desenvolvimento do trabalho.

A Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao corpo docente e administração do programa de pós-graduação em Ciência do Solo, por compartilharem seu conhecimento e inspiração.

A empresa CMPC pelo suporte ao desenvolvimento da pesquisa, pela ajuda dos colaboradores.

As minhas colegas e amigas Vanessa Silva Romanoski, e Thalia Alves Ferreira por todo o suporte emocional, incentivo e colaboração com o desenvolvimento do trabalho.

*“Cada pessoa deve trabalhar para o seu aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo, participar da responsabilidade coletiva por toda a humanidade”. (MARIE CURIE)*

## RESUMO

O estudo de técnicas de manejo do solo adequadas para o desenvolvimento de povoamentos florestais visando a máxima produtividade é fundamental, considerando a importância do setor florestal para a indústria brasileira e mundial. Nesse sentido, observações de talhões com plantio comercial de *Pinus taeda* L. cultivado em solos formados sob arenito vem apresentando elevada distinção entre padrões de coloração da copa das árvores e variações na produtividade. Através de imagens de satélite foi possível observar faixas com coloração verde escura em destaque em relação ao restante do talhão com coloração verde clara. Em geral, essa diferença de coloração está atribuída à sintomas nutricionais e ao declínio de produtividade. Assim o objetivo do estudo foi investigar as causas que resultam na variação das tonalidades de verde em plantio de pinus e a sua relação com os atributos edafológicos e manejo de resíduos. O estudo foi desenvolvido em uma área de aproximadamente 600 hectares correspondente a um plantio comercial pertencente a empresa CMPC no município de Pirai do Sul no estado do Paraná. Com base na imagem de satélite foram selecionados 9 pontos nas faixas verde escuras e 9 pontos nas áreas verde claras. Em cada ponto foi realizada a amostragem do solo coletando quatro repetições de amostras, nas camadas de 0-20 e 20-40 cm. Além do solo também foi realizada a coleta de serapilheira com auxílio de um gabarito de aço (20 x 20 cm), e obtidos os dados dendrométricos (DAP), altura e volume de madeira de 10 árvores por ponto. Os índices de vegetação NDVI, VARI e EVI foram gerados no SIG Q-GIS 3.2 com imagens do satélite Sentinel-2, e então correlacionados com os volumes de madeira obtidos. Os dados de campo e laboratório apontaram que a causa das variações de tonalidade de verde está relacionada ao enleiramento de resíduos de corte raso, resultando em um aumento expressivo no  $C_{OT}$  em 0-20 cm e na CTC do solo, conseqüentemente levando ao pequeno aumento nos teores de nutrientes e refletindo em um aumento médio 200% em volume de madeira por hectare. As correlações do volume de madeira com os índices de vegetação NDVI, VARI e EVI foram positivas, no entanto baixas. O EVI se mostrou o mais adequado para o estudo em questão, com um  $R^2$  de 0,27. Faixas verde escuras de *Pinus taeda* em plantio comercial visíveis em imagem de satélite e confirmada por índices de vegetação, estão associadas a maior crescimento das árvores em área de melhor fertilidade que por sua vez estão relacionadas ao enleiramento de resíduos do corte raso.

**Palavras-chave:** solo florestal, interação solo x planta, silvicultura.

## ABSTRACT

The study of appropriate soil management techniques for the development of forest stands aiming for maximum productivity is fundamental, considering the importance of the forestry sector for Brazilian and global industry. In this sense, observations of plots with commercial planting of *Pinus taeda* L. Cultivated in soils formed under sandstone, it has shown a high distinction between color patterns of the tree canopy and variations in productivity. Through satellite images it was possible to observe bands with a dark green color highlighted in relation to the rest of the plot with a light green color. In general, This difference in color is attributed to nutritional symptoms and a decline in productivity. Therefore, the objective of the study was to investigate the causes that result in variations in shades of green in pine plantations and their relationship with soil attributes and waste management. The study was carried out in an area of approximately 600 hectares corresponding to a commercial plantation belonging to the company CMPC in the municipality of Pirai do Sul in the state of Paraná. Based on the satellite image, 9 points were selected in the dark green bands and 9 points in the light green areas. At each point, soil sampling was carried out, collecting four repetitions of samples, in the 0-20 and 20-40 cm layers. In addition to the soil, litter was also collected using a steel template (20 x 20 cm), and dendrometric data (DBH), height and wood volume of 10 trees per point were obtained. The vegetation indices NDVI, VARI and EVI were generated in GIS Q-GIS 3.2 with images from the Sentinel-2 satellite, and then correlated with the wood volumes obtained. Field and laboratory data showed that the cause of variations in the shade of green is related to the windrowing of clear-cut residues, resulting in a significant increase in TOC at 0-20 cm and in soil CEC, consequently leading to a small increase in nutrient content and reflecting an average increase of 200% in wood volume per hectare. The correlations between wood volume and vegetation indices NDVI, VARI and EVI were positive, although low. The EVI proved to be the most suitable for the study in question, with an  $R^2$  of 0.27. Dark green bands of *Pinus taeda* in commercial planting visible in satellite images and confirmed by vegetation indices, are associated with greater tree growth in areas of better fertility, which in turn are related to the windrowing of clear-cut residues.

Keywords: forest soil, soil-plant interaction, silviculture.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - IMAGEM DA ÁREA DE ESTUDO (GOOGLE EARTH) COM OS PONTOS DE AMOSTRAGEM, PIRAÍ DO SUL- PR.....	23
FIGURA 2- MÉDIAS DO ESTOQUE DE SERAPILHEIRA FRAÇÃO GROSSEIRA. COMPARADAS ATRAVÉS TESTE T-STUDENT AO NÍVEL DE $P < 0,05$ .....	26
FIGURA 3 - MÉDIAS DO ESTOQUE DE SERAPILHEIRA FRAÇÃO FINA COMPARADAS ATRAVÉS TESTE T-STUDENT AO NÍVEL DE $P < 0,05$ .....	26
FIGURA 4 - COLETA DA SERAPILHEIRA/ FRAÇÃO FINA DA LEIRA .....	31
FIGURA 5 - CARVÃO ENCONTRADO EM AMOSTRAS DE SOLO.....	31
FIGURA 6 - CORRELAÇÃO ENTRE DAP (m) E ALTURA (m) PONTOS VERDE ESCUROS.....	33
FIGURA 7 - CORRELAÇÃO ENTRE DAP (m) E MÉDIA DO VOLUME DE MADEIRA POR PLANTA ( $m^3$ ) PONTOS VERDE ESCUROS .....	34
FIGURA 8 - CORRELAÇÃO ENTRE DAP (m) E ALTURA (m) PONTOS DAS ÁREAS VERDE CLARAS.....	34
FIGURA 9 - CORRELAÇÃO ENTRE DAP (m) E MÉDIA DO VOLUME DE MADEIRA POR PLANTA ( $m^3$ ) PONTOS ÁREAS VERDE CLARAS .....	35
FIGURA 10 - PLOTAGEM DOS EIXOS 1 E 2 DAS ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP) DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E DADOS DENDROMÉTRICOS.....	36
FIGURA 11 - RAIZES PRESENTES NAS AMOSTRAS DE SERAPILHEIRA.....	39
FIGURA 12 - NDVI- ÍNDICE POR DIFERENÇA NORMALIZADA.....	62
FIGURA 13 - VARI- ÍNDICE RESISTENTE À ATMOSFERA NA REGIÃO VISÍVEL.....	62
FIGURA 14 - EVI- ÍNDICE DE VEGETAÇÃO MELHORADO .....	63
FIGURA 15 - GRÁFICOS A, B, C, D – DADOS DENDROMÉTRICOS DAS ÁREAS VERDE CLARAS E VERDE ESCURAS.....	65
FIGURA 16 - GRÁFICO DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE VOLUME DE MADEIRA POR PLANTA ( $M^3$ ) X NDVI .....	66
FIGURA 17- GRÁFICO DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE VOLUME DE MADEIRA POR PLANTA ( $M^3$ ) X VARI .....	66
FIGURA 18 - GRÁFICO DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE VOLUME DE MADEIRA POR PLANTA ( $M^3$ ) X EVI.....	67

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1- PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL (mm) NO MUNICÍPIO DE PIRAI DO SUL- PR ULTIMOS 12 ANOS .....	21
TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS NA ÁREA DE ESTUDO EM PIRAI DO SUL- PARANÁ .....	22
TABELA 3 - ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO PARA A PROFUNDIDADE DE 0-20 CM. CÉLULAS EM VERDE INDICAM AUMENTO DOS VALORES E CÉLULAS AMARELAS INDICAM REDUÇÃO.....	28
TABELA 4 - ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO PARA A PROFUNDIDADE DE 20-40 CM. CÉLULAS EM VERDE INDICAM AUMENTO DOS VALORES E CÉLULAS AMARELAS INDICAM REDUÇÃO.....	29
TABELA 5 - COLORAÇÕES ATRIBUÍDAS AO SOLO DAS ÁREAS DE AMOSTRAGEM NO PLANTIO DE PINUS TAEDA L.- PIRAI DO SUL- PR.....	32
TABELA 6 - DADOS DENDROMÉTRICOS DO PINUS TAEDA L. EM VE E VC.....	33
TABELA 7- VALORES DOS ÍNDICES NDVI, EVI E VARI PARA CADA PONTO AMOSTRAS, NAS ÁREAS VERDE CLARO (VC) E VERDE ESCURO (VE).....	61
TABELA 8 - MÉDIAS DOS ATRIBUTOS DENDROMÉTRICOS E VOLUME DE TORA DE MADEIRA POR HECTARE ÁREAS VERDE CLARAS E FAIXAS VERDE ESCURAS– PLANTIO DE PINUS TAEDA L. PIRAI DO SUL- PR. ....	64

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 REFERENCIAS.....</b>	<b>18</b>
<b>2 CAPÍTULO I: INFLUÊNCIA DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS NA VARIAÇÃO DE TONALIDADE DAS COPAS EM PLANTIO DE PINUS TAEDA .....</b>	<b>16</b>
2.1 RESUMO.....	16
2.2 ABSTRACT .....	17
2.3 INTRODUÇÃO .....	18
2.4 MATERIAL E MÉTODOS .....	21
2.4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....	21
2.4.2 COLETA E ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO .....	23
2.4.3 ESTOQUE DE SERAPILHEIRA.....	24
2.4.4 AVALIAÇÃO DENDROMÉTRICA .....	24
2.4.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	25
2.5 RESULTADOS .....	25
2.6 DISCUSSÃO .....	36
<b>3 CONCLUSÕES .....</b>	<b>41</b>
<b>4 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....</b>	<b>41</b>
<b>5 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>42</b>
<b>3 CAPÍTULO II: CORRELAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NDVI, VARI E EVI E O VOLUME DE MADEIRA EM PLANTIO DE <i>PINUS TAEDA L.</i> .....</b>	<b>53</b>
5.1 RESUMO.....	53
5.2 ABSTRACT .....	54
5.3 INTRODUÇÃO .....	55
5.4 MATERIAL E MÉTODOS .....	58
5.4.1 ÁREA DE ESTUDO E COLETA DE DADOS .....	58
5.4.2 DADOS DENDROMÉTRICOS .....	58
5.4.3 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS E CÁLCULO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO .....	59
5.4.4 REGRESSÃO LINEAR E ÍNDICE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON .....	60
<b>5.5 RESULTADOS.....</b>	<b>61</b>
5.6 DISCUSSÃO .....	68

5.7 CONCLUSÕES .....	70
5.8 REFERÊNCIAS.....	71
<b>4 CONCLUSÃO GERAL.....</b>	<b>77</b>
<b>6 REFERÊNCIAS GERAIS .....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE 1 - TABELA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO PROFUNDIDADE 0-20 CM PARTE 1 (TESTE T-STUDENT AO NIVEL DE CONFIANÇA DE 95%) ..</b>	<b>100</b>
<b>APÊNDICE 2 - TABELA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO PROFUNDIDADE 0-20 CM PARTE 2 (TESTE T-STUDENT AO NIVEL DE CONFIANÇA DE 95%) ..</b>	<b>101</b>
<b>APÊNDICE 3 - TABELA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO PROFUNDIDADE 0-20 CM PARTE 3 (TESTE T-STUDENT AO NIVEL DE CONFIANÇA DE 95%) ..</b>	<b>102</b>
<b>APÊNDICE 4 - TABELA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO PROFUNDIDADE 20-40 CM PARTE 1 (TESTE T-STUDENT AO NIVEL DE CONFIANÇA DE 95%)</b>	<b>103</b>
<b>APÊNDICE 5 - TABELA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO PROFUNDIDADE 20-40 CM PARTE 2 (TESTE T-STUDENT AO NIVEL DE CONFIANÇA DE 95%)</b>	<b>104</b>
<b>APÊNDICE 6 - TABELA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO PROFUNDIDADE 20-40 CM PARTE 3 (TESTE T-STUDENT AO NIVEL DE CONFIANÇA DE 95%)</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICE 7 - TABELA DE ANÁLISE DA MASSA DE SERAPILHEIRA PARTE 1 (TESTE T-STUDENT AO NIVEL DE CONFIANÇA DE 95%).....</b>	<b>106</b>
<b>APÊNDICE 8 - TABELA DE ANÁLISE DA MASSA DE SERAPILHEIRA PARTE 2 (TESTE T-STUDENT AO NIVEL DE CONFIANÇA DE 95%).....</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE 9 - TABELA DE ANALISE DOS DADOS DENDROMÉTRICOS PARTE 1 (TESTE T-STUDENT AO NIVEL DE CONFIANÇA DE 95%).....</b>	<b>108</b>
<b>APÊNDICE 10 - TABELA DE ANALISE DOS DADOS DENDROMÉTRICOS PARTE 2 (TESTE T-STUDENT AO NIVEL DE CONFIANÇA DE 95%).....</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICE 11 - MAPA DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM- IMAGEM DO SATELITE SENTINEL-2 .....</b>	<b>110</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

As florestas plantadas ocupam 131 milhões de hectares globalmente (FAO, 2020), desempenhando um papel crucial na produção de recursos, na mitigação das mudanças climáticas e na conservação da biodiversidade. As florestas plantadas com *Pinus spp.* no Brasil correspondem a 1,64 milhões de hectares plantados, com maior representação no Paraná (44% da sua área plantada) e Santa Catarina (26%) (Indústria Brasileira de Árvores [IBA], 2020).

O *Pinus taeda Linnaeus*, comumente encontrado na região Sul do Brasil, destaca-se por sua grande adaptação às condições climáticas favoráveis, ao uso de material genético de qualidade e às práticas eficientes de silvicultura, mostrando alta adaptação mesmo em solos de baixa fertilidade. (Consalter et al., 2021; Moro et al., 2014; Kulmann et al., 2023). No Brasil a principal aplicação de *P. taeda L.* tem sido em indústrias madeireiras e de celulose e papel (Oliveira et al., 2006).

Entre as variáveis de maior influência no crescimento e desenvolvimento das plantações florestais, o solo e os fatores climáticos são os mais relevantes (Stape et al., 2010). Estudos realizados no sul do Brasil mostraram que os atributos edáficos têm forte relação com a produtividade de *P. taeda* (Rigatto et al., 2005; Bognola et al., 2010; Munhoz, 2011; Pinto et al., 2023).

Embora o *Pinus taeda L.* apresente grande plasticidade no que se refere aos ambientes de produção, existe também grande variação de valores de produtividade em função das condições edafoclimáticas. Isto implica que mesmo a espécie se desenvolvendo em uma grande variedade de solos de diferentes texturas, capacidade de retenção de umidade, acidez, etc, a produtividade em volume de madeira pode variar consideravelmente, levando à um baixo retorno econômico quando em solos de baixa fertilidade (Stahl et al., 2017).

Devido à plasticidade mencionada anteriormente, no Brasil a maioria dos povoamentos está comumente localizada em terras com potencial agrícola baixo a médio, o que melhora a relação custo/oportunidade (Motta et al., 2014; Abrão et al., 2015; Batista et al., 2015; Sass et al., 2020). No entanto, essas áreas de baixo potencial agrícola apresentam uma grande variação em características e produtividade em distâncias curtas, influenciadas por diversos fatores como relevo, profundidade do solo, presença de pedras, fertilidade do solo, disponibilidade de

nutrientes e água. (Morales et al., 2010; Gomes et al., 2016; Horst et al., 2018; Horst-Heinen et al., 2021).

Uma característica importante a ser avaliada em plantios florestais, como na espécie do *Pinus taeda L.*, é a observação da coloração das acículas e a tonalidade da copa da árvore, estando associadas a concentração de clorofilas e nutrientes, em específico o magnésio. As clorofilas são os pigmentos verdes que permitem aos fitoautotróficos usar a energia luminosa para produzir matéria orgânica por meio da fotossíntese (Moynier & Fujii., 2017). As clorofilas são formadas por um átomo de Mg (magnésio) incorporado em um anel de porfirina ou clorina<sup>1, 2</sup> (Moynier & Fujii., 2017). Cerca de três quartos do Mg foliar parece estar associado à síntese de proteínas, e até um quinto aos pigmentos de clorofila, e o restante fração armazenada no vacúolo (Karley & White., 2009). O magnésio tem um grande raio hidratado e sorve fracamente aos colóides do solo, predispondo para lixiviação, particularmente em solos ácidos com baixa capacidade de troca catiônica (CTC) (Aitken et al. 1999; Grzebisz 2009; Verbruggen & Hermans., 2013).

A tonalidade das acículas, variando em tons de verde, pode estar associada diretamente com a saúde fisiológica das árvores. Segundo Edwards et al., (1990), as mudanças na coloração das acículas de *Pinus taeda L.* podem indicar alterações em processos biológicos relacionados a deficiências nutricionais, doenças ou estresse hídrico. Portanto, como embasado por Philips et al. (2021), a observação e interpretação de distinções nas colorações tornam-se essenciais para a realização do manejo adequado em plantios de pinus.

O manejo do solo não apenas impacta a produtividade, mas também altera os atributos edáficos, como composição química, textura, capacidade de retenção de água, sendo fatores determinantes no desenvolvimento vegetativo. Pereira et al. (2023) demonstraram que a aplicação de resíduos no solo altera as características químicas, influenciando positivamente a nutrição e crescimento do *Pinus taeda L.* Sixel et al. (2015) e Consalter et al. (2021), realizaram estudos que demonstram como o manejo de resíduos e a fertilização em plantações de *Pinus taeda L.* podem influenciar significativamente a dinâmica de nutrientes e o acúmulo de C (carbono) e MO (matéria orgânica), afetando assim a saúde, crescimento e como consequência a produtividade de biomassa.

Para investigar a produção dos plantios florestais, a mensuração da biomassa é fundamental, sendo realizada principalmente por meio de métodos convencionais,

ou seja, destrutivos, estes métodos tem sido reavaliados, pois demandam muito tempo e trabalho (Hentz et al., 2014; Cassol. 2013). O uso de dados de sensores remotos para estimar a biomassa se tornou uma opção de mais fácil aplicação e custo reduzido para avaliação de inventários florestais (Le Maire et al., 2011). Os avanços no processamento das imagens de satélite são responsáveis pela crescente utilização desses métodos para caracterizar a estrutura das florestas e, conseqüentemente sua biomassa (Watzlawick et al., 2009). O ajuste de valores espectrais permite obter índices de vegetação que podem ser comparados com indicadores ecológicos da estrutura e dinâmicas das florestas (Hentz et al., 2014).

A aplicação dos índices de vegetação (IV) possibilita a realização de análises em escala espacial temporal de propriedades da vegetação, como: atividade fotossintética, métricas fenológicas, parâmetros biofísicos do dossel como o conteúdo de clorofila, IAF (índice de área foliar), fração de vegetação verde, fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação e identificação de processos fisiológicos (Testa et al., 2018; Huete et al., 2002; Glenn et al., 2008; Gitelson et al., 2003; Gitelson et al., 2005; Boegh et al., 2002; Jiang et al., 2006; Myeni et al., 1997; Di Bella et al., 2004; Zheng et al., 2019).

Entre os IVs (índices de vegetação) um dos mais utilizados para avaliação da dinâmica da vegetação é o NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada), proposto por Tucker. (1979), utiliza as faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo e relaciona seus resultados com propriedades biofísicas da floresta, como o IAF, a biomassa, a área basal. (Dagnachew et al., 2020; Wang et al., 2004). Contudo, apesar da vasta utilização deste índice, o NDVI possui limitações quanto a sensibilidade da atenuação atmosférica, as variações do solo e a saturação em áreas com alto índice foliar (Carlson & Ripley, 1997). Para suprir as limitações, existe o EVI (índice de vegetação melhorado) que, segundo Jiang. (2008) é mais sensível em regiões com alta produção de biomassa, reduzindo a influência do solo e atmosférica.

O EVI foi desenvolvido para melhorar a detecção de mudanças em condições de moderada a alta biomassa, assim como, em situações de não cobertura do solo pelo dossel (Huete et al., 2002). Outro índice de vegetação utilizado para obter informações sobre a nutrição, estresse e vigor das plantas é o VARI (índice resistente a atmosfera no valor visível), proposto por Gitelson et al. (2002) esse índice se baseia na variabilidade do vigor, e mede a quantidade de verde refletida pelas plantas, sendo

um índice que demonstra potencial para aplicação em áreas florestais (Dell et al., 2019; Larrinaga & Brotons, 2019).

O objetivo principal desta pesquisa foi investigar a origem da variação na coloração das árvores, observada por meio de imagens de satélite, em um talhão de plantio comercial de *Pinus taeda* L., e estabelecer uma possível relação com os atributos edafológicos e manejo de resíduos. Foram empregados métodos de análise química do solo, avaliação dendrométrica e técnicas de sensoriamento remoto (índices de vegetação NDVI, VARI e EVI) para correlacionar com a biomassa mensurada. A hipótese deste trabalho é “Se a origem das faixas verde escuras estiver relacionada à influência do manejo de resíduos nas características edafológicas, então será observada uma associação significativa entre a presença dessas faixas e a distribuição dos resíduos no solo”.

## 1.1 REFERENCIAS

Abrão, S. F., Rosa, S. F., Reinert, D. J., Reichert, J. M., Secco, D., & Ebling, A. (2015). Alterações químicas de um Cambissolo Húmico causadas por florestamento com *Pinus taeda* em área de campo natural. *Floresta*, Curitiba, 45(3), 455-464. <https://doi.org/10.5380/rf.v45i3.36103>.

Aitken, R. L., Dickson, T., Hailes, K. J., & Moody, P. W. (1999). Response of field-grown maize to applied magnesium in acidic soils in north-eastern Australia. *Australian Journal of Agricultural Research*, 50(2), 191-198.

Batista, A. H., Motta, A. C. V., Reissmann, C. B., Schneider, T., Martins, I. L., & Hashimoto, M. (2015). Liming and fertilization in *Pinus taeda* plantations with severe nutrient deficiency in savanna soils. *Acta Scientiarum Agronomy*, Maringá, 37(1), 117-125. <https://doi.org/10.4025/actasciagrov37i1.18061>.

Binkley, D., Stape, J.L., Bauerle, W.L., Ryan, M.G., 2010. Explaining growth of individual trees: Light interception and efficiency of light use by *Eucalyptus* at four sites in Brazil. *For Ecol Manage* 259, 1704–1713. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2009.05.037>.

Boegh, E., Soegaard, H., Broge, N., Hasager, C. B., Jensen, N. O., Schelde, K., & Thomsen, A. (2002). Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote sensing of Environment*, 81(2-3), 179-193.

Bognola, I.A., Dedecek, R.A., Lavoranti, O.J., Higa, A.R., 2010. Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus taeda*. *Pesq. Flor. Bras.* 30 (61), 37–49.

Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote sensing of Environment*, 62(3), 241-252.

Cassol, H. L. G. (2013). Estimativa de biomassa e estoque de carbono em um fragmento de floresta ombrófila mista com uso de dados ópticos de sensores remotos.

Consalter, R., Motta, A.C.V., Barbosa, J.Z., Vezzani, F.M., Rubilar, R.A., Prior, S.A., Nisgoski, S., Bassaco, M.V.M., 2021. Fertilization of *Pinus taeda* L. on an acidic oxisol in southern Brazil: growth, litter accumulation, and root exploration. *Eur J For Res* 140, 1095–1112. <https://doi.org/10.1007/S10342-021-01390-Z/TABLES/7>.

Dagnachew, M., Kebede, A., Moges, A., & Abebe, A. (2020). Effects of climate variability on normalized difference vegetation index (NDVI) in the Gojeb River Catchment, Omo-Gibe Basin, Ethiopia. *Advances in Meteorology*, 2020, 1-16.

Dell, M., Stone, C., Osborn, J., Glen, M., McCoull, C., Rimbawanto, A., ... & Mohammed, C. (2019). Detection of necrotic foliage in a young *Eucalyptus pellita* plantation using unmanned aerial vehicle RGB photography—a demonstration of concept. *Australian Forestry*, 82(2), 79-88.

Di Bella, C. M., Paruelo, J. M., Becerra, J. E., Bacour, C., & Baret, F. (2004). Effect of senescent leaves on NDVI-based estimates of f APAR: Experimental and modelling evidences. *International Journal of Remote Sensing*, 25(23), 5415-5427.

Edwards, N. T., Taylor Jr, G. E., Adams, M. B., Simmons, G. L., & Kelly, J. M. (1990). Ozone, acidic rain and soil magnesium effects on growth and foliar pigments of *Pinus taeda* L. *Tree Physiology*, 6(1), 95-104.

FAO, 2020. Global Forest Resources Assessment, Global Forest Resources Assessment. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca8753en>.

Gitelson, A. A., Gritz, Y., & Merzlyak, M. N. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of plant physiology*, 160(3), 271-282.

Gitelson, A. A., Stark, R., Grits, U., Rundquist D., Kaufman, Y., Derry, D. (2002).

Gitelson, A. A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., & Arkebauer, T. J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical research letters*, 32(8).

Glenn, E. P., Huete, A. R., Nagler, P. L., & Nelson, S. G. (2008). Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. *Sensors*, 8(4), 2136-2160.

Gomes, S. S., Gonçalves, J. L. M., Rocha, J. H. T., & Menegale, M. L. C. (2019). Tolerance of Eucalyptus and Pinus seedlings to exchangeable Aluminium. *Scientia Agricola*, [s. l.], 76(6), 494-500. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0011>.

Grzebisz, W. (2011). Magnesium–food and human health. *Journal of Elementology*, 16(2).

Hakamada, R.E., Stape, J.L., Lemos, C.C.Z., Almeida, A.E.A., Silva, L.F., 2015. Uniformidade entre árvores durante uma rotação e sua relação com a produtividade em Eucalyptus clonais. *Cerne* 21, 465–472. <https://doi.org/10.1590/01047760201521031716>.

Hentz, Â. M., Ruza, M. S., Corte, A. P., & Sanquetta, C. R. (2014). Técnicas de sensoriamento remoto para estimativa de biomassa em ambientes florestais. *Enciclopédia biosfera*, 10(18).

Horst, T. Z., Dalmolin, R. S. D., Caten, A. T., Moura-Bueno, J. M., Cancian, L. C., Pedron, F. A., & Schenato, R. B. (2018). Edaphic and Topographic Factors and their Relationship with Dendrometric Variation of *Pinus taeda* L. in a High Altitude Subtropical Climate. *Revista Brasileira e Ciência do Solo*, [s. l.], 42(0), e0180023. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20180023>.

Horst-Heinen, T. Z., Dalmolin, R. S. D., Caten, A. T., Moura-Bueno, J. M., Grunwald, S., Pedron, F. A., Rodrigues, M. F., Rosin, N. A., & Silva-Sangoi, D. V. (2021). Soil depth prediction by digital soil mapping and its impact in pine forestry productivity in

South Brazil. *Forest Ecology and Management*, [s. l.], 488, e118983. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118983>.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1-2), 195-213.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1-2), 195-213.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. Relatório IBÁ 2020. SÃO PAULO, 2020. <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>

Jiang, Z., Huete, A. R., Didan, K., & Miura, T. (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote sensing of Environment*, 112(10), 3833-3845.

Jiang, Z., Huete, A. R., Li, J., & Chen, Y. (2006). An analysis of angle-based with ratio-based vegetation indices. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(9), 2506-2513.

Karley, A. J., & White, P. J. (2009). Moving cationic minerals to edible tissues: potassium, magnesium, calcium. *Current opinion in plant biology*, 12(3), 291-298.

Kulmann, M. S., Deliberali, I., Schumacher, M. V., Stahl, J., Figura, M. A., Ludvichak, A. A., & Stape, J. L. (2023). Can fertilization and stand uniformity affect the growth and biomass production in a *Pinus taeda* plantation in southern Brazil. *Forest Ecology and Management*, 541, 121075.

Larrinaga, A. R., & Brotons, L. (2019). Greenness indices from a low-cost UAV imagery as tools for monitoring post-fire forest recovery. *Drones*, 3(1), 6.

Le Maire, G., Marsden, C., Nouvellon, Y., Grinand, C., Hakamada, R., Stape, J. L., & Laclau, J. P. (2011). MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation biomass. *Remote sensing of Environment*, 115(10), 2613-2625.

Mavimbela, L. Z., Crous, J. W., Morris, A. R., & Chirwa, P. W. (2018). The importance of harvest residue and fertiliser on productivity of *Pinus patula* across various sites in their first, second and third rotations, at Usutu Swaziland. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 48(1), 1-14.

Morales, C. A. S., Albuquerque, J. A., Almeida, J. A., Marangoni, J. M., Stahl, J., & Chaves, D. M. (2010). Qualidade do solo e produtividade de *Pinus taeda* no planalto catarinense. *Ciência Florestal*, Santa Maria, 20(4), 629-640. <https://doi.org/10.5902/198050982421>.

Moro, L., Gatiboni, L.C., Simonete, M.A., Cassol, P.C., Chaves, D.M., 2014. Resposta de pinus taeda com diferentes idades `a adubação NPK no Planalto Sul Catarinense. *Rev. Brasileira Ciência do Solo* 38, 1181–1189. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400014>.

Motta, A. C. V., Barbosa, J. Z., Consalter, R., & Reissmann, C. B. (2014). Nutrição e adubação da cultura de *Pinus*. In Prado, R. M., Wadt, P. G. S. (Ed.). *Nutrição e adubação de espécies florestais e palmeiras*. Jaboticabal: FUNEP. pp. 383-426.

Moynier, F., & Fujii, T. (2017). Theoretical isotopic fractionation of magnesium between chlorophylls. *Scientific reports*, 7(1), 6973.

Munhoz, J.S.B., 2011. Caracterização da produtividade florestal e dos padrões de crescimento de *Pinus taeda* L. no sul do Brasil através de análise de tronco. Dissertação. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 117p.

Myneni, R. B., Ramakrishna, R., Nemani, R., & Running, S. W. (1997). Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, 35(6), 1380-1393.

Oliveira, F. L., Garcia, J. N., & Florsheim, S. M. B. (2006). Propriedades da madeira de *Pinus taeda* L. em função da idade e da posição radial na tora. Properties of *Pinus taeda* L. wood in function of age and radial position in log. *Revista do Instituto Florestal*.

Pereira, M., Bassaco, M. V. M., Motta, A. C. V., Maeda, S., Prior, S. A., Marques, R., ... & Gomes, J. B. V. (2023). Influence of industrial forest residue applications on *Pinus taeda*: Soil, litter, growth, nutrition, and wood quality characteristics. *New Forests*, 54(1), 83-106.

Phillips, C., Stovall, J., Williams, H., & Farrish, K. (2021). Using the forestry reclamation approach for reclaimed surface mineland in the Western Gulf: Effects on *Pinus taeda* seedling growth and survival. *Forests*, 12(7), 845.

Pinto, C. B., Marques, R., Dalmaso, C. A., de Souza Kulmann, M. S., Deliberali, I., Schumacher, M. V., & de Oliveira Junior, J. C. (2023). Relationship between edaphoclimatic attributes and productivity of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in southern Brazil. *Forest Ecology and Management*, 544, 121162.

Rigatto, P. A., Dedecek, R. A., & Mattos, J. L. M. (2005). Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda*. *Revista Árvore*, 29, 701-709.

Ryan, M.G., Stape, J.L., Binkley, D., Fonseca, S., Loos, R.A., Takahashi, E.N., Silva, C.R., Silva, S.R., Hakamada, R.E., Ferreira, J.M., Lima, A.M.N., Gava, J.L., Leite, F.P., Andrade, H.B., Alves, J.M., Silva, G.G.C., 2010. Factors controlling *Eucalyptus* productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. *For Ecol Manage* 259, 1695–1703. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2010.01.013>.

Sass, A. L., Bassaco, M. V. M., Motta, A. C. V., Maeda, S., Barbosa, J. Z., Bognola, I. A., Bosco, J. V. G., Goularte, G. D., & Prior, S. A. (2020). Cellulosic industrial waste to enhance *Pinus taeda* nutrition and growth: a study in subtropical Brazil. *Scientia Forestalis*, [s. l.], 48(126), e3165 (1-16). <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.13>

Sixel, R. M. D. M., Arthur Junior, J. C., Gonçalves, J. L. D. M., Alvares, C. A., Andrade, G. R. P., Azevedo, A. C., ... & Moreira, A. M. (2015). Sustainability of Wood Productivity of Pinus Taeda Based on Nutrient Export and Stocks in the Biomass and in the Soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39, 1416-1427.

Stahl, J., Angelo, A. C., Schumacher, M. V., de Souza, K. K. F., & Biernaski, F. A. (2017). Efeito da adubação fosfatada em Pinus taeda L. em Latossolo Vermelho na região de Telêmaco Borba, Paraná, Brasil. *Revista Ecologia e Nutrição Florestal-ENFLO*, 5(3), 78-86.

Stape, J. L., Binkley, D., Ryan, M. G., Fonseca, S., Loos, R. A., Takahashi, E. N., ... & Azevedo, M. R. (2010). The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. *Forest Ecology and Management*, 259(9), 1684-1694.

Testa, S., Soudani, K., Boschetti, L., & Mondino, E. B. (2018). MODIS-derived EVI, NDVI and WDRVI time series to estimate phenological metrics in French deciduous forests. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 64, 132-144.

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150.

Verbruggen, N., & Hermans, C. (2013). Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. *Plant and soil*, 368, 87-99.

Wang, F., Liu, X., Liu, X., Li, Y., & Wang, T. (2020, May). Spatial and Temporal changes in the Normalized Difference Vegetation Index and its Response to Climate Change in Shaanxi Province, China. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 508, No. 1, p. 012121). IOP Publishing.

Watzlawick, L. F., Kirchner, F. F., & Sanquetta, C. R. (2009). Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucária utilizando imagens do satélite IKONOS II. *Ciência florestal*, 19, 169-181.

Zheng, H., Cheng, T., Zhou, M., Li, D., Yao, X., Tian, Y., ... & Zhu, Y. (2019). Improved estimation of rice aboveground biomass combining textural and spectral analysis of UAV imagery. *Precision Agriculture*, 20, 611-629.

## 2 CAPÍTULO I: INFLUÊNCIA DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS NA VARIAÇÃO DE TONALIDADE DAS COPAS EM PLANTIO DE PINUS TAEDA

### 2.1 RESUMO

Foi observado através de imagens de satélite de um plantio de *Pinus taeda* L. variações de coloração a distâncias muito curtas, nos mesmos talhões adultos (12 anos). Faixas com coloração verde escura (VE) das árvores, de aproximadamente quinze metros de altura, contrastam com verde claro (VC) do restante do talhão. Com isso, objetivou-se identificar a origem das VE e relacionar com aspectos químicos do solo e serapilheira das VE e VC. O estudo foi realizado em uma área de aproximadamente 600 ha, de florestamento situado no município de Pirai do Sul (PR). Os talhões foram implantados em solos derivados do arenito Furnas, com vegetação original de campo nativo, sendo o terceiro ciclo de florestamento de pinus sem calagem e adubação. Com base na imagem de satélite foram selecionados 9 talhões e, em cada talhão, foram estabelecidas as coordenadas dos pontos de amostragem, dentro das áreas de VE e VC. Em cada ponto foram coletadas amostras do solo (0-20 e 20-40 cm) e serapilheira (gabarito 20 x 20 cm) e medidos o DAP (diâmetro a altura do peito), altura total e volume de madeira de 10 árvores. Foram analisados parâmetros químicos do solo (acidez - pH, Al (H + Al); Bases – Ca, Mg e K; P disponível; C e N total), cor do solo e de serapilheira (massa e frações em função do tamanho). No VE em quatro dos nove talhões, foi observado a presença de leira dos cortes rasos dos ciclos anteriores, confirmada pela determinação de uma grande massa da fração grossa (galhos) na serapilheira. Valores de C foram até 2 vezes maiores no VE em relação VC para 0-20 cm e 20-40 cm, refletindo em uma maior CTC a pH 7 e efetiva. Valores similares ou ligeiramente inferiores de pH foram observados na VE, associados à maiores valores de  $Al^{3+}$  e (H+Al),  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$  e P. Foi observado a presença de carvão nas amostras de solo em VE, sugerindo a queima de leiras no passado. Conclui-se que a origem de VE pode estar associada ao manejo de enleiramento de resíduos, com ou sem o processo de queima, fator responsável pelo fornecimento de nutrientes através da ciclagem, além de aumentar a retenção de água no solo e, conseqüentemente aumentar a produtividade (volume de madeira).

**Palavras-chave:** Manejo de resíduos florestais, Leira, Imagem orbital, Florestamento.

## 2.2 ABSTRACT

Color variations were observed through satellite images of a *Pinus taeda* L. plantation at very short distances, in the same adult plots (12 years old). Dark green (VE) bands of the trees, approximately fifteen meters high, contrast with the light green (VC) of the rest of the plot. With this, the objective is to identify the origin of VE and relate it to chemical aspects of the soil and litter of VE and VC. The study was carried out in an area of approximately 600 ha, of forestry located in the municipality of Pirai do Sul (PR). The plots were established in soils derived from the Furnas sandstone, with original native field vegetation, being the third cycle of pine forestry without liming and fertilization. Based on the satellite image, 9 plots were selected and, in each plot, the coordinates of the sampling points were established, within the VE and VC areas. At each point, soil samples were collected (0-20 and 20-40 cm) and burlap (20 x 20 cm template) and measured the DBH (diameter at breast height), total height and wood volume of 10 trees. Soil chemical parameters were analyzed (acidity - pH, Al (H + Al); Bases - Ca, Mg and K; available P; total C and N), soil and litter color (mass and fractions depending on size). In the VE, in four of the nine plots, the presence of windrows from clear cuts from previous cycles was observed, confirmed by the determination of a large mass of the coarse fraction (branches) in the litter. C values were up to 2 times higher in VE compared to VC for 0-20 cm and 20-40 cm, reflecting a higher CEC at pH 7 and effective. Similar or slightly lower pH values were observed in VE, associated with higher values of Al<sup>3+</sup> and (H+Al), Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> and P. The presence of charcoal was observed in soil samples in VE, suggesting the burning of windrows in the past. It is concluded that the origin of EV may be associated with waste raking management, with or without the burning process, a factor responsible for supplying nutrients through cycling, in addition to increasing water retention in the soil and, consequently, increasing productivity (volume of wood).

Keywords: Forest residue management, windrow, Orbital imaging, Afforestation.

## 2.3 INTRODUÇÃO

As florestas plantadas ocupam 7% da área florestal global, cobrindo 131 milhões de hectares (FAO, 2020). No Brasil, as florestas cultivadas ocupam 9,93 milhões de hectares, o que representa 1,2% da economia do país. O *Pinus* é o segundo gênero mais cultivado, com uma área de 1,93 milhão de hectares, com 89% das plantações localizadas na região sul do país (Indústria Brasileira de Árvores (Food and Agriculture Organization of the United Nation [FAO], 2020). A espécie mais representativa é o pinheiro loblolly (*Pinus taeda* L.) devido a sua adaptabilidade à região, condições climáticas, seleção genética e práticas silviculturais (Consalter et al., 2021; Moro et al., 2014; Andrade et al., 2021). A principal aplicação da madeira de *Pinus taeda* L. tem sido para produção de papel e celulose, bem como na construção civil, indústria moveleira e serrados (Alcântara et al., 2007).

As plantações de pinus no Brasil se tornaram referência mundial, devido ao seu rápido crescimento e incremento médio anual (IMA) de 29,7 m<sup>3</sup> por hectare por ano, sendo o país com maior produtividade do gênero no mundo (Andrade et al., 2021; Indústria Brasileira de Árvores (Food and Agriculture Organization of the United Nation [FAO], 2020). Apesar da alta produtividade, o desenvolvimento do pinus é fortemente influenciado pelas condições edáficas do sítio (Consalter et al., 2021).

Quando os fatores climáticos e fisiográficos se mantêm constantes, mediante procedimento adequado de estratificação, as propriedades do solo se convertem no fator principal do ambiente físico, que tem uma relação apreciável com o crescimento da árvore (Gonçalves et al., 1990). Os fatores fisiográficos e climáticos normalmente não são alterados pela atividade florestal, apenas os fatores edáficos (Ralston. 1967).

Os atributos do solo são um dos fatores que podem influenciar a qualidade final da polpa produzida, através de sua interferência na taxa de crescimento dos sítios florestais e, conseqüentemente, na qualidade da madeira produzida (Rigatto et al., 2005).

Os plantios de *Pinus taeda* L. no estado do Paraná estão localizados principalmente em solos derivados de rochas sedimentares do paleozóico, na Bacia do Paraná, em regiões caracterizadas por solos arenosos, ácidos, com baixa saturação por bases e altos níveis de Al (alumínio) trocável (Instituto Água e Terra [IAT], 2023; Rodriguez et al., 2018).

A uniformidade de plantio está diretamente relacionada a taxa de fornecimento de recursos (luz, água e nutrientes) disponíveis para árvores individuais, porque a competição homogênea entre plantas minimiza diferenças em duas condições: (i) acima do solo, como a captura de radiação solar; e (ii) abaixo do solo, como o acesso à água e aos nutrientes disponíveis (Aspinwall et al., 2011).

Uma maneira de aumentar a disponibilidade de nutrientes no solo é manter resíduos de colheitas anteriores na área do plantio (Mavimbela et al., 2018). Esses resíduos promovem o aumento no volume de produção ao longo do tempo (Egnell, 2011). O manejo de resíduos em leiras em solos de baixa fertilidade pode acarretar em falta de uniformidade no plantio, pois plantas que estiverem sob condições de maior disponibilidade de nutrientes tendem a ter uma maior produtividade, como consequência haverá uma heterogeneidade no desenvolvimento.

A heterogeneidade de plantio nas plantações florestais pode promover aumento no número de árvores dominadas e, conseqüentemente, uma diminuição na produtividade do povoamento (Aspinwall et al., 2011). Árvores dominadas mostram redução da eficiência no uso de recursos, devido ao menor índice de área foliar (IAF) e menos raízes produzidas, reduzindo o acesso à luz, água e nutrientes (Hakamada et al., 2015).

Árvores com menor IAF podem reduzir as concentrações de clorofilas e proteínas do cloroplasto como Rubisco refletindo a menor quantidade de radiação solar interceptada pela copa (Stefano et al., 2018), menor fixação de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) no tecido foliar e, conseqüentemente, menor síntese proteica, diminuindo divisão e alongamento celular (Moriwaki et al., 2019). A diminuição na interceptação de radiação pode levar a ocorrência de clorose associada à deficiência de Mg (magnésio), pois essa também pode estar diretamente relacionada à intensidade da luz (Cakmak & Marschner 1992; Ende & Evers 1997; Cakmak & Yazici 2010)

Atualmente diversas áreas de plantio no segundo planalto paranaense estão entre a segunda e terceira rotação sem reposição nutricional, onde problemas de deficiência nutricional são frequentemente relatados (Batista et al., 2015; Scheneider, 2011). O estado nutricional dos povoamentos arbóreos também pode ser avaliado visualmente com base nas mudanças morfológicas, causadas por deficiências nutricionais (Mengel & Kirkby, 1982; Reinikainen et al., 1998).

O efeito geral mais importante das deficiências nutricionais em árvores é o crescimento reduzido, enquanto as folhas parecem ser particularmente indicadores

sensíveis de deficiência de nutrientes (Kramer & Kozlowski, 1979). Por exemplo, a deficiência de potássio nas coníferas é indicada pela cor amarela das pontas das acículas ou das acículas inteiras (clorose). A clorose também é um sintoma de deficiência de magnésio, mas difere daquela causada por deficiência de potássio em que a cor da acícula é mais amarelada e a fronteira entre a ponta amarela e a parte saudável da folia é afiada. (Watt, 2019)

A detecção de deficiências nutricionais usando métodos tradicionais é dispendiosa e demorada. O método mais utilizado é a análise química de amostras de folhagem em que as concentrações de nutrientes e pigmentos como a clorofila são comparadas com níveis críticos (Carter, 1992). Embora as concentrações críticas sejam úteis para identificar deficiências nutricionais em povoamentos estabelecidos, a extrapolação de um número limitado de amostras de folhas até o nível do dossel introduz imprecisões (Blackburn, 2006).

Os dados de detecção remota têm sido promovidos há muito tempo como um meio de avaliar o estado nutricional das áreas florestais em amplas escalas espaciais (Goetz et al., 1985).

Com isso, o atual estudo foi conduzido em um plantio comercial de *Pinus taeda* L. em Pirai do Sul, segundo planalto paranaense, com o objetivo de relacionar observações de imagens de satélite atribuídas a variação da tonalidade das acículas das copas das árvores com os atributos químicos do solo e o manejo de resíduos, contribuindo assim com informações para otimizar a produtividade florestal.

## 2.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

O estudo foi realizado em uma área de florestamento de *Pinus taeda L.* (12 anos) de aproximadamente 600 hectares, localizada no município de Pirai do Sul, estado do Paraná, Brasil, com coordenada central 24°24'3.04"S 49°58'26.69"O, e altitude média de 1004 m acima do nível médio do mar, pertencente a empresa CMPC. Os talhões de *Pinus taeda L.* foram implantados em solos de vegetação de campo nativo, sendo o terceiro ciclo da cultura sem adubação e calagem, com espaçamento 2,5 x 2,5 m. As árvores do plantio não sofreram desbaste.

A vegetação nativa da área em estudo é representada pela floresta subtropical perenifólia (floresta ombrófila mista), pelos campos subtropicais (estepe gramíneo-lenhosa) e, em menor área, pelos campos cerrados (savana arborizada) (Potter et al., 2002).

Segundo classificação climática de Köppen, o clima da região é Cfb, com temperaturas anuais variando entre 16 a 18 °C (Alvares et al., 2013). A precipitação média anual entre 2011 e 2022 variou de 983,5 a 2042,4 mm ano<sup>-1</sup> Tabela 1 (ÁGUAS PARANÁ, 2023).

TABELA 1- PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL (mm) NO MUNICÍPIO DE PIRAI DO SUL- PR ULTIMOS 12 ANOS

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
2011	262,0	143,0	107,7	129,2	25,7	112,1	129,8	231,0	25,5	264,0	120,2	141,3	1691,5
2012	212,2	160,5	62,2	270,7	57,4	340,8	89,2	29,7	46,8	77,7	95,1	89,7	1532,0
2013	136,9	316,7	117,2	110,4	143,0	336,4	139,2	5,5	183,6	167,6	96,2	81,9	1834,6
2014	232,9	99,7	152,3	125,0	125,7	191,5	86,9	28,7	280,4	44,7	159,4	142,4	1669,6
2015	111,1	161,9	238,6	84,5	153,6	15,8	229,9	49,0	214,3	205,0	341,2	178,0	1982,9
2016	287,6	247,2	80,9	69,5	175,6	129,1	83,4	213,6	47,3	126,5	106,7	117,3	1684,7
2017	113,1	46,4	147,9	72,1	198,2	212,3	0,0	103,6	70,0	278,4	141,0	275,7	1658,7
2018	224,8	42,7	312,7	34,0	42,0	80,8	13,8	48,6	63,8	239,9	43,6	57,4	1204,1
2019	118,6	153,4	133,7	167,6	213,2	175,5	48,8	31,2	96,5	88,2	219,6	153	1599,3
2020	56,3	111,9	18,8	36,2	66,8	155,2	26,8	198,6	6,0	61,1	168,5	77,3	983,5
2021	218,5	46,6	172,8	25,7	87,2	73,3	15,6	12,8	39,5	317,8	65,0	79,5	1154,3
2022	144,3	118,6	187,5	111,7	82,1	104,2	22,0	143,9	222,5	159,3	46,5	103,0	1445,6
2023	237,0	386,5	128,0	122,1	25,0	138,4	99,2	156,0	156,0	402,5	120,3	71,4	2042,4

FONTE: Adaptada Águas Paraná (2024).

Com base nas imagens do satélite Sentinel-2 foram selecionados 9 pontos que apresentavam heterogeneidade de coloração, aqui denominadas de faixas de coloração verde escura (VE), e próximos a esses (em torno de 20 m de distância) áreas de coloração verde clara (VC).

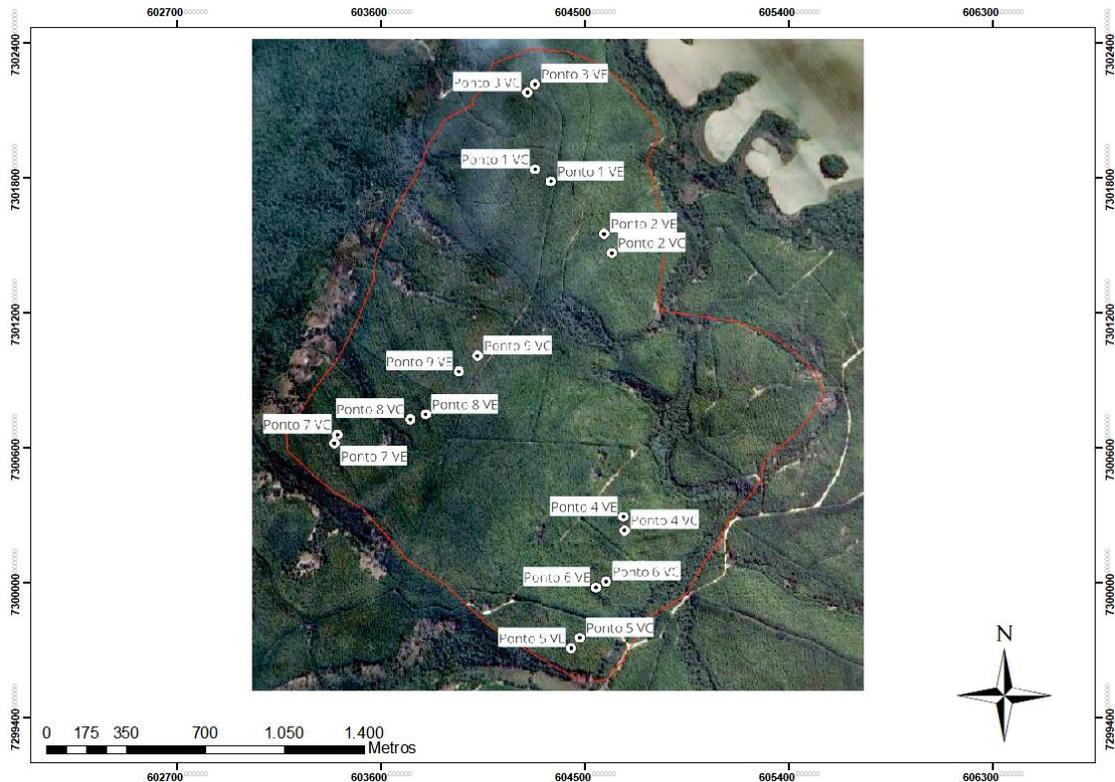
A área possui relevo suave ondulado com material de origem do tipo Arenito da Formação Furnas, no Segundo Planalto Paranaense. Os solos na área de estudo foram classificados como (Tabela 2) : NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico lépticos; NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico léptico; LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico; ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Tb Distrófico típico; CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico léptico e ARGISSOLO VERMELHO Tb Distrófico abrupto de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018).

TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS NA ÁREA DE ESTUDO EM PIRAÍ DO SUL- PARANÁ

Classificação do Solo (SIBCS)	VE	VC	Localização
NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico lépticos	■		24°24'17.47"S 49°58'47.14"O
NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico léptico			24°24'18.19"S 49°58'48.34"O
LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico		■	24°23'23.12"S 49°58'19.75"O
ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Tb Distrófico típico			24°23'37.60"S 49°58'17.85"O
CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico léptico	■		24°24'2.02"S 49°58'27.92"O
ARGISSOLO VERMELHO Tb Distrófico abrupto			24°23'23.77"S 49°58'20.42"O
LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico arênico			24°24'11.92"S 49°58'34.58"O

FONTE: A autora (2023).

FIGURA 1 - IMAGEM DA ÁREA DE ESTUDO (GOOGLE EARTH) COM OS PONTOS DE AMOSTRAGEM, PIRAÍ DO SUL- PR



FONTE: A autora (2024).

#### 2.4.2 COLETA E ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO

A coleta do solo foi realizada com o uso do trado holandês, nas áreas VE (verde escuras) e VC (verde claras) de cada um dos 9 pontos, nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm, sendo realizadas 4 repetições. As amostras foram obtidas nas entrelinhas do cultivo de *Pinus taeda* L. no mês de novembro de 2022. As amostras de solo (úmidas) coletadas a campo tiveram suas respectivas colorações descritas com o auxílio da carta de cores para solos de Munsell.

Em laboratório, as amostras de solo foram secas em estufa a 60°C, por 48 horas, destorroadas e passadas em peneira de malha com abertura de 2 mm. Após o preparo inicial as amostras seguiram para a determinação dos seguintes parâmetros: pH CaCl<sub>2</sub> (0,01 mol L<sup>-1</sup>) relação 1:2,5; pH SMP; acidez potencial (H<sup>+</sup>Al); C e N total no método elementar com uso do equipamento Perkin-Elmer CHNS/OPEZ 400 series; Al<sup>3+</sup> (alumínio trocável), Ca<sup>+2</sup> (cálcio) e Mg<sup>+2</sup> (magnésio) foram extraídos por KCl (cloreto de potássio) 1 mol L<sup>-1</sup>, sendo Ca e Mg determinados por absorção atômica

e Al por titulometria. K (potássio) e P (fósforo) extraídos por Melich-1 e determinados por fotometria de chama, seguindo as metodologias do manual de métodos de análise de solo (EMBRAPA, 2017). A partir dos valores obtidos foram calculados a CTC (capacidade de troca catiônica) efetiva, CTC a pH 7,0, soma de bases, saturação por bases e relação carbono/nitrogênio.

#### 2.4.3 ESTOQUE DE SERAPILHEIRA

A coleta da serapilheira foi realizada em novembro de 2022, 12 anos após o plantio. Foram coletadas amostras em 9 faixas com coloração verde escura e 9 pontos coloração verde clara no restante do talhão, em 4 repetições por ponto, totalizando 72 amostras. Para amostragem foi utilizado um gabarito de aço de 0,2 x 0,2 m e uma faca de serra para o corte da serapilheira delimitado pela parte interna (quadrado do gabarito). As amostras de serapilheira foram passadas em peneiras de malha com abertura de 6 mm (litter novo) e 2 mm (litter velho/decomposto). Em seguida foram lavadas para a remoção do solo através do método de densidade. As amostras foram colocadas em sacos de papel e secas em estufa a 60° C até atingirem peso constante, então foram pesadas para determinação da massa seca de cada fração.

#### 2.4.4 AVALIAÇÃO DENDROMÉTRICA

Foram selecionadas 10 plantas de *Pinus taeda* L. por ponto, a altura total foi mensurada com o uso do aparelho hipsômetro/clinômetro Haglof Sweden. O diâmetro a altura do peito (DAP) foi medido com auxílio de uma fita métrica, primeiramente a campo foram coletados os valores da circunferência à altura do peito (CAP) e posteriormente calculado o DAP. Para estimar o volume da madeira foram utilizadas as alturas totais mensuradas com o clinômetro, posteriormente aplicadas ao fator de forma fornecido pela empresa CMPC:

$$\text{FATOR DE FORMA} = \left[ \frac{((\text{DAP}/100) * (\text{DAP}/100) * \pi)}{4} \right] * (h/5)$$

Onde:

DAP= diâmetro a altura do peito

h= altura total

Após o cálculo do volume de madeira por planta, foi calculado o volume de madeira por hectare ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ) levando em consideração um número de 1.666 plantas por hectare, para o cálculo não foi atribuída taxa de mortalidade de plantas, sendo assim:

$$\text{Volume de madeira por hectare} = \text{volume por planta} \times 1.666 \text{ plantas há}^{-1}$$

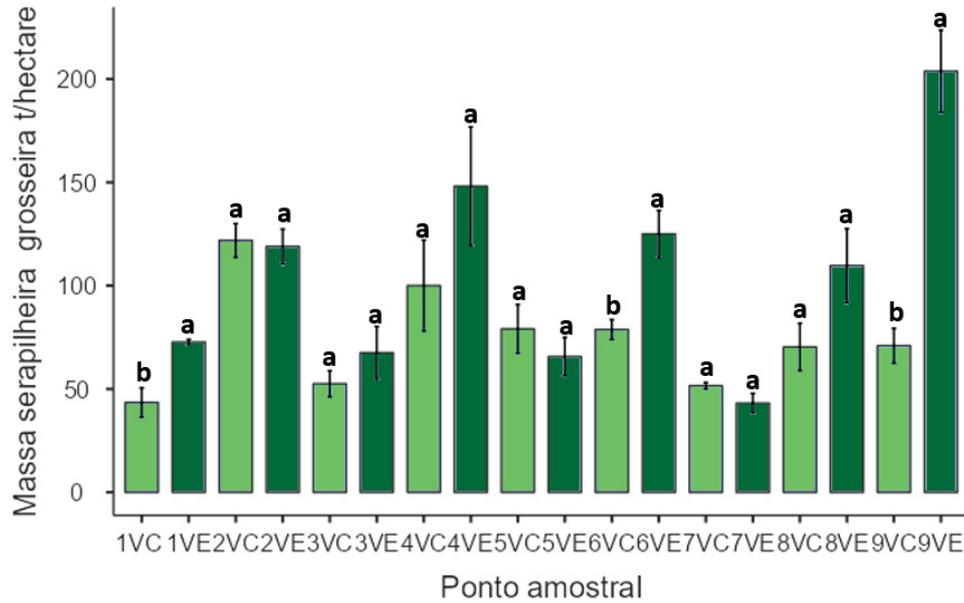
#### 2.4.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os resultados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro- Wilk, ao teste de homogeneidade de variâncias de Levene e posteriormente as médias foram comparadas através teste T de Student ao nível de  $p < 0,05$ . Para cada variável foi calculado o intervalo com o nível de confiança de 95% para variações de verde considerando os níveis de profundidade de 0-20 cm e 20-40 cm. Os atributos químicos e dados dendrométricos do *Pinus taeda L.* foram submetidos a análise de componentes principais, as variáveis analisadas foram submetidas a testes de correlações de Pearson, de acordo com essas foram definidos os parâmetros para gerar o gráfico bidimensional. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do programa Excel do pacote office Microsoft e o software Jamovi 2.3.26.

#### 2.5 RESULTADOS

Durante a coleta da serapilheira foi observado a presença de antigo enleiramento em algumas áreas VE, em outras não havia a presença da leira na VE. Foi confirmado pela maior abundância da fração grossa que correspondia a galhos (serapilheira grossa), em aproximadamente 24%. Os pontos, 1, 4, 6 e 9 evidenciaram essas diferenças estatisticamente entre as tonalidades ( $p > 0,05$ ) (Figuras 2 e 3).

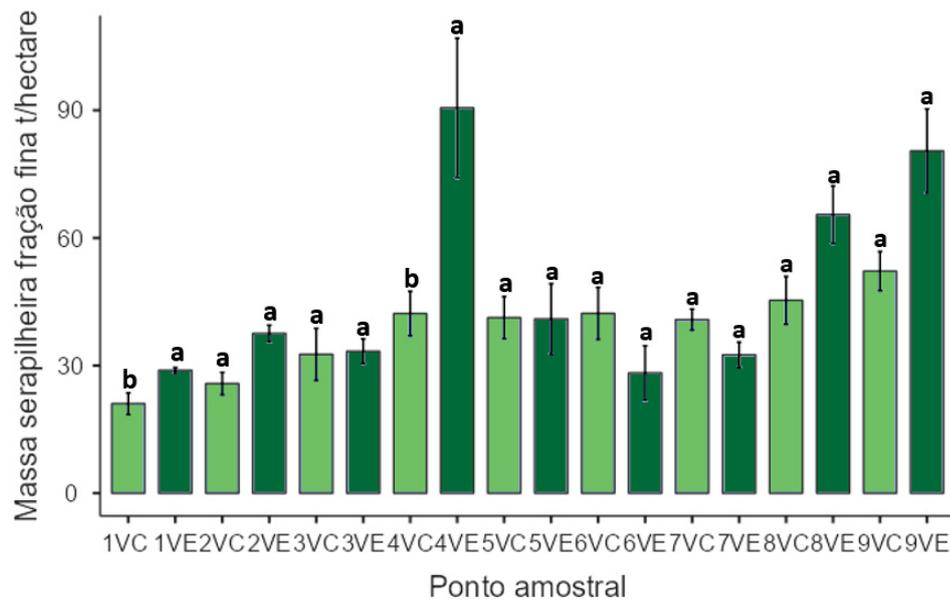
FIGURA 2- MÉDIAS DO ESTOQUE DE SERAPILHEIRA FRAÇÃO GROSSEIRA. COMPARADAS ATRAVÉS TESTE T-STUDENT AO NÍVEL DE P < 0,05



Médias com p- valor > que 0,05 não diferem estatisticamente á nível de confiança de 95% (Teste T-Student).

FONTE: A autora (2024).

FIGURA 3 - MÉDIAS DO ESTOQUE DE SERAPILHEIRA FRAÇÃO FINA COMPARADAS ATRAVÉS TESTE T-STUDENT AO NÍVEL DE P < 0,05



Médias com p- valor > que 0,05 não diferem estatisticamente á nível de confiança de 95% (Teste T-Student).

FONTE: A autora (2024).

Os parâmetros relacionados a acidez (pH) e poder tampão ( $\text{Al}^{3+}$ ;  $\text{H}+\text{Al}$ ) foram influenciados pelo local de amostragem. A acidez ativa do solo, representada pelo pH  $\text{CaCl}_2$  (Tabela 3) mostrou ser, ligeiramente mais ácida nos pontos, 6, 8 e 9 das faixas VE em relação às áreas VC em 0-20 cm de profundidade. No ponto 1 houve um aumento de pH em VE em relação a VC. Avaliando a acidez ativa, o pH em solução tampicante SMP foi menor nos pontos 8 e 9, no entanto também houve decréscimo nos pontos 1, 3 e 4 em VE e ligeiramente maiores em VC. Já na profundidade de 20-40 cm, a acidez (pH  $\text{CaCl}_2$ ) nos pontos 4 e 9 em VE foram relativamente menores em relação aos pontos 4 e 9 em VC. No SMP o decréscimo do pH ocorreu nos pontos 1,4, 8 e 9 em VE, e acréscimo nesses pontos em VC.

Inversamente ao decréscimo do pH, foi observado maiores valores de acidez potencial ( $\text{H}+\text{Al}$ ) nos pontos 1,4, 6, 8, 9 e Al nos pontos 1,2, 4, 6 e 9 em VE comparativamente aos pontos em VC na profundidade de 0-20 cm (Tabela 3). Para a profundidade de 20-40 cm houve acréscimo na acidez potencial ( $\text{H}+\text{Al}$ ) nos pontos 1,3,4,6,7 e 9 em VE comparativamente com VC. Também foi observado um aumento no Al nos pontos 1,3,4,6,7 e 9 nas áreas de VE relativamente a VC (Tabela 4). Em contraste, entre as bases trocáveis, o Ca trocável foi maior nos pontos 3,4,5,6,7,8, e 9, o Mg apresentou aumento nos pontos 3,4 e 8 e o K nos pontos 1, 4 e 8, ambos nas faixas VE em relação a VC, em 0-20 cm de profundidade. Na profundidade de 20-40 cm (Tabela 4) houve um aumento nas faixas de VE em relação a VC nos teores de Ca nos pontos 2,3,4,5,6 e 8, de Mg no ponto 2, e de K nos pontos 1,3,4,5.

TABELA 3 - ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO PARA A PROFUNDIDADE DE 0-20 CM. CÉLULAS EM VERDE INDICAM AUMENTO DOS VALORES E CÉLULAS AMARELAS INDICAM REDUÇÃO.

Ponto	pH		AI	cmolc dm <sup>-3</sup>					CTC <sup>(t)</sup>	CTC <sup>pH7</sup>	C	N	C/N	m%	V%
	CaCl2	SMP		H+Al	Ca	Mg	K	P							
1VC	3,88 b	6,15 a	1,06 b	4,45 b	0,66 a	0,10 a	0,03 b	3,33 a	1,86 b	5,25 b	12,50 b	0,85 b	14,60 b	57,20 b	15,20 a
1VE	4,03 a	5,17 b	2,5 a	9,32 a	0,72 a	0,10 a	0,04 a	4,95 a	3,37 a	10,20 a	55,40 a	2,39 a	23,30 a	73,30 a	8,77 b
2VC	4,01 a	5,66 a	1,56 b	6,72 a	0,75 a	0,10 a	0,03 a	4,75 a	2,45 a	7,61 a	16,30 b	1,06 b	15,20 b	63,40 a	12,00 a
2VE	3,85 a	5,27 a	2,20 a	8,82 a	0,82 a	0,12 a	0,03 a	6,76 a	3,18 b	9,81 a	35,20 a	1,84 a	19,20 a	69,00 a	10,20 b
3VC	4,13 a	5,84 a	1,24 a	5,60 a	0,82 b	0,12 b	0,03 a	3,37 a	2,22 b	6,57 b	19,00 b	1,25 a	15,20 b	55,00 a	14,80 a
3VE	4,13 a	5,21 b	2,08 a	11,80 a	1,28 a	0,15 a	0,09 a	8,42 a	3,62 a	13,30 a	45,00 a	2,09 a	21,70 a	57,00 a	12,90 a
4VC	3,71 a	6,15 a	1,10 b	4,65 b	0,81 b	0,11 b	0,02 b	3,11 a	2,08 b	5,64 b	17,80 a	1,10 b	15,30 a	51,20 a	17,90 a
4VE	3,71 a	4,98 b	1,99 a	10,80 a	1,11 a	0,13 a	0,04 a	3,93 a	3,28 a	12,10 a	29,90 a	1,65 a	18,00 a	60,40 a	10,90 b
5VC	4,08 a	5,71 a	1,19 a	6,13 a	0,93 b	0,11 a	0,03 a	4,14 b	2,27 a	7,20 a	23,50 a	1,44 a	16,30 a	49,90 a	15,00 a
5VE	4,02 a	5,75 a	1,55 a	6,03 b	1,18 a	0,12 a	0,02 a	6,72 a	2,88 a	7,35 a	22,50 a	1,31 a	17,10 a	53,20 a	18,60 a
6VC	4,10 a	4,65 a	1,60 b	6,05 b	0,94 b	0,12 a	0,03 a	2,58 b	2,71 b	7,16 b	17,00 b	1,04 b	16,10 b	58,00 b	16,10 a
6VE	3,80 b	4,65 a	3,62 a	13,80 a	1,18 a	0,17 a	0,04 a	7,63 a	5,02 a	15,20 a	58,70 a	2,71 a	22,00 a	70,90 a	9,48 b
7VC	4,15 a	4,79 a	3,34 a	12,70 a	0,93 b	0,15 a	0,06 a	7,67 a	4,50 a	13,80 a	44,70 a	2,19 a	20,40 a	74,20 a	8,44 a
7VE	4,18 a	4,98 a	2,63 a	10,80 a	1,21 a	0,14 a	0,06 a	6,43 a	4,05 a	12,20 a	56,70 a	2,77 a	20,20 a	63,90 b	11,80 b
8VC	4,21 a	5,51 a	1,71 a	7,25 b	0,93 b	0,12 b	0,03 b	3,47 b	2,79 b	8,33 b	24,60 b	1,48 a	16,50 b	61,00 a	13,00 a
8VE	3,94 b	4,88 b	2,45 a	11,80 a	1,21 a	0,14 a	0,04 a	11,40 a	3,85 a	13,20 a	33,00 a	1,63 a	20,20 a	62,50 a	10,80 a
9VC	4,08 a	5,76 a	1,44 b	5,90 b	1,01 a	0,11 a	0,03 a	6,72 a	2,61 b	7,06 b	12,20 b	0,84 b	14,60 b	55,10 b	16,50 a
9VE	3,91 b	5,12 b	2,31 a	9,78 a	0,93 b	0,11 a	0,03 a	9,25 a	3,40 a	10,90 a	30,20 a	1,67 a	17,90 a	67,90 a	10,10 b
<b>MÉDIA VC</b>	4,04 a	5,58 a	1,58 b	6,60 b	0,86 b	0,11 a	0,03 a	4,34 b	2,60 b	7,62 b	20,84 a	1,24 b	16,03 b	58,33 a	14,32 a
<b>MÉDIA VE</b>	3,95 b	5,11 b	2,37 a	10,31 a	1,07 a	0,13 a	0,04 a	7,27 a	3,62 a	11,58 a	40,71 a	2,00 a	19,96 a	64,21 a	11,48 a

Médias com p-valor > que 0,05 não diferem estatisticamente à nível de confiança de 95% (Teste T-Student).

FONTE: A autora (2024).

TABELA 4 - ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO PARA A PROFUNDIDADE DE 20-40 CM. CÉLULAS EM VERDE INDICAM AUMENTO DOS VALORES E CÉLULAS AMARELAS INDICAM REDUÇÃO.

Ponto	pH	pH	AI	H+AI	Ca	Mg	K	P	CTC <sub>(t)</sub>	CTC <sub>pH7</sub>	C	N	C/N	m%	V%
	CaCl <sub>2</sub>	SMP	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>									g kg <sup>-1</sup>			%
1VC	4,13 a	6,58 a	0,61 b	3,00 b	0,74 a	0,13 a	0,02 b	3,50 a	1,50 b	3,89 b	6,99 b	0,73 b	9,61 b	40,30 b	22,90 b
1VE	4,12 a	6,00 b	1,21 a	5,15 a	0,77 a	0,11 a	0,03 a	3,88 a	2,12 a	6,06 a	19,40 a	1,06 a	18,20 a	56,60 a	15,60 a
2VC	4,14 a	6,43 a	0,81 a	3,63 a	0,77 b	0,09 b	0,02 a	2,85 a	1,69 b	4,51 b	8,50 a	0,73 a	11,70 b	47,70 a	19,60 a
2VE	4,18 a	6,11 a	1,06 a	4,70 a	0,93 a	0,13 a	0,02 a	4,08 a	2,15 a	5,79 a	14,30 a	0,92 a	15,20 a	48,80 a	19,40 a
3VC	4,31 a	6,40 a	0,52 b	3,70 a	0,81 b	0,10 a	0,02 b	2,94 a	1,45 b	4,63 a	11,50 a	0,96 a	12,00 a	35,60 a	20,30 a
3VE	4,08 a	6,23 a	0,82 a	4,25 a	1,07 a	0,11 a	0,03 a	2,76 a	2,04 a	5,47 a	13,50 a	0,96 a	14,10 a	39,60 a	22,70 a
4VC	4,25 a	6,43 a	0,62 b	3,60 b	0,89 b	0,12 a	0,02 b	3,10 a	1,66 b	4,64 b	12,80 b	0,88 b	14,10 b	37,00 b	22,70 a
4VE	4,07 b	5,84 b	1,26 a	5,72 a	1,15 a	0,12 a	0,03 a	2,98 a	2,56 a	7,03 a	21,90 a	1,25 a	17,40 a	49,00 a	19,20 a
5VC	4,25 a	6,22 a	0,71 b	4,35 a	0,93 b	0,12 a	0,02 b	3,94 a	1,78 b	5,43 a	13,00 a	1,01 a	12,90 a	39,40 a	20,90 a
5VE	4,27 a	6,44 a	0,94 a	3,65 a	1,14 a	0,12 a	0,02 a	4,92 a	2,22 a	4,93 a	13,90 a	0,91 a	15,00 a	42,00 a	26,20 a
6VC	4,00 a	5,93 a	1,03 b	5,38 a	0,93 b	0,11 a	0,02 a	3,50 b	2,10 b	6,45 a	10,50 b	0,76 b	13,50 b	48,20 a	17,50 a
6VE	4,00 a	5,50 a	1,43 a	7,30 a	1,20 a	0,12 a	0,03 a	4,78 a	2,79 a	8,66 a	27,30 a	1,41 a	19,30 a	51,30 a	15,90 a
7VC	4,30 a	5,11 a	2,32 a	9,70 a	0,92 a	0,15 a	0,04 a	6,05 a	3,44 a	10,80 a	38,90 a	1,93 b	20,10 a	67,50 a	10,30 a
7VE	4,41 a	5,25 a	1,85 b	8,90 a	1,12 a	0,12 a	0,04 a	4,47 a	3,13 a	10,20 a	44,60 a	2,37 a	18,80 a	59,40 a	12,70 a
8VC	4,23 a	5,90 a	1,38 a	5,53 b	0,95 b	0,10 a	0,02 a	4,39 a	2,46 a	6,60 b	14,70 a	0,98 a	15,00 b	55,30 a	16,40 a
8VE	4,17 a	5,55 b	1,60 a	7,00 a	1,26 a	0,14 a	0,02 a	3,71 a	3,02 a	8,42 a	17,40 a	1,02 a	17,20 a	52,40 a	17,00 a
9VC	4,22 a	6,33 a	0,83 b	3,92 b	0,92 a	0,10 a	0,02 a	5,09 a	1,88 b	4,98 b	6,32 b	0,57 b	11,00 b	43,90 a	21,30 a
9VE	4,09 b	5,77 b	1,27 a	5,90 a	1,12 a	0,11 a	0,03 a	3,80 a	2,54 a	7,17 a	18,40 a	1,19 a	15,50 a	50,20 a	17,70 a
<b>MÉDIA VC</b>	4,20 a	6,14 a	0,98 a	4,8 a	0,87 a	0,11 a	0,02 a	3,93 a	1,99 a	5,77 b	13,68 a	0,95 a	13,33 b	46,09 a	19,09 a
<b>MÉDIA VE</b>	4,15 a	6,13 a	0,99 a	4,75 a	0,87 a	0,11 a	0,02 a	3,97 a	2,01 a	5,82 a	13,89 a	0,96 a	13,44 a	46,30 a	19,00 a

Médias com p-valor > que 0,05 não diferem estatisticamente á nível de confiança de 95% (Teste T-Student).

FONTE: A autora (2024).

Ao comparar as médias entre as áreas VC e VE do mesmo ponto, ficam destacados os pontos 1, 4 e 8, onde houve um incremento de vários atributos químicos do solo para a camada de 0-20 cm. Contudo, para o ponto 1 o destaque foi o aumento de Al e H+Al da área VC para VE, enquanto para os pontos 4 e 8 houve aumento significativo das bases trocáveis.

O carbono total ( $C_{ot}$ ) foi cerca de 100% mais elevado na faixa VE em comparação a VC na camada de 0-20 cm e cerca de 50 % na camada de 20-40 cm (Tabela 4). Com exceção dos pontos 4, 5 e 7, foi observado um aumento significativo de C de VC para VE e que no geral foi acompanhado pelo aumento da CTC efetiva, da CTC potencial e m% (Tabela 3). Houve um acréscimo ao nitrogênio total ( $N_{tot}$ ) nos pontos 1,4,6 e 9 nas faixas VE em 0-20 cm, e nos pontos 1,4,6,7 e 9 na profundidade de 20-40 cm.

As médias de P foram maiores nas faixas VE quando comparadas com as áreas VC, o mesmo não sendo observado para a profundidade de 20-40 cm (Tabela 4). Os aumentos do Al e (H + Al) refletiram em maiores CTC efetiva e CTC a pH 7 obtidas nos pontos 1,3,4,6,8 e 9 nas faixas VE comparado com VC, na profundidade de 0-20 cm. Em 20-40 a CTC (t) foi relativamente maior nos pontos 1,2,3,4,5,6 e 9 nas faixas VE comparativamente com VC, já a CTC a pH 7 apresentou um aumento nos pontos 1,2,4,8 e 9 nas faixas VE.

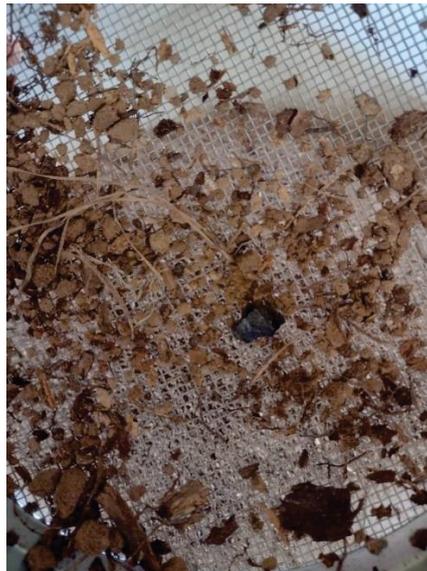
Durante a coleta foi constatado na faixa de VE a presença de enleiramento de resíduos de pinus em alguns pontos, em diferentes estágios de decomposição (Figura 4). Foi observado também durante o manuseio das amostras de liteira e solo das faixas VE a ocorrência de grande quantidade de carvão de possível queima das leiras (Figura 5). Logo, as faixas VE podem estar relacionadas a presença de enleiramento dos resíduos durante o corte raso ou enleiramento seguido de queima pela ocorrência de carvão.

FIGURA 4 - COLETA DA SERAPILHEIRA/ FRAÇÃO FINA DA LEIRA



FONTE: A autora (2024).

FIGURA 5 - CARVÃO ENCONTRADO EM AMOSTRAS DE SOLO



FONTE: A autora (2024).

A presença de fragmentos de carvão associada a maior massa de serrapilheira promoveram o escurecimento de algumas amostras de solo, como é possível observar na Tabela 5. O escurecimento é marcante para os pontos 3, 6, 7 e 8 onde, segundo a descrição de cor na cartela de Munsell, o valor para as amostras ficou menor, indicando maior proporção de preto na pigmentação da amostra. Especialmente os pontos 6 e 7 tiveram a cor descrita como preto (7,5YR 2,5/1 e 7,5YR 2,5/3, respectivamente). Nos demais pontos amostrais, não foi observado mudança de coloração entre as áreas VC e VE.

TABELA 5 - COLORAÇÕES ATRIBUÍDAS AO SOLO DAS ÁREAS DE AMOSTRAGEM NO PLANTIO DE PINUS TAEDA L.- PIRAÍ DO SUL- PR

Ponto	VE – Cor (Munsell)	VC – Cor (Munsell)
1	7,5 YR 4/4 (Bruno)	7,5YR 5/4 (Bruno)
2	7,5YR 4/2 (Bruno)	7,5YR 4/4 (Bruno)
3	5YR 3/3 (Bruno avermelhado escuro)	5YR 4/3 (Bruno avermelhado)
4	5YR 4/4 (Bruno avermelhado)	7,5YR 4/4 (Bruno)
5	5YR 4/3 (Bruno avermelhado)	5YR 4/3 (Bruno avermelhado)
6	7,5YR 3/4 (Bruno escuro)	7,5YR 5/4 (Bruno)
7	7,5YR 2,5/1 (Preto)	5YR 3/1 (Bruno avermelhado escuro)
8	7,5YR 2,5/3 (Preto)	5YR 3/1 (Bruno avermelhado escuro)
9	7,5YR 3/4 (Bruno escuro)	7,5YR 3/4 (Bruno escuro)

FONTE: A autora (2024).

Como era esperado as faixas VE apresentaram crescimento muito superior as áreas VC, para todos os parâmetros avaliados como altura, diâmetro e volume, apresentando os seguintes valores médios e variação: VE - DAP - 20,1 cm (16,0 a 22,6 cm); altura - 15,1 m (13,7 a 17,3 m); volume – 172,15 m<sup>3</sup> ( 116,6 a 233,24 m<sup>3</sup> ); VC - DAP - 13,7 cm (5,6 a 23,3 cm), altura - 9,14 m (8,33 e 13,7 m), volume 56,46 m<sup>3</sup> (8,33 e 163,27 m<sup>3</sup>) (Tabela 6).

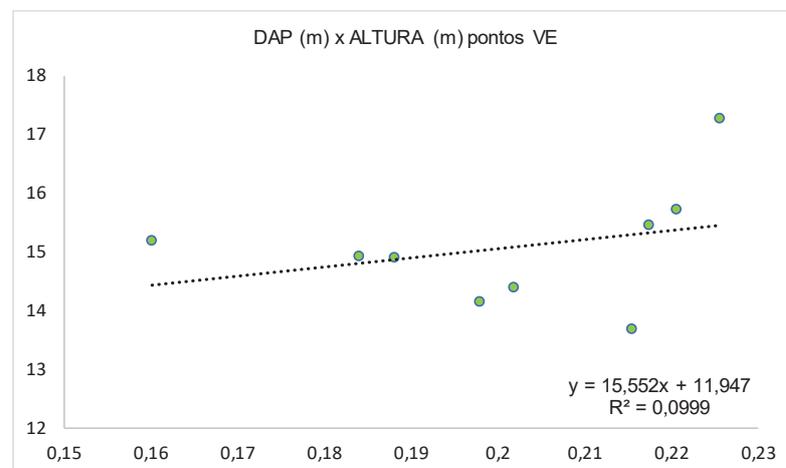
TABELA 6 - DADOS DENDROMÉTRICOS DO PINUS TAEDA L. EM VE E VC

Pontos	VC			VE		
	DAP cm	Altura m	Volume m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	DAP cm	Altura m	Volume m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>
1	11,68	10,01	44,98	18,40	14,92	149,94
2	13,27	9,16	44,98	19,80	14,15	149,94
3	15,37	9,25	56,64	18,81	14,90	149,94
4	13,53	9,75	53,31	21,55	13,69	166,60
5	13,46	8,33	46,64	21,74	15,46	199,92
6	11,05	6,38	23,32	20,18	14,39	166,60
7	23,33	10,98	163,27	22,57	17,28	233,24
8	16,01	8,68	66,64	22,06	15,72	216,58
9	5,59	9,76	8,33	16,01	15,18	116,62
<b>Média</b>	13,70	9,14	56,46	20,12	15,08	172,15
<b>DP</b>	4,44	1,22	41,22	2,00	0,99	35,12

FONTE: A autora (2024).

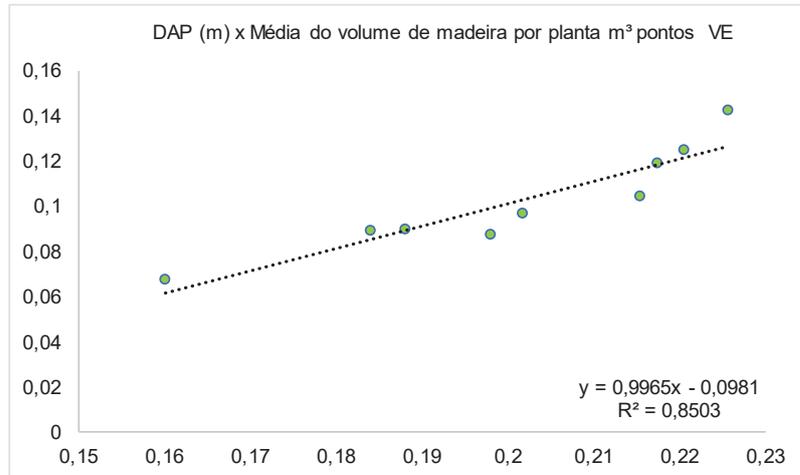
A regressão linear entre o DAP (diâmetro a altura do peito) e altura em VC apresentou  $R^2= 0,13$  (Figura 8). Nas faixas VE a relação entre o DAP e a altura apresentou  $R^2= 0,10$  (Figura 6) ou seja, uma correlação muito baixa, quase nula. Relacionando a tendência dos resultados obtidos quanto ao volume médio por planta e o DAP, é possível observar uma correlação positiva entre as duas variáveis. Nas áreas VC foi obtido um  $R^2$  de 0,89 (Figura 9). Nas faixas VE o  $R^2$  foi de 0,85 (Figura 7).

FIGURA 6 - CORRELAÇÃO ENTRE DAP (m) E ALTURA (m) PONTOS VERDE ESCUROS



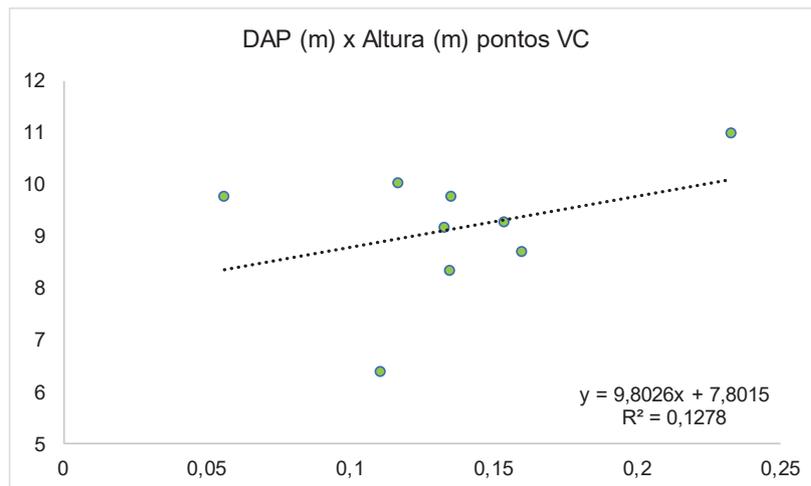
FONTE: A autora (2024).

FIGURA 7 - CORRELAÇÃO ENTRE DAP (m) E MÉDIA DO VOLUME DE MADEIRA POR PLANTA (m<sup>3</sup>) PONTOS VERDE ESCUROS



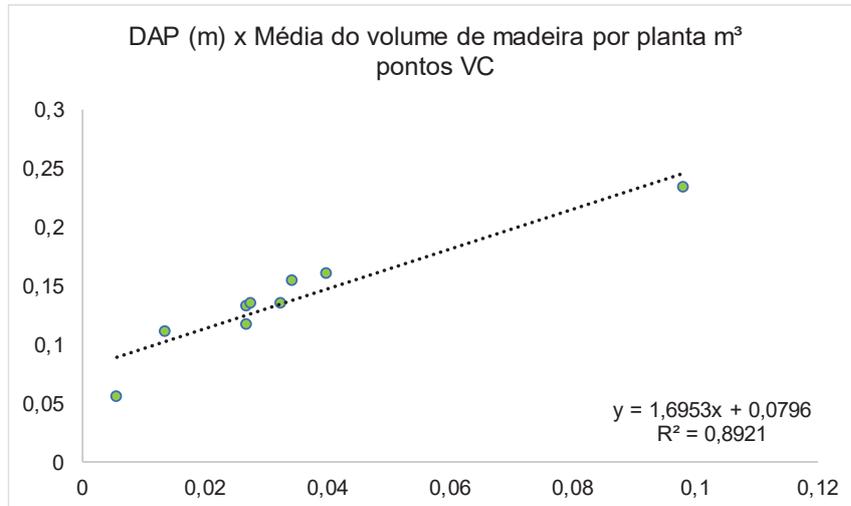
FONTE: A autora (2024).

FIGURA 8 - CORRELAÇÃO ENTRE DAP (m) E ALTURA (m) PONTOS DAS ÁREAS VERDE CLARAS



FONTE: A autora (2024).

FIGURA 9 - CORRELAÇÃO ENTRE DAP (m) E MÉDIA DO VOLUME DE MADEIRA POR PLANTA (m<sup>3</sup>) PONTOS ÁREAS VERDE CLARAS

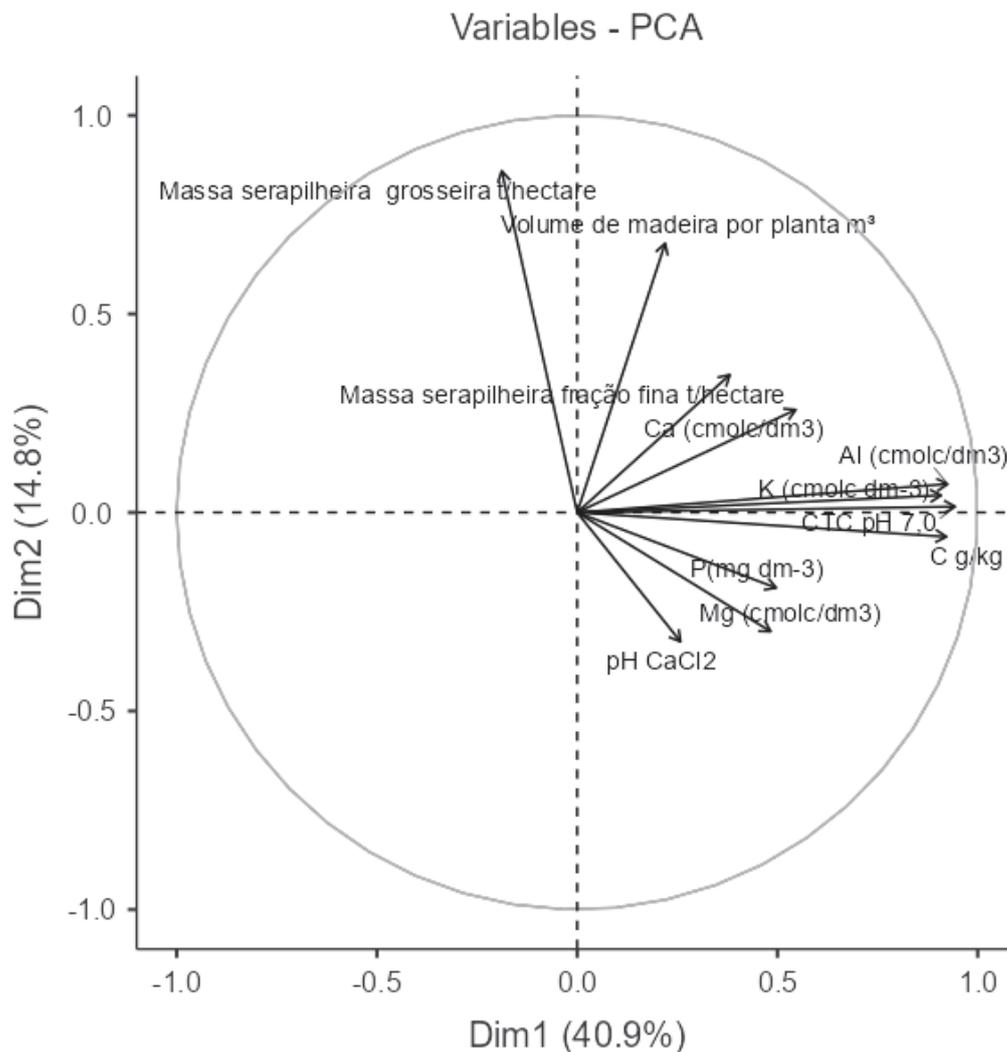


FONTE: A autora (2024).

A partir do mapa perceptual, pode-se notar que o primeiro componente explica 40,9 % da variabilidade dos dados, enquanto que o segundo explica 14 %. Pode-se considerar que o mapa perceptual bidimensional apresentado está adequado para avaliar as relações entre as variáveis, uma vez que explica grande parte da variabilidade dos dados, geralmente se busca uma explicação maior que 50% nos dois primeiros componentes.

Pode-se verificar que os elementos serrapilheira fina e volume de madeira por planta (m<sup>3</sup>), são correlacionados positivamente entre si, assim como o Ca, Al e K também são. Ao mesmo tempo, pode-se observar que esses elementos são negativamente correlacionados com o magnésio, fósforo e pH CaCl<sub>2</sub>.

FIGURA 10 - PLOTAGEM DOS EIXOS 1 E 2 DAS ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP) DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E DADOS DENDROMÉTRICOS.



FONTE: A autora (2024).

## 2.6 DISCUSSÃO

O acúmulo de resíduos foi a força maior das mudanças observadas no solo. A prática de acúmulo de resíduos ou enleiramento é prática comum de quando há abertura das áreas (Zucon et al., 2019). No caso do estudo em questão a área tinha como vegetação original campo nativo, indicando que a os resíduos provavelmente tenham sua origem do corte raso. Corroborando com ocorrência de enleiramento, constatou-se um grande aumento no teor de C (carbono) nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, certamente devido a deposição de um grande volume de resíduo na superfície

do solo. Aumento do carbono em função do acúmulo de resíduo também foi observado por (Tutua et al., 2019). Contudo, o acúmulo na camada inferior nem sempre ocorre como foi observado por Mafra et al. (2008). O acúmulo na camada inferior pode estar relacionado como aumento na atividade biológica e consequente incorporação biológica pela atividade de macroorganismo a médio e longo prazo.

Elevada atividade biológica em sítio de pinus foi observada e indicada por colocação de 1 mm ano<sup>-1</sup> de solo na superfície do solo florestal (Quadros et al., 2021). Contudo, essa prática de manejo pode indicar que ocorreu decréscimo de produtividade na área onde foi retirado o resíduo, como foi mostrado por Gatiboni et al. (2020). A relação C/N (carbono nitrogênio) reforça o processo de enleiramento, uma vez que maiores valores de C/N na faixa VE indica a presença de resíduos não decompostos ou em processo de decomposição (Kirkby et al., 2011).

Os valores de relação C/N são bastantes estáveis na fração humificada como demonstraram Kirkby et al. (2011), Cleveland & Liptzin (2007) com valores entre 10/1 a 12/1. Ainda, altos valores na relação C/N vêm sendo reportados com ocorrência de quantidade expressiva de carvão oriundo da queima de biomassa assim como observado em solos de terra preta de índio, visto que a metodologia de combustão contabiliza o C orgânico e C na forma de carvão (Moreira, 2007).

O aumento da C<sub>ot</sub> resultou em aumento das cargas do solo, visto pelo aumento da CTC efetiva e CTC a pH 7. Tal fato pode ser explicado uma vez que a matéria orgânica tem CTC dezenas de vezes maiores que a das argilas predominantes em solos tropicais altamente intemperizados (Pavan et al., 1985; Stutz & Lang, 2023) sendo particularmente mais expressivo em solos arenosos. Contudo, aumento na CTC efetiva era esperado, no entanto contraria os resultados obtidos por Lopes e Cox (1977) no levantamento de solos do Cerrado brasileiro, uma vez que a MO em baixo pH apresentou baixa capacidade de formação de cargas.

Deve-se considerar ainda o aumento na CTC efetiva e CTC a pH 7 com cautela, uma vez que os acréscimos obtidos são resultantes do aumento de Al<sup>3+</sup> e (H + Al), respectivamente, e pequenos aumentos para Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, e Mg<sup>2+</sup> resultando em maiores valores de m % e menores de V %. Contudo, *Pinus taeda* L. são árvores adaptadas a elevada acidez (Pavinato et al., 2019), o que garante elevado crescimento em solos muitos ácidos do sul do Brasil. Ainda, o aumento do Al trocável ocorreu mesmo com aumento expressivo da matéria orgânica contrariando o observado por Thomas. (1975). Logo, grande aumento na CTC com pequenos aumentos na acidez do solo

são os responsáveis pelo aumento do Al trocável e saturação de Al nos pontos de troca.

Contrariando o esperado, o enleiramento de resíduos resultou em um pequeno decréscimo do pH, mas tem sido observado que adição de resíduos de culturas podem levar a aumento no pH do solo como no estudo de Quadros et al. (2021). Contudo os aumentos estão relacionados com quantidades de base do resíduo e resíduo de pinus é particularmente pobre em bases entre as espécies florestais (Berg. 2000; Berg et al., 2017). Ainda, os componentes do lenho, casca, galhos e acículas são mais pobres em solo de baixa fertilidade (Pereira et al., 2023). Isto também pode explicar o pequeno aumento nas bases nas áreas da leira. Deve-se considerar ainda o aumento da absorção dos nutrientes nas áreas da leira com maior crescimento das plantas, principalmente para o K uma vez que a base apresenta baixa disponibilidade no solo (Marschner. 2012).

Maiores valores de Ca trocável na faixa VE passam a ser importantes em função da adição do resíduo e retirada das demais áreas. Retirada de resíduos tem sido reportado como fator de diminuição dos níveis dos elementos no solo (Gatiboni et al., 2020). Além de ser encontrado em maior quantidade em tecidos lenhosos o Ca é mais fortemente retido no solo tendendo a ser mantido no solo em comparação ao Mg e K (Bloss. 1994; Demate. 2011), sendo um dos motivos da elevação. Houve aumento na disponibilidade de P, devido ao efeito residual em decorrência do material depositado. O P é um elemento que apresenta resposta quando utilizado no cultivo de Pinus no Brasil e em outros países. (Gatiboni et al., 2020; Gent et al., 1986; Carlson et al., 2014).

O pequeno quase nulo acréscimo de Mg é um fator preocupante uma vez que os níveis observados no solo são muito baixos (Pavinato et al., 2019), visto que a ocorrência de deficiência de Mg vem sendo observada em larga escala (Beets & Jokela, 1994; Meiwes, 1995; Ende & Evers; 1997; Sun & Payn, 1999; Mitchell et al., 2003; Cakmak & Yazici, 2010; Zhu et al., 2016; Chaudhry et al., 2021; Xie et al., 2021). Como indicado anteriormente pode parte dos nutrientes encontrados nos resíduos terem sido absorvidos pelas raízes antes de atingir o solo uma vez que foi encontrado raízes nas frações grossas da liteira (Figura 11). Essa elevada capacidade de exploração das raízes nos tocos e liteira (Sucre e Fox, 2009) e mesmo em planta morta foi reportado recentemente (Consalter et al., 2023).

FIGURA 11 - RAIZES PRESENTES NAS AMOSTRAS DE SERAPILHEIRA



FONTE: A autora (2024).

Elevados aumentos em termos de volume como aqui observado, mais 2 vezes, tem sido observados em solos arenosos de muito baixa fertilidade na região com uso de resíduos orgânicos (Pereira et al., 2023; Rodriguez et al., 2018).

Aumento desta magnitude só são obtidos quando há correção dos elementos limitantes em solo de muito baixa fertilidade, que induz muito baixo crescimento. O baixo crescimento médio em altura (9,14 m) é confirmado quando comparado a altura de sítios de qualidade V (8,82 a 12,13 m) estabelecido por Scolforo e Machado (1988). O baixo crescimento é ainda mais expressivo quando comparado aos sítios de qualidade V de 12,23 a 14,50 m em estudos recentes (Schuchovski et al., 2019). Mesmo com aumento expressivo na produtividade na altura a classe de qualidade de sitio foi de IV com valores 13,67 a 15,81 m e 12,13 a 15,44 m estabelecido por Schuchovski et al. (2019) e Scolforo e Machado (1988), respectivamente. Ou seja, muito abaixo do potencial no sul do Brasil indicando correção incompleta das carências nutricionais. Isto pode ser visto pelos baixos valores de Mg e K no solo de acordo com Pavinato et al. (2019), sendo estes elementos importantes ao crescimento das plantas na região (Motta et al. 2014). O crescimento para *Pinus taeda* L. é menor que o observado para idade de 10 anos por Dobner Jr. (2012) obtidos na região de

Campo Belo do Sul, com diâmetros de 30 e 35,6 cm e alturas entre 15,1 e 21,1 m respectivamente.

Aumento do crescimento da floresta em função do acúmulo de resíduo vem sendo reportado em diferentes espécies como eucaliptos (Reissmann et al., 1991) e *Pinus taeda* L. (Zucon et al., 2022). Estudos recentes indicam que resíduos orgânicos tem maior capacidade de aumento de crescimento do *Pinus taeda* L., por proporcionar adição de multi elementos (Rodrigues et al., 2023). Aumento de P e Ca quando do uso de resíduos permitiram grande acréscimo na produtividade do pinus em solos arenosos na mesma região confirmando ao observado em nosso estudo (Pereira et al., 2023; Rodrigues et al., 2023).

Os resultados de correlações entre o DAP e a altura e o DAP e o volume contrariam os resultados obtidos por Yang et al. 2013 em um estudo em que foram estimados para 255 famílias de *Pinus taeda*. correlações entre características dendrométricas de herdabilidade de árvores em plantios de 1,2,3, 5,11 e 15 anos, a correlação entre DAP e altura em ambas as idades foi fortemente positiva, diminuindo conforme o aumento da idade, indicando que o crescimento em altura atinge seu máximo antes do crescimento em diâmetro. Os resultados obtidos corroboram com o estudo realizado por Júnior et al. (2021) que obteve correlações altas e positivas entre o volume de madeira e o DAP entre árvores de 6, 10 e 20 anos, em plantas clonais de *Pinus taeda*.

Estudos apontam que a relação entre a altura e o diâmetro da árvore é a base para explicar a arquitetura das árvores, crescimento rendimento e estimar a biomassa da floresta. (Chave et al.,2005; Zhang et al., 2019; Barbosa et al., 2019). As limitações de qualidade do sítio explicam as baixas correlações obtidas entre DAP e a altura do *Pinus taeda* L. estudado.

### **3 CONCLUSÕES**

O manejo de resíduos através do enleiramento gerou um acúmulo de resíduos de colheita concentrado em linhas do plantio (VE). Nas serapilheiras em diferentes estágios de decomposição presentes nas leiras também foram evidenciados resíduos de queimada da vegetação anterior ao plantio, o que explicou elevados teores de carbono no solo.

O acúmulo de resíduos de colheita com carvão nas camadas do solo proporcionou o aumento da CTC a pH 7,0, do C e na disponibilidade de Ca, Mg, P, K, devido ao fato da área possuir solos derivados de material de origem com pouca reserva de nutrientes, o que resultou em maior crescimento em diâmetro e volume do *Pinus taeda* L. plantados nas leiras (VE), acarretando o aumento considerável de produtividade de madeira, na ordem de 200% em relação as áreas VC.

### **4 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Sugere-se que os resíduos sejam caracterizados quimicamente para determinação de quantidades de nutrientes disponibilizados para o solo, ainda também é recomendável técnicas de distribuição de resíduos de maneira homogênea ao decorrer do talhão evitando acúmulo em faixas, para que haja uniformidade na produtividade.

## 5 REFERÊNCIAS

ÁGUAS PARANÁ - Instituto das Águas do Paraná. Dados de precipitação mensal do município de Piraí do Sul – PR. 2023.

Alcantara, G. B. D., Ribas, L. L. F., Higa, A. R., Ribas, K. C. Z., & Koehler, H. S. (2007). Efeito da idade da muda e da estação do ano no enraizamento de miniestacas de *Pinus taeda* L. *Revista Árvore*, 31, 399-404.

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische zeitschrift*, 22(6), 711-728.

Andrade, T.C.G.R., Bacha, A.L., Camargo, M.B., Carvalho, L.B., 2021. Influence of phosphorus fertilization on the response of pinus genotypes to glyphosate subdoses. *New Forests* 2021 53:1 53, 143–160. <https://doi.org/10.1007/S11056-021-09849-Y>.

Aspinwall, M.J., King, J.S., McKeand, S.E., Bullock, B.P., 2011. Genetic effects on standlevel uniformity and above- and belowground dry mass production in juvenile loblolly pine. *For Ecol Manage* 262, 609–619. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.04.029>.

Balbinot, R., Schumacher, M. V., Watzlawick, L. F., & Sanquetta, C. R. (2003). Inventário do carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. *RECEN-Revista Ciências Exatas e Naturais*, 5(1), 59-68.

Barbosa, R. I., Ramirez-Narvaez, P. N., Fearnside, P. M., Villacorta, C. D. A., & Carvalho, L. C. D. S. (2019). Allometric models to estimate tree height in northern Amazonian ecotone forests. *Acta Amazonica*, 49, 81-90.

Batista, A. H., Motta, A. C. V., Reissmann, C. B., Schneider, T., Martins, I. L., & Hashimoto, M. (2015). Liming and fertilization in *Pinus taeda* plantations with severe nutrient deficiency in savanna soils. *Acta Scientiarum Agronomy*, Maringá, 37(1), 117-125. <https://doi.org/10.4025/actasciagrov37i1.18061>

Beets, P. N., & Jokela, E. J. (1994). Upper mid-crown yellowing in *Pinus radiata*: some genetic and nutritional aspects associated with its occurrence. *New Zealand Journal of Forestry Science*, [s. l.], 24(1), 35-50.

Berg B. (2000) Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management* 133:13-22. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00294-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00294-7)

Berg B., Johansson M., Liu C., Fauri M., Sanborn P., Vesterdal L., Ni X., Hansen K., Ukonmaanaho L. (2017) Calcium in decomposing foliar litter – A synthesis for boreal and temperate coniferous forests. *Forest Ecology and Management* 403:137-144. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.08.022>

Blackburn, G. A. (2002). Remote sensing of forest pigments using airborne imaging spectrometer and LIDAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 82(2-3), 311-321.

Bloss, F. D. (1994). Crystallography and crystal chemistry: an introduction. (No Title).  
Cakmak I, Marschner H (1992) Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves. *Plant Physiol* 98(4):1222–1227. <https://doi.org/10.1104/pp.98.4.1222>

Cakmak, I., & Marschner, H. (1992). Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves. *Plant physiology*, [s. l.], 98(4), 1222-1227. <https://doi.org/10.1104/pp.98.4.1222>

Cakmak I, Yazici AM (2010) Magnesium: a forgotten element in crop production. *Better Crops* 94(2):23–25

Carlson, C. A., Fox, T. R., Allen, H. L., Albaugh, T. J., Rubilar, R. A., & Stape, J. L. (2014). Growth responses of loblolly pine in the Southeast United States to midrotation applications of nitrogen, phosphorus, potassium, and micronutrients. *Forest Science*, 60(1), 157-169.

Carter, R. E. I. D. (1992). Diagnosis and interpretation of forest stand nutrient status. *Forest fertilization: sustaining and improving nutrition and growth of western forests. College of Forest Resources Contribution*, 73, 90-97.

Chaudhry, A. H., Nayab, S., Hussain, S. B., Ali, M., & Pan, Z. (2021). Current understandings on magnesium deficiency and future outlooks for sustainable agriculture. *International Journal of Molecular Sciences*, [s. l.], 22(4), 2-18. <https://doi.org/10.3390/ijms22041819>.

Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., ... & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145, 87-99.

Cleveland, C. C., & Liptzin, D. (2007). C: N: P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass?. *Biogeochemistry*, 85, 235-252.

Consalter, R., Barbosa, J.Z., Prior, S., Vezzani, F.M., Bassaco, M.V.M., Pedreira, G.Q., Motta, A.C.V., (2021). Mid-rotation fertilization and liming effects on nutrient dynamics of *Pinus taeda* L. in subtropical Brazil. *European Journal of Forest Research* 140, 19–35. <https://doi.org/10.1007/S10342-020-01305-4/FIGURES/5>.

Consalter, R., Motta, A. C. V., Barbosa, J. Z., Vezzani, F. M., Pons, R. R., Prior, S. A., & Bassaco, M. V. M. (2023). Pine root exploration of standing dead tree trunks: a short-cut biocycling process. *Forest systems*, 32(2), 9.

Consalter, R., Motta, A.C.V., Barbosa, J.Z., Vezzani, F.M., Rubilar, R.A., Prior, S.A., Nisgoski, S., Bassaco, M.V.M., 2021. Fertilization of *Pinus taeda* L. on an acidic oxisol in southern Brazil: growth, litter accumulation, and root exploration. *European Journal of Forest Research* 140, 1095–1112. <https://doi.org/10.1007/S10342-021-01390-Z/TABLES/7>.

Curran, P. J. (1989). Remote sensing of foliar chemistry. *Remote sensing of environment*, 30(3), 271-278.

CW, R. (1967). Recognition and mapping of site types for afforestation.

Demattê, J. L. I. (2011). Ação do gesso e do calcário na relação cálcio: magnésio do solo e na produtividade da cana-de-açúcar. *Inform Agron*, 136, 11-16.

Dobner Júnior, M., Higa, A. R., & Urbano, E. (2012). Determination of thinning optimum age and intensity in a *Eucalyptus dunnii* stand. *Floresta*, 42(3), 485-494.

Egnell, G. (2011). Is the productivity decline in Norway spruce following whole-tree harvesting in the final felling in boreal Sweden permanent or temporary?. *Forest Ecology and Management*, 261(1), 148-153.

Embrapa – Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. (2017). *Manual de Métodos de Análise de Solo*. Brasília: Embrapa.

Embrapa – Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília: Embrapa.

Ende, H. P., & Evers, F. H. (1997). Visual magnesium deficiency symptoms (coniferous, deciduous trees) and threshold values (foliar, soil). In Hüttl, R. F., Schaaf, W. *Magnesium Deficiency in Forest Ecosystems*, Dordrecht: Springer. pp. 3-22.

FAO, 2020. Global Forest Resources Assessment, Global Forest Resources Assessment. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca8753en>.

Forrester, D. I., Benneter, A., Bouriaud, O., & Bauhus, J. (2017). Diversity and competition influence tree allometric relationships—Developing functions for mixed - species forests. *Journal of Ecology*, 105(3), 761-774.

Fortin, M., Van Couwenberghe, R., Perez, V., & Piedallu, C. (2019). Evidence of climate effects on the height-diameter relationships of tree species. *Annals of Forest Science*, 76, 1-20.

Gatiboni, L. C., Silva, W. C., Mumbach, G. L., Schmitt, D. E., Iochims, D. A., Stahl, J., & Vargas, C. O. (2020). Use of exchangeable and nonexchangeable forms of calcium,

magnesium, and potassium in soils without fertilization after successive cultivations with *Pinus taeda* in southern Brazil. *Journal of Soils and Sediments*, [s. l.], 20, 665-674. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02460-x>.

Gatiboni, L.C., Vargas, C.O., Albuquerque, J.A., et al., 2017. Phosphorus fractions in soil after successive crops of *Pinus taeda* L. without fertilization. *Ciência Rural* 47, 1–8. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160595>.

Gent, J. A., Allen, H. L., Campbell, R. G., & Wells, C. G. (1986). Magnitude, duration, and economic analysis of loblolly pine growth response following bedding and phosphorus fertilization. *Southern Journal of Applied Forestry*, 10(3), 124-128.

Goetz, A. F., Vane, G., Solomon, J. E., & Rock, B. N. (1985). Imaging spectrometry for earth remote sensing. *science*, 228(4704), 1147-1153.

Gonçalves, J. D. M., DEMATTÊ, J. L. I., & COUTO, H. D. (1990). Relações entre a produtividade de sítios florestais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* com as propriedades de alguns solos de textura arenosa e média no Estado de São Paulo. *IPEF, Piracicaba*, 43(44), 24-39.

Hakamada, R.E., Stape, J.L., Lemos, C.C.Z., Almeida, A.E.A., Silva, L.F., 2015. Uniformidade entre árvores durante uma rotação e sua relação com a produtividade em *Eucalyptus* clonais. *Cerne* 21, 465–472. <https://doi.org/10.1590/01047760201521031716>.

IBA, 2022. Relatório anual 2022.

INSTITUTO ÁGUA E TERRA – Geologia do Paraná- História evolutiva. <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Geologia-do-Parana-Historia-Evolutiva#:~:text=O%20Segundo%20Planalto%20constitui%20a,cretáceos%20no%20noroeste%20do%20Estado.>

Júnior, P. C. F., Ishibashi, V., de Matos, J. L. M., Martinez, D. T., & Higa, A. R. (2021). Feasibility of early *Pinus taeda* L. selection to assess growth variables in progeny test. *Floresta*, 51(4), 937-945.

Kirkby, C. A., Kirkegaard, J. A., Richardson, A. E., Wade, L. J., Blanchard, C., & Batten, G. (2011). Stable soil organic matter: a comparison of C: N: P: S ratios in Australian and other world soils. *Geoderma*, 163(3-4), 197-208.

Kirkby, C. A., Richardson, A. E., Wade, L. J., Batten, G. D., Blanchard, C., & Kirkegaard, J. A. (2013). Carbon-nutrient stoichiometry to increase soil carbon sequestration. *Soil Biology and Biochemistry*, 60, 77-86.

Kramer, R. (1998). *Chemometric techniques for quantitative analysis*. CRC Press.

Lines, E. R., Zavala, M. A., Purves, D. W., & Coomes, D. A. (2012). Predictable changes in aboveground allometry of trees along gradients of temperature, aridity and competition. *Global Ecology and Biogeography*, 21(10), 1017-1028.

Lopes, A. S., & Cox, F. R. (1977). A survey of the fertility status of surface soils under "Cerrado" vegetation in Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, 41(4), 742-747.

Mafra, Á. L., Guedes, S. D. F. F., Klauberg Filho, O., Santos, J. C. P., Almeida, J. A. D., & Rosa, J. D. (2008). Carbono orgânico e atributos químicos do solo em áreas florestais. *Revista Árvore*, 32, 217-224.

Marschner, H. (Ed.). (2011). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Academic press.

Mavimbela, L. Z., Crous, J. W., Morris, A. R., & Chirwa, P. W. (2018). The importance of harvest residue and fertiliser on productivity of *Pinus patula* across various sites in their first, second and third rotations, at Usutu Swaziland. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 48(1), 1-14.

Meiwes, K. J. (1995). Application of lime and wood ash to decrease acidification of forest soils. *Water, Air, and Soil Pollution*, [s. l.], 85(1), 143-152.

Mengel, K., Kirkby, E., 1982. Principles of Plant Nutrition, third ed. International Potash Institute, Bern, Switzerland, 655 pp

Mitchell, A. D., Loganathan, P., Payn, T. W., & Olykan, S. T. (2003). Magnesium and potassium fertilizer effects on foliar magnesium and potassium concentrations and upper mid-crown yellowing in *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science*, [s. l.], 33(2), 225-243.

Moreira, A. (2007). Fertilidade, matéria orgânica e substâncias húmicas em solos antropogênicos da Amazônia Ocidental. *Bragantia*, 66, 307-315.

Moriwaki, T., Falcioni, R., Tanaka, F.A.O., Cardoso, K.A.K., Souza, L.A., Benedito, E., Nanni, M.R., Bonato, C.M., Antunes, W.C., 2019. Nitrogen-improved photosynthesis quantum yield is driven by increased thylakoid density, enhancing green light absorption. *Plant Sci*. 278, 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.PLANTSCI.2018.10.012>

Moro, L., Gatiboni, L.C., Simonete, M.A., Cassol, P.C., Chaves, D.M., 2014. Resposta de pinus taeda com diferentes idades à adubação NPK no Planalto Sul Catarinense. *Rev Bras Cienc Solo* 38, 1181–1189. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400014>.

Motta, A. C. V., Barbosa, J. Z., Consalter, R., & Reissmann, C. B. (2014). Nutrição e adubação da cultura de Pinus. In Prado, R. M., Wadt, P. G. S. (Ed.). Nutrição e adubação de espécies florestais e palmeiras. Jaboticabal: FUNEP. pp. 383-426.

Pavan, M. A., Bingham, F. T., & Pratt, P. F. (1985). Chemical and mineralogical characteristics of selected acid soils of the State of Paraná, Brazil. *Turrialba*; 35 (2): 131-139.

Pavinato, P. S., Pauletti, V., Motta, A. C. V., & Moreira, A. (2019). Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná

Pereira, M., Bassaco, M. V. M., Motta, A. C. V., Maeda, S., Prior, S. A., Marques, R., ... & Gomes, J. B. V. (2023). Influence of industrial forest residue applications on *Pinus taeda*: Soil, litter, growth, nutrition, and wood quality characteristics. *New Forests*, 54(1), 83-106.

Potter, R. O., Carvalho, A. P., Fasolo, P. J., Bognola, I. A., Bhering, S. B., & Martorano, L. G. (2002). Caracterização dos solos do Município de Piraí do Sul, PR.

Quadros, L. P., Ducheiko, H. A. S., Maeda, S., Prior, S. A., Araújo, E. M., Gomes, J. B. V., ... & Motta, A. C. V. (2021). Effects of wood ash application on tree nutrition and soil dynamics in a *Pinus taeda* system. *Forest Science*, 67(5), 618-628.

Ralston, C. (1967). Recognition and mapping of site types for afforestation. In *FAO Word Symposium on man-made forest and their industrial importance*, Canberra (pp. 172-87).

Reinikainen, A., Veijalainen, H., Nousiainen, H., 1998. Puiden ravinnepuutokset—metsäinikasvattajan ravinneopas. The Finnish Forest Research Institute, Research Papers, 688, 44 pp.

Reissmann, C.B.; Abrao, H.R.S.; Brito, M.A.R. Efeito da Leira no crescimento, resistência a geada e níveis de N, P e K em *Eucalyptus Dunnii*, Maiden. *Rev. Set. Ciências Agrárias* 1991, 11, 121–125.

Rigatto, P. A., Dedecek, R. A., & Matos, J. L. M. D. (2004). Influência dos atributos do solo sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft. *Revista árvore*, 28, 267-273.

Rodrigues, V. D. S., Motta, A. C. V., Barbosa, J. Z., Ercole, T. M., & Prior, S. A. (2023). Wood production and nutritional status of *Pinus taeda* L. in response to fertilization and liming: a meta-analysis of the Americas. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 16(4), 195.

Rodriguez, D. R. O. (2018). Propriedades da madeira de árvores de *Pinus taeda* L. com 17 anos de idade submetidas à fertilização com lodo compostado de fábrica de celulose por meio de análise de anéis de árvores (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. Obtido de [https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-21082018175821/publico/Daigard\\_Ricardo\\_Ortega\\_Rodriguez\\_versao\\_revisada.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-21082018175821/publico/Daigard_Ricardo_Ortega_Rodriguez_versao_revisada.pdf)

Schneider, T., Bassaco, M. V. M., Batista, A. H., Pereira, M., Motta, A. C. V., & Reissmann, C. B. (2022). Avaliação dos micronutrientes no sistema serapilheira-solo-planta em floresta de *pinus taeda* em decorrência de adubação e calagem. *Revista do Instituto Florestal*, 34(2), 134-147.

Schuchovski, M. S., Arce, J. E., & de Oliveira, E. B. (2019). Dominant height and site index for loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in two forestry clusters in the Southern Region of Brazil. *Scientia Forestalis*, (121), 92-104.

Schuchovski, M. S., Arce, J. E., & de Oliveira, E. B. (2019). Dominant height and site index for loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in two forestry clusters in the Southern Region of Brazil. *Scientia Forestalis*, (121), 92-104.

Sclífó Zucon, A. R., Pedreira, G. Q., Vargas Motta, A. C., Gotz, L. F., Maeda, S., Martins Bassaco, M. V., ... & de Oliveira Junior, J. C. (2022). Piling secondary subtropical forest residue: long-term impacts on soil, trees, and weeds. *Forests*, 13(8), 1183.

Scolforo, J. R. S., & do Amaral Machado, S. (1988). CURVAS DE ÍNDICE DE SÍTIO PARA PANTAÇÕES DE *Pinus taeda* NOS ESTADOS DO PARANÁ E SANTA CATARINA. *Floresta*, 18(1/2).

Stefano, E. di, Agyei, D., Njoku, E.N., Udenigwe, C.C., 2018. Plant RuBisCo: An Underutilized Protein for Food Applications. *J Am Oil Chem Soc* 95, 1063–1074. <https://doi.org/10.1002/AOCS.12104>.

Stutz, K. P., & Lang, F. (2023). Forest ecosystems create pedogenic patchworks through woody debris, trees, and disturbance. *Geoderma*, 429, 116246.

Sucre EB, Fox TR, 2009. Decomposing stumps influence carbon and nitrogen pools and fine-root distribution in soils. For Ecol Manag 258(10): 2242-2248. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.05.012>

Sun, O. J., & Payn, T. W. (1999). Magnesium nutrition and photosynthesis in *Pinus radiata*: clonal variation and influence of potassium. *Tree physiology*, [s. l.], 19(8), 535-540. <https://doi.org/10.1093/treephys/19.8.535>.

Thomas, G. W. (1975). The relationship between organic matter content and exchangeable aluminum in acid soil. *Soil Science Society of America Journal*, 39(3), 591-591.

Tutua, S., Zhang, Y., Xu, Z., & Blumfield, T. (2019). Residue retention mitigated short-term adverse effect of clear-cutting on soil carbon and nitrogen dynamics in subtropical Australia. *Journal of Soils and Sediments*, 19, 3786-3796.

Watt, M. S., Pearse, G. D., Dash, J. P., Melia, N., & Leonardo, E. M. C. (2019). Application of remote sensing technologies to identify impacts of nutritional deficiencies on forests. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 149, 226-241.

Xie, K., Cakmak, I., Wang, S., Zhang, F., & Guo, S. (2021). Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants. *The Crop Journal*, [s. l.], 9(2), 249-256. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.10.005>.

Yang, H., Liu, T., Liu, C., Wang, J., Chen, K., Zhong, W., ... & Huang, S. (2013). Genetic parameters and efficiency of early selection for half rotation-aged growth and form traits in *Pinus taeda* in China. *Silvae Genet*, 62(1-6), 277-84.

Zhang, X., Chhin, S., Fu, L., Lu, L., Duan, A., & Zhang, J. (2019). Climate-sensitive tree height–diameter allometry for Chinese fir in southern China. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 92(2), 167-176.

Zhu, Q., Vries, W., Liu, X., Zeng, M., Hao, T., Du, E., Zhang, F., & Shen, J. (2016). The contribution of atmospheric deposition and forest harvesting to forest soil acidification in China since 1980. *Atmospheric Environment*, [s. l.], 146, 215-222. <https://doi.org/10.1016/j.atmosen.2016.04.023>.

Zucon, A., Dominschek, R., & Motta, A. C. V. (2020). Can fertilization and liming affect the amount of litter and roots on *Pinus taeda* forest floor?. *Scientia Forestalis*, 48(128).

### 3 CAPÍTULO II: CORRELAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NDVI, VARI E EVI E O VOLUME DE MADEIRA EM PLANTIO DE *PINUS TAEDA L.*

#### 5.1 RESUMO

A estimativa do volume de madeira em plantações florestais é feita através de inventários florestais, onde são aplicadas técnicas a campo para determinação de variáveis dendrométricas, com o intuito de avaliar a saúde das plantas, biomassa e a expectativa da produtividade dos talhões. Técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento podem ser aliadas para a mensuração da produtividade, dessa forma é possível obter dados com mais precisão, agregando informações ao trabalho de campo. Entre as ferramentas de sensoriamento remoto que são aplicadas em plantios florestais, os índices de vegetação vêm sendo utilizados para avaliação de saúde das plantas e estimativa de biomassa de populações florestais. Imagens de satélite de um plantio de *Pinus taeda L.* demonstraram padrões de coloração distintos em talhões adultos (12 anos), com árvores em faixas de coloração verde escura (VE) em contraste com o restante do talhão verde claro (VC). Este trabalho teve como objetivo correlacionar os valores dos índices de vegetação EVI, VARI e NDVI com o volume de madeira das árvores de *Pinus taeda L.* de um plantio de florestamento pertencente a uma empresa florestal. O estudo foi realizado em uma área de aproximadamente 600 hectares situada em Pirai do Sul (PR). Foram selecionados 9 pontos nas linhas verde escuras (VE) e 9 pontos nas áreas verde claras (VC) para medição do diâmetro a altura do peito (DAP) altura total, e estimativa do volume de madeira de 10 árvores por ponto. Os índices foram gerados com as bandas 2,4,5 e 8 do satélite Sentinel- 2, através do sistema de informação geográfica Q-GIS 3.2. A média do volume de madeira em VE foi de 172,15 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, e em VC foi de 56,46 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. O índice NDVI apresentou valores entre 0,84 a 0,91 em VE e 0,77 a 0,84 em VC, a correlação entre o volume da madeira e o índice resultou em um R<sup>2</sup> de 0,24. O índice EVI apresentou valores de 0,45 a 0,52 em VE e 0,35 a 0,43 em VC, com um R<sup>2</sup> de 0,27. Os valores do índice VARI variaram de 0,19 a 0,47 em VE, e 0,13 a 0,39 em VC, apresentando um R<sup>2</sup> de 0,08. Embora os três índices tenham apresentado correlações positivas com o volume de madeira, o VARI demonstrou algumas limitações quanto a sua aplicação, as correlações do EVI e o NDVI e o volume de madeira foram semelhantes, no entanto considerando as características do plantio de *Pinus taeda L.* o índice EVI foi o mais adequado para o estudo em questão.

**Palavras-chave:** Sensoriamento-remoto, Geoprocessamento, Imagem orbital.

## 5.2 ABSTRACT

The estimation of the volume of wood in forest plantations is made through forest inventories, where techniques are applied in the field to determine dendrometric variables, with the aim of evaluating plant health, biomass and expected productivity of the plots. Remote sensing and geoprocessing techniques can be combined to measure productivity, this way it is possible to obtain more accurate data, adding information to field work. Among the remote sensing tools that are applied in forest plantations, vegetation indices have been used to assess plant health and estimate the biomass of forest populations. Satellite images of a *Pinus taeda* L. plantation demonstrated distinct color patterns in adult stands (12 years old), with trees in bands of dark green color (VE) in contrast to the rest of the light green (VC) plot. This work aimed to correlate the values of the vegetation indices EVI, VARI and NDVI with the volume of wood from *Pinus taeda* L. trees in a forestry plantation belonging to a forestry company. The study was carried out in an area of approximately 600 hectares located in Pirai do Sul (PR). 9 points were selected on the dark green lines (VE) and 9 points on the light green areas (VC) to measure the diameter at breast height (DBH), total height, and estimate the volume of wood of 10 trees per point. The indices were generated with bands 2,4,5 and 8 of the Sentinel-2 satellite, through the Q-GIS 3.2 geographic information system. The average volume of wood in VE was 172.15 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, and in VC it was 56.46 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. The NDVI index presented values between 0.84 and 0.91 in VE and 0.77 to 0.84 in VC, the correlation between wood volume and the index resulted in an R<sup>2</sup> of 0.24. The EVI index presented values of 0.45 to 0.52 in VE and 0.35 to 0.43 in VC, with an R<sup>2</sup> of 0.27. VARI index values ranged from 0.19 to 0.47 in VE, and 0.13 to 0.39 in VC, presenting an R<sup>2</sup> of 0.08. Although the three indices showed positive correlations with the volume of wood, the VARI demonstrated some limitations regarding its application, the correlations of the EVI and the NDVI and the volume of wood were similar, however considering the characteristics of the *Pinus taeda* L. plantation the EVI index was the most appropriate for the study in question.

Keywords: Remote sensing, Geoprocessing, Orbital imaging.

### 5.3 INTRODUÇÃO

A silvicultura intensiva registrou um crescimento substancial a partir da década de 2000, tornando-se a principal fornecedora de matéria-prima para a indústria de base florestal brasileira, sendo uma alternativa ao modelo extrativista, tradicionalmente empreendido sobre as florestas nativas (IBGE, 2017). Entre as espécies de florestas plantadas no Brasil o gênero *Pinus* spp. se destaca (1,64 milhões de hectares plantados no país), de acordo com a IBA (2022), a produção tem mais representatividade nos estados do Paraná e Santa Catarina, estes possuem 41,59% e 41,55% respectivamente da sua área plantada.

Por conta de sua grande importância econômica a otimização do crescimento e produtividade de forma sustentável se faz uma prioridade para a produção do *Pinus taeda* L. A produtividade dos povoamentos florestais é afetada por diferentes fatores, incluindo as características topográficas, as propriedades físico-químicas dos solos e as condições microclimáticas locais (Oshunsanya et al., 2017). Em decorrência da crescente demanda por produtos florestais, a adoção de procedimentos e tratamentos culturais que permitam o controle do plantio e garantam a qualidade da madeira e produtividade se fazem uma prioridade para a silvicultura. A maioria dos tratamentos silviculturais que aumentam o crescimento dos povoamentos de *Pinus* spp. está associado ao aumento da copa e do tamanho dos ramos, bem como aumento da biomassa da folhagem (Zhao et al., 2020).

Estudos sobre produtividade florestal tem mostrado que a produção de biomassa da parte aérea foliar está diretamente relacionada ao índice de área foliar (IAF) e conseqüentemente pela fenologia e fisiologia das folhas (Mattos et al., 2020).

A determinação direta da biomassa requer métodos de amostragem trabalhosos, por esta razão, o emprego de técnicas de sensoriamento remoto mostra-se como uma alternativa eficiente e de baixo custo, permitindo o acompanhamento do vigor vegetativo em extensas áreas de cultivo (Waldhoff et al., 2017; Jafari et al., 2020). Estudos apontam que através de dados adquiridos com técnicas de sensoriamento remoto e índices de vegetação é possível realizar uma estimativa de produtividade, perturbação e fenologia do *Pinus*. (Ivanova & Soukhovolsky., 2020; Gaida et al., 2021).

A resposta espectral de povoamentos florestais silviculturais está associada a estrutura do dossel, constituída por variáveis como o estágio de desenvolvimento fenológico, distribuição espacial dos cultivares e suas dimensões (definidas pela densidade de cultivares por unidade de área, diâmetro de copa, entre outras), características dendrométricas como altura dominante dos cultivares, área basal e a fração de cobertura do dossel (Guyon & Bréda., 2016).

As diferenças espectrais entre espécies de coníferas estão relacionadas as características das acículas, diferindo-se em função de sua composição bioquímica, espessura da folha, posição e densidade dos estômatos e estrutura anatômica interna (Gamon & Berry, 2012; Marín et al., 2016). As acículas das espécies coníferas apresentam características espectrais muito similares às encontradas em dosséis formados por espécies de folhas laminares (Rautiainen et al., 2018).

As acículas apresentam medidas de reflectância superiores às encontradas em dosséis de folhas laminares nos comprimentos de onda do infravermelho próximo, ocorrendo a presença de bandas de absorção mais pronunciadas em função do conteúdo de água presente no mesófilo paliçádico (Roberts et al., 2004).

As acículas adaptadas à condição de sombreamento apresentam maior transmitância em relação as acículas expostas diretamente a irradiância solar, os comprimentos de onda mais influenciados estão localizados nos comprimentos de onda verde, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas (Hovi et., al 2017).

Os índices de vegetação se configuram como medidas radiométricas adimensionais, que indicam a atividade da vegetação verde (Jensen, 2009), sendo um dos produtos mais utilizados no estudo da superfície terrestre remoto (Gilabert et al., 2002). Os índices de vegetação representam uma técnica de grande potencial para o monitoramento das condições da vegetação por meio da aplicação de dados de sensoriamento remoto (Jiang et al., 2008). O objetivo fundamental dos índices de vegetação é ressaltar a resposta espectral da vegetação fotossinteticamente ativa a nível de pixel, permitindo a realização de intercomparações nas escalas espacial e temporal (Huete et al., 2002).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), proposto por Rouse et al. (1973), consiste em um índice espectral que descreve o vigor vegetativo ou atividade fotossintética da vegetação a partir da diferença normalizada entre a resposta espectral da vegetação nos comprimentos de onda do vermelho (com absorção máxima em torno de 690 nm) e infravermelho próximo (com espalhamento

máximo em torno de 850 nm), associados à fração de radiação solar absorvida e refletida, respectivamente, pelas plantas durante a realização da fotossíntese (Tucker, 1979; Baret & Buis, 2008).

O NDVI é uma métrica de sensoriamento remoto que tem sido amplamente utilizada para análise do estado de crescimento da vegetação, para acompanhar as variações na cobertura de vegetação, estimar a biomassa acima do solo e avaliar a qualidade do ecossistema (Liu et al., 2022; Zhang et al., 2022).

O Índice de Vegetação Realçado (EVI) foi proposto por Huete et al. (2002) com intuito de otimizar a resposta da vegetação com elevado vigor vegetativo, a partir de uma maior sensibilidade às variações estruturais e arquitetônicas do dossel, em comparação com outros índices de vegetação como o NDVI, o que faz com que este índice apresente elevado desempenho em aplicações sobre regiões com elevada biomassa vegetal (Hufkens et al., 2012).

Com o objetivo de minimizar o efeito aditivo produzido pelo espalhamento atmosférico na resposta da vegetação, o EVI incorpora o conceito de resistência atmosférica de forma semelhante como tratado no VARI (Kaufman & Tanré, 1992), a partir da utilização da banda do azul, mais sensível ao espalhamento atmosférico, para a redução do ruído e das incertezas associadas aos aerossóis atmosféricos altamente variáveis sobre a banda do vermelho (Jiang et al., 2008).

O Índice Resistente à Atmosfera na Região Visível (VARI) é baseado na variabilidade de vigor e estresse da planta, levando em consideração o desenvolvimento foliar de uma determinada cultura (Abrahão et al., 2009). Com isto o índice VARI é utilizado para complementar diversas pesquisas que utilizam outros índices vegetativos (Freire & Silva et al., 2019).

Elaborado por Gitelson et al. 2002 como uma modificação para o NGRDI o (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada do Verde e do Vermelho) o VARI foi proposto por apresentar baixa sensibilidade aos efeitos atmosféricos. Este índice utiliza as faixas espectrais do azul, vermelho e verde, com a subtração da banda azul no denominador, proposta para reduzir os efeitos atmosféricos (Kaufman & Tanré, 1992). Este índice tem por objetivo enfatizar a vegetação na parte visível do espectro, ao mesmo tempo, atenua as diferenças dos efeitos atmosféricos e iluminação.

O objetivo desse trabalho é correlacionar os índices de vegetação NDVI, VARI e EVI com o volume de madeira de um plantio comercial com diferentes tonalidades nas folhas de *Pinus taeda* L. localizado em Piraí do Sul-PR, determinando assim a

viabilidade destes como indicadores de produtividade, fornecendo informações para otimizar práticas de manejo sustentáveis.

## 5.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.4.1 ÁREA DE ESTUDO E COLETA DE DADOS

O estudo foi realizado em uma área de plantio de *Pinus taeda* L. de aproximadamente 600 hectares, com 12 anos de instalação, localizada no município de Piraí do Sul (PR), de coordenadas centrais 24°24'3.04"S e 49°58'26.69"O, com altitude em relação ao nível médio do mar de 1004 m, pertencente a empresa CMPC. Foram obtidas no site sentinel hub as cenas da área com as bandas 2, 4, 5 e 8 do satélite Sentinel-2 com resolução espacial de 20 m, no mês de junho de 2023.

### 5.4.2 DADOS DENDROMÉTRICOS

Foram selecionadas 10 plantas de *Pinus taeda* L. por ponto, a altura total foi mensurada com o uso do aparelho hipsômetro/clinômetro Haglof Sweden. O diâmetro a altura do peito (DAP) foi medido com auxílio de uma fita métrica, primeiramente a campo foram coletados os valores da circunferência à altura do peito (CAP) e posteriormente calculado o DAP. Para estimar o volume da madeira foram utilizadas as alturas totais mensuradas com o clinômetro, posteriormente aplicadas ao fator de forma fornecido pela empresa CMPC:

$$\text{FATOR DE FORMA} = \left[ \left\{ \left( \frac{\text{DAP}}{100} \right) \cdot \left( \frac{\text{DAP}}{100} \right) \cdot \pi \right\} / 4 \right] \cdot (h/5)$$

Onde:

DAP= diâmetro a altura do peito

h= altura total

Após o cálculo do volume de madeira por planta, foi calculado o volume de madeira por hectare ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ) levando em consideração um número de 1.666 plantas por hectare, para o cálculo não foi atribuída taxa de mortalidade de plantas, sendo assim:

$$\text{Volume de madeira por hectare} = \text{volume por planta} \times 1.666 \text{ plantas há}^{-1}$$

### 5.4.3 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS E CÁLCULO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

As imagens foram submetidas ao ajuste das coordenadas geográficas para o sistema SIRGAS-2000. Os softwares de informações geográficas utilizados para o processamento das imagens e cálculos dos índices de vegetação foram o Q-GIS 3.2 e o ARCMAP 10.8 para elaboração dos layouts finais.

No SIG Q-GIS 3.2 as principais ferramentas utilizadas para gerar os índices de vegetação foram: Calculadora raster (Ferramenta integrada que permite realizar cálculos matemáticos com camadas raster). Plugin Semi Automatic Classification, esse plugin permite a classificação supervisionada e não supervisionada dos índices, a correção atmosférica de bandas, e também os cálculos dos índices. A ferramenta raster pixel to points é utilizada para a extração dos valores do pixel dos índices de cada ponto, para posteriormente esses serem usados nas análises.

#### **Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)**

O NDVI foi gerado com auxílio da ferramenta “mosaico” do SIG Q-GIS 3.2. Para o cálculo do NDVI foram utilizadas as bandas espectrais do vermelho e infravermelho próximo e posteriormente aplicadas a fórmula definida por Rouse. (1973):

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Onde:

- NIR: Banda 8 (comprimento de onda de 842 nanômetros)
- RED: Banda 4 (comprimento de onda de 665 nanômetros)

#### **Índice Resistente a Atmosfera no Valor Visível (VARI)**

O VARI foi gerado com auxílio da ferramenta “mosaico” do SIG Q-GIS 3.2. As bandas utilizadas foram: verde, vermelha e azul, conforme a fórmula proposta por Gitelson et al. (2002):

$$VARI = \frac{(GREEN - RED)}{(GREEN + RED + BLUE)}$$

Onde:

- GREEN: Banda 3 (comprimento de onda de 560 nanômetros)
- RED: Banda 4 (comprimento de onda de 665 nanômetros)
- BLUE: Banda 2 (comprimento de onda de 490 nanômetros)

### Índice de Vegetação Melhorado (EVI)

O EVI foi gerado com auxílio da ferramenta “mosaico” do SIG Q-GIS 3.2. Para o cálculo foram utilizadas as bandas: azul, vermelho e infravermelho, de acordo com a fórmula proposta por Huete., et al (2002):

$$EVI = G \cdot \frac{(NIR - RED)}{(NIR + C1 \times RED - C2 \times BLUE + L)}$$

Onde:

- G: é um fator de ganho (2,5)
- C1 é um coeficiente de ajuste do aerossol (C1=6)
- C2 é um coeficiente de correção do solo (C2= 7,5)
- L é uma constante de correção do tipo de solo (L=1)
- NIR: Banda 8 (comprimento de onda de 842 nanômetros)
- RED: Banda 4 (comprimento de onda de 665 nanômetros)
- BLUE: Banda 2 (comprimento de onda de 490 nanômetros)

#### 5.4.4 REGRESSÃO LINEAR E ÍNDICE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

Foram realizadas regressões lineares e correlações de Pearson entre os índices de vegetação e o volume de madeira do *Pinus taeda* L. Os dados dos índices de vegetação foram extraídos de cada pixel correspondente à localização do ponto de amostragem em VC e VE do arquivo raster gerado com resolução de 20x20 m e

correlacionados com os valores dos atributos dendrométricos. Os dados dendrométricos foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro- Wilk, teste de homogeneidade de variâncias de Levene e posteriormente as médias foram comparadas através do teste T de Student ao nível de  $p < 0,05$ . As análises foram executadas nos programas Excel e Jamovi 2.3.26.

## 5.5 RESULTADOS

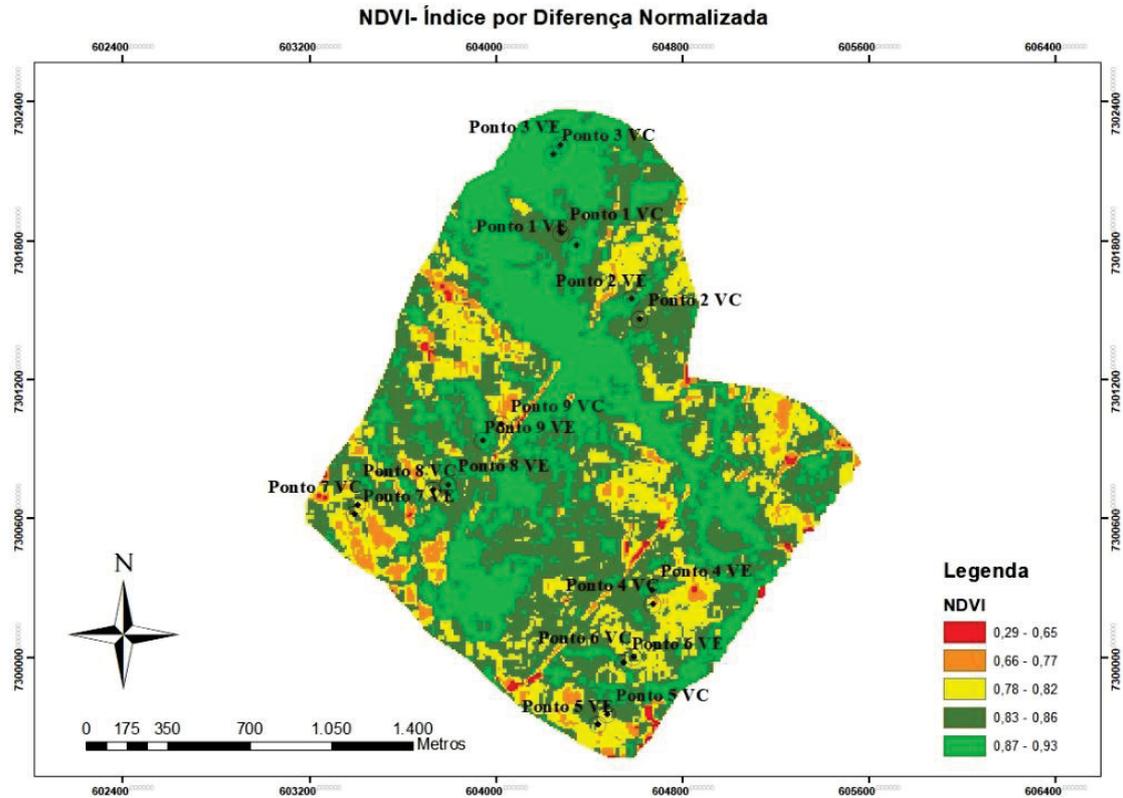
Em toda a área de plantio de pinus, os valores para o NDVI variaram de 0,77 a 0,91 (Figura 9). Algumas áreas aparecem com valores menores que o mencionado, mas são referentes à estrada ou afloramento de rochas, sem plantio florestal. Considerando os tipos de tonalidade de verde na área, os valores para o índice NDVI nos pontos em VE variaram entre 0,84 e 0,91 enquanto que nos pontos em VC os valores ficaram entre 0,77 e 0,84 (Tabela 7, Figura 12). Para o índice VARI os valores para as faixas de VC variaram de 0,13 a 0,39 e VE entre 0,19 a 0,47 (Tabela 7, Figura 13). Os valores extraídos para o índice EVI variaram em VC de 0,35 a 0,43 e para as áreas VE de 0,45 a 0,52 (Figura 14, Tabela 7).

TABELA 7- VALORES DOS ÍNDICES NDVI, EVI E VARI PARA CADA PONTO AMOSTRAS, NAS ÁREAS VERDE CLARO (VC) E VERDE ESCURO (VE).

Ponto	NDVI		VARI		EVI	
	VC	VE	VC	VE	VC	VE
1	0,77	0,91	0,20	0,45	0,41	0,50
2	0,81	0,88	0,17	0,39	0,43	0,51
3	0,80	0,90	0,39	0,32	0,40	0,45
4	0,79	0,89	0,17	0,34	0,40	0,46
5	0,82	0,84	0,13	0,26	0,38	0,51
6	0,84	0,88	0,16	0,36	0,39	0,51
7	0,80	0,85	0,15	0,19	0,35	0,47
8	0,82	0,88	0,23	0,41	0,36	0,47
9	0,77	0,90	0,13	0,47	0,35	0,52

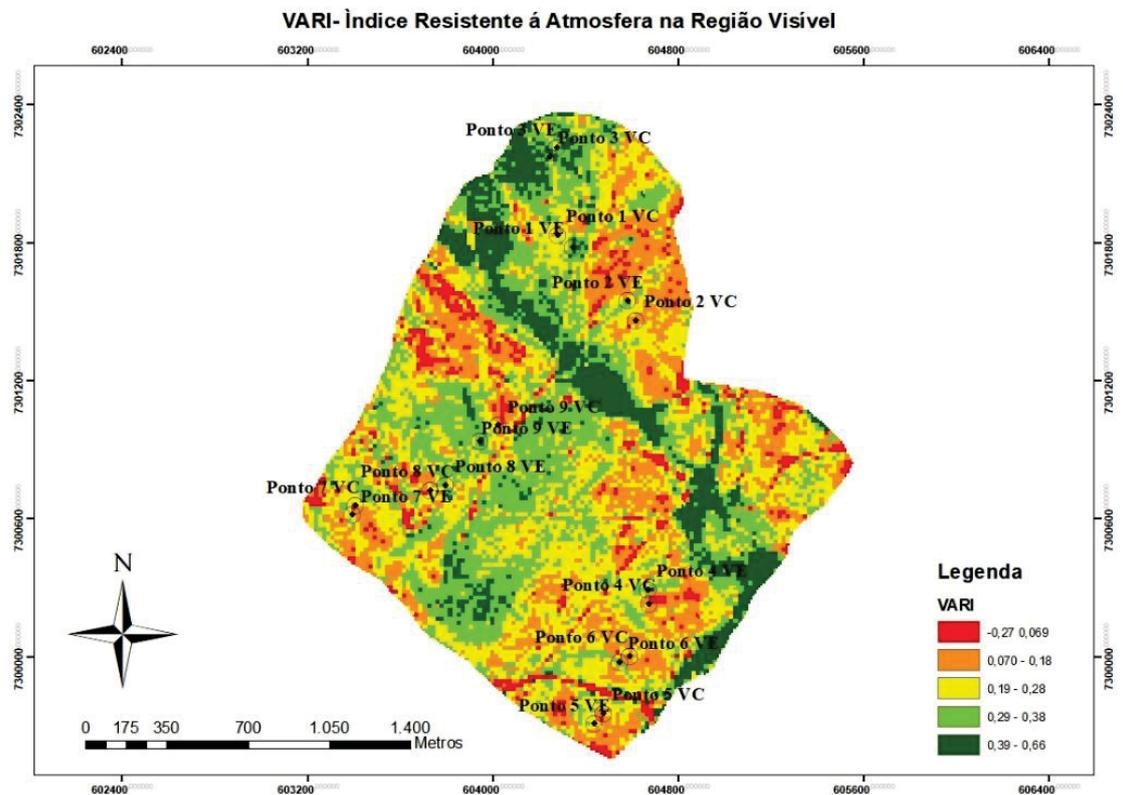
FONTE: A autora (2024).

FIGURA 12 - NDVI- ÍNDICE POR DIFERENÇA NORMALIZADA



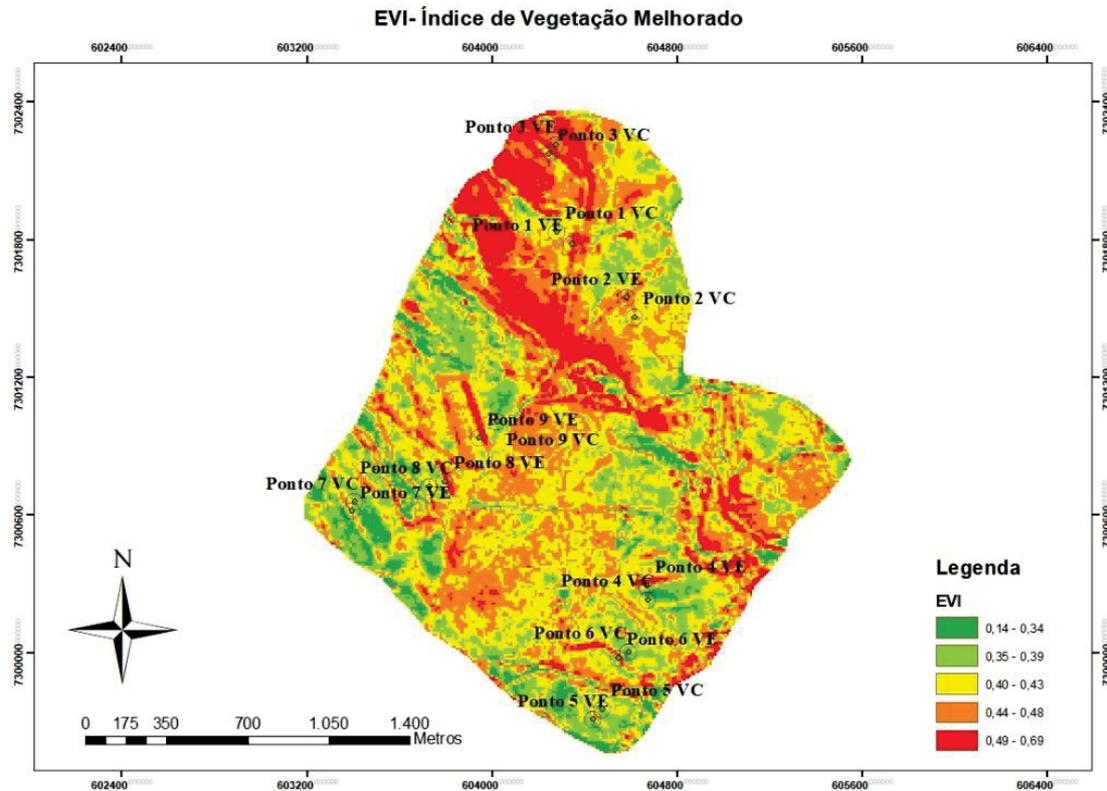
FONTE: A autora (2024).

FIGURA 13 - VARI- ÍNDICE RESISTENTE À ATMOSFERA NA REGIÃO VISÍVEL



FONTE: A autora (2024).

FIGURA 14 - EVI- ÍNDICE DE VEGETAÇÃO MELHORADO



FONTE: A autora (2024).

A partir das imagens foram extraídos os valores dos índices NDVI, VARI e EVI do pixel de cada ponto de amostragem (resolução do pixel 20x20 m), assim foram realizadas as regressões dos valores dos índices de vegetação com volumes de madeira obtidos em campo, respectivamente em cada um dos 9 pontos de amostragem em VE e em VC. Na Tabela 8 e Figura 15 estão representados os valores dendrométricos coletados a campo com ênfase para o volume de madeira.

Em VC o DAP variou entre 5,59 cm à 23,33 cm, com valor médio de 13,7, uma variação de mais de 4 vezes entre o mínimo e o máximo. As alturas totais das árvores variaram de 6,38 m a 10,98 m, com média de 9,14 m, com uma variação menor quando comparado com a variação do DAP, sendo da ordem de 42%. Os volumes atribuídos apresentaram ampla variação de 0,03 m<sup>3</sup> a 0,10 m<sup>3</sup> por árvore, enfatizando a diversidade dendrométrica ao decorrer do talhão. O volume de madeira por hectare (do tronco), variou de valores entre 8,33 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> a 233,24 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, e média de 56,46 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> em VC e 172,15 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> em VE. Esses dados representam um incremento médio de volume de mais de 3 vezes. Mais especificamente no ponto 9, onde

apresentou o menor volume de madeira, a variação foi de 8,33 a 116,62 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, ou seja, um incremento de mais de 14 vezes.

TABELA 8 - MÉDIAS DOS ATRIBUTOS DENDROMÉTRICOS E VOLUME DE TORA DE MADEIRA POR HECTARE ÁREAS VERDE CLARAS E FAIXAS VERDE ESCURAS- PLANTIO DE PINUS TAEDA L. PIRAÍ DO SUL- PR.

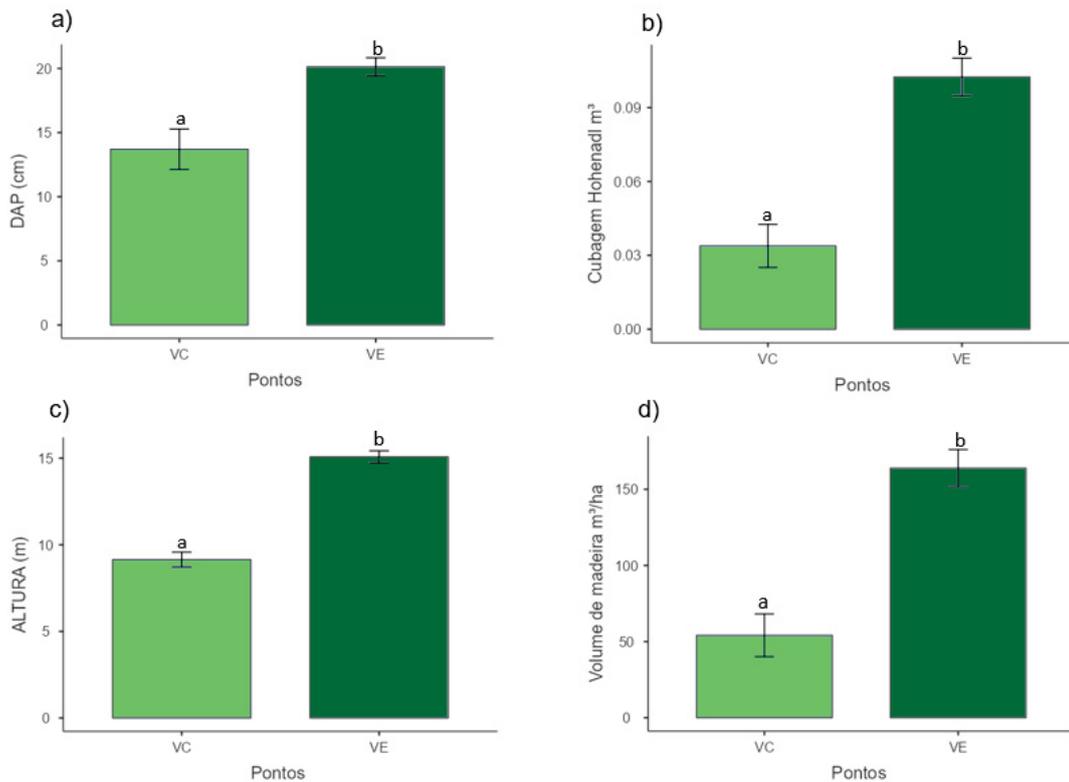
Pontos	VC				VE			
	DAP cm	Altura m	Volume por planta m <sup>3</sup>	Volume m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	DAP cm	Altura m	Volume por planta m <sup>3</sup>	Volume m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>
1	11,68	10,01	0,03	44,98	18,4	14,92	0,01	149,94
2	13,27	9,16	0,03	44,98	19,8	14,15	0,09	149,94
3	15,37	9,25	0,03	56,64	18,81	14,9	0,09	149,94
4	13,53	9,75	0,03	53,31	21,55	13,69	0,10	166,6
5	13,46	8,33	0,03	46,64	21,74	15,46	0,12	199,92
6	11,05	6,38	0,01	23,32	20,18	14,39	0,10	166,6
7	23,33	10,98	0,10	163,27	22,57	17,28	0,14	233,24
8	16,01	8,68	0,04	66,64	22,06	15,72	0,13	216,58
9	5,59	9,76	0,01	8,33	16,01	15,18	0,07	116,62
<b>Média</b>	13,7 b	9,14 b	0,03 b	56,46 b	20,12 a	15,08 a	0,09 a	172,15 a
<b>DP</b>	4,44	1,22	0,02	41,22	2	0,99	0,04	35,12

Médias com p- valor > que 0,05 não diferem estatisticamente á nível de confiança de 95% (Teste T-Student).

FONTE: A autora (2024).

Em VE o DAP variou de 16,01 cm a 22,57 cm, com média de 20,12 cm, ou seja, árvores predominantemente maiores em diâmetro em comparação com as áreas de vegetação verde clara. As alturas totais variaram entre 13,69 m a 17,28 m, com média de 15,08 m. O volume de madeira variou de 0,01 m<sup>3</sup> a 0,14 m<sup>3</sup> por árvore. O volume maior é consistente com as médias de alturas e DAP. Esses resultados demonstram uma produtividade alta e significativamente maior nas faixas verde escuras do que nas áreas verde claras (Figura 15).

FIGURA 15 - GRÁFICOS A, B, C, D – DADOS DENDROMÉTRICOS DAS ÁREAS VERDE CLARAS E VERDE ESCURAS

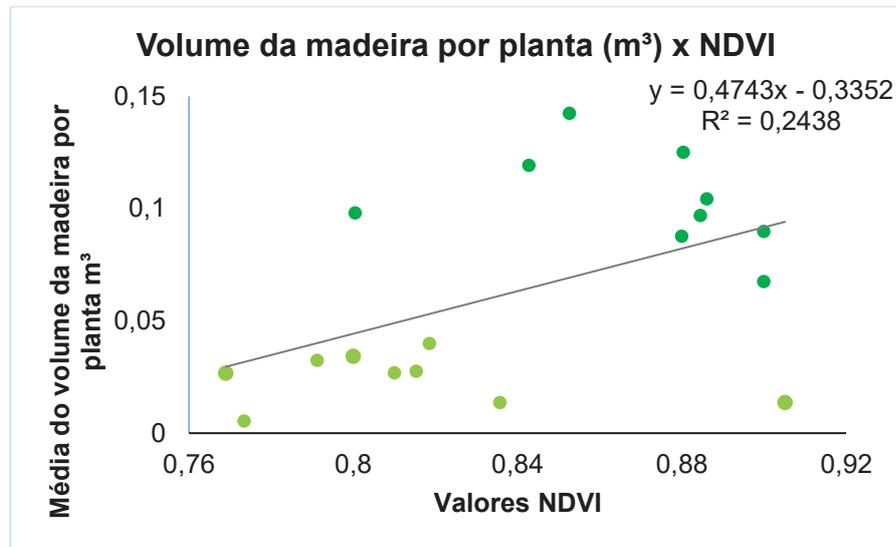


Médias com p- valor > que 0,05 não diferem estatisticamente á nível de confiança de 95% (Teste T-Student).

FONTE: A autora (2024).

No gráfico de regressão linear entre o índice NDVI e o volume médio de madeira por planta ( $m^3$ ) por ponto (Figura 16) há uma inclinação que indica correlação positiva, sugerindo que a medida em que o NDVI aumenta, o volume tende a aumentar. O valor de  $R^2$  é de 0,24, o que significa que aproximadamente 24 % da variação do volume médio de madeira por planta pode ser explicada pelo modelo linear baseado nos valores de NDVI. O  $R^2$  de 0,24 é um valor relativamente baixo, ou seja, embora exista uma correlação, outros fatores podem estar influenciando o volume de madeira, estes não são explicados pelo NDVI.

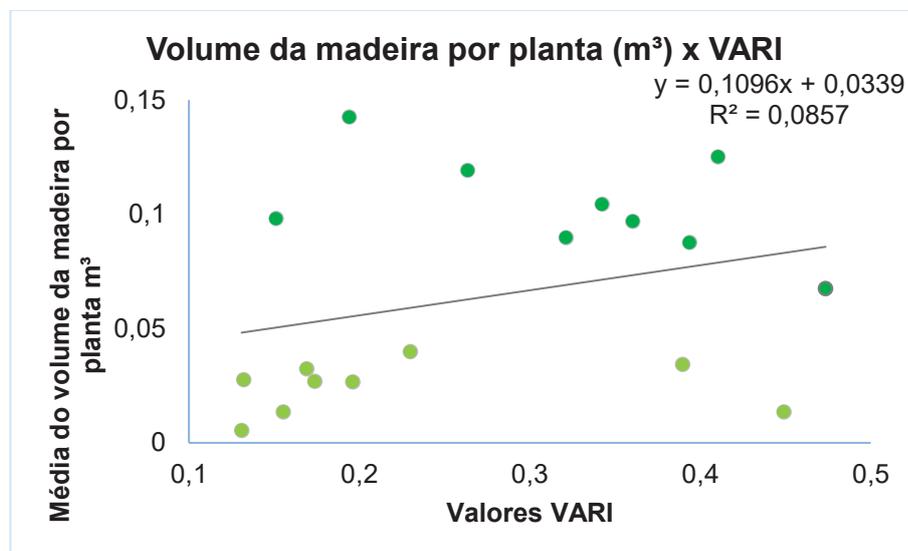
FIGURA 16 - GRÁFICO DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE VOLUME DE MADEIRA POR PLANTA (M<sup>3</sup>) X NDVI



FONTE: A autora (2024).

O gráfico de regressão linear (Figura 17) representa a relação entre o volume médio por planta e os valores do índice VARI. O coeficiente de determinação  $R^2 = 0,085$  indica que cerca de 8,5 % da variação no volume de madeira por planta pode ser explicada pelo índice VARI. Esse valor de  $R^2$  é consideravelmente baixo, sugerindo que o VARI por si só não é um bom preditor para a variável avaliada, indicando que outros fatores determinantes que desempenham um papel significativo na variação do volume de madeira por planta não são detectados pelo VARI.

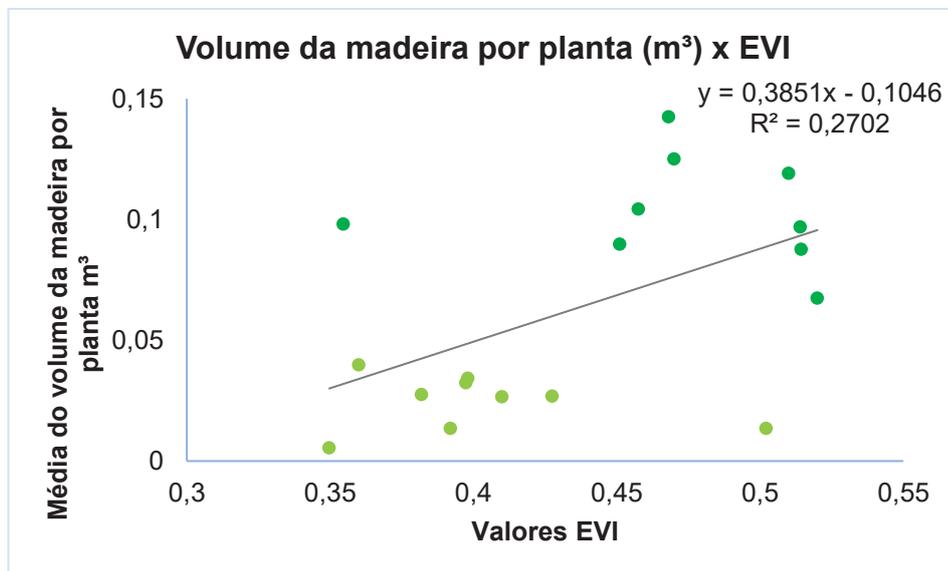
FIGURA 17- GRÁFICO DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE VOLUME DE MADEIRA POR PLANTA (M<sup>3</sup>) X VARI



FONTE: A autora (2024).

O gráfico de regressão linear representado na Figura 18 apresenta os valores de EVI no eixo X e o volume de madeira por planta de *Pinus taeda L.* no eixo Y. A linha de regressão tem uma inclinação positiva com a equação  $y = 0,3851x - 0,1046$  e um coeficiente de determinação de  $R^2 = 0,27$ , indicando uma relação positiva moderada entre o volume de madeira e o índice EVI, onde aproximadamente 27% da variação é explicada pelo índice. Esse resultado é mais robusto quando comparado com os índices anteriores NDVI e VARI.

FIGURA 18 - GRÁFICO DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE VOLUME DE MADEIRA POR PLANTA (M<sup>3</sup>) X EVI



FONTE: A autora (2024).

## 5.6 DISCUSSÃO

As médias dos atributos dendrométricos diâmetro a altura do peito (DAP) 20,12 cm, altura (15,08 m) e volume de madeira  $\text{ha}^{-1}$  (172,15  $\text{m}^3$ ) nas faixas verde escuras apresentaram diferenças significativas em relação as médias das áreas verde claras, DAP (13,7 cm), altura (9,14 m) e volume de madeira  $\text{ha}^{-1}$  (56,46  $\text{m}^3$ ). Apesar de as características dendrométricas das árvores presentes nas faixas verde escuras acarretarem em um volume 3 vezes maior de tora, em termos de produtividade as árvores apresentam um crescimento abaixo do que é esperado para a espécie de *Pinus taeda* L. aos 12 anos no sul do Brasil, onde estudos apontam sítios com produtividade entre 144,40 a 428,20  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ , Bognola et al. (2011). A heterogeneidade em termos de volume de madeira por hectare está relacionada a variação de qualidade de sítio entre as diferentes colorações avaliadas.

Os valores de NDVI obtidos nas faixas de coloração VC e VE foram superiores a 0,77, corroborando com o esperado para árvores de Pinus com 12 anos, já que estas atingem o pico de valores do índice (acima de 0,9) a partir do 5º ano de idade do plantio, e tendem a ter um decréscimo de máximos e mínimos após 11 anos (Dai., 2013).

Conforme o esperado, o índice VARI foi capaz de representar a heterogeneidade de colorações como reportado por Pertille & Nicoletti. (2022) onde as faixas VC apresentaram valores menores entre 0,13 e 0,23 com o ponto 3 sendo distinto da média apresentando um valor de 0,39, enquanto que em VE os valores foram maiores (0,19 a 0,47).

As variações nos valores do índice NDVI, e EVI entre as faixas de coloração (0,77 a 0,91) e (0,35 a 0,52) respectivamente, pode ser indicativo de distinção na disponibilidade de nutrientes, vigor da vegetação e densidade foliar (Pettorelli et al., 2005; Pertille et al., 2022). Valores mais altos de NDVI estão atribuídos a árvores mais vigorosas (Gallardo et al., 2023).

Os índices de vegetação que apresentam as bandas vermelha e infravermelha (NDVI e EVI) apresentaram valores maiores, corroborando com Macedo et al. (2017), pois essas são bandas de máxima refletância e forte absorção.

A idade das acículas também pode determinar variações na resposta espectral de dosséis de *Pinus* (Gaida., 2021). À medida que as árvores envelhecem sofrem mudanças nas suas características espectrais devido a alterações no teor de

água nas folhas e composição química alterando sua coloração e a capacidade de refletância e absorbância.

As regressões lineares entre os índices de vegetação e o volume de madeira apresentaram baixas correlações, o NDVI com  $R^2= 0,24$ , o VARI com  $R^2= 0,08$  e o EVI com  $R^2= 0,27$ , ambos pouco representativos para expressar a variável volume. As baixas correlações entre variáveis oriundas de sensoriamento remoto e variáveis dendrométricas pode ser explicada pelo aspecto da cobertura vegetal, gerada por uma imagem de satélite que é resultado de um processo complexo que inclui muitos fatores ambientais e parâmetros. Isso está diretamente associado à estrutura da floresta e as bandas espectrais utilizadas, como índices de vegetação e textura variáveis podem diferir em suas relações com a biomassa e volume (Miguel et al., 2015; Lu et al., 2014).

## 5.7 CONCLUSÕES

Os índices de vegetação avaliados NDVI, VARI e EVI foram capazes de representar bem a heterogeneidade de coloração do dossel do *Pinus taeda* L., caracterizando a distinção entre as faixas de coloração verde escuras e áreas verde claras, apresentando valores maiores em VE. Apesar de serem representativos no que se trata da avaliação da heterogeneidade de coloração do dossel presente no talhão estudado, os índices avaliados não foram bons preditores para o volume de madeira de tora, uma vez que essa variável apresentou grande variabilidade e variáveis dendrométricas são dificilmente avaliadas pelos índices por sofrerem grandes interferências de parâmetros associados a texturas captadas pelas bandas espectrais e fatores ambientais.

## 5.8 REFERÊNCIAS

Abrahão, S. A., Pinto, F. D. A. D. C., Queiroz, D. M. D., Santos, N. T., Gleriani, J. M., & Alves, E. A. (2009). Índices de vegetação de base espectral para discriminar doses de nitrogênio em capim-tanzânia. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 38, 1637-1644.

Baret, F., & Buis, S. (2008). Estimating canopy characteristics from remote sensing observations: Review of methods and associated problems. *Advances in land remote sensing: System, modeling, inversion and application*, 173-201.

Bognola, I. A., Dedecek, R. A., Lavoranti, O. J., & Higa, A. R. (2010). Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus taeda*.

Dai, P. V. S., Baio, F. H. R., de Azevedo, G. B., Fagundes, L. A., & Trento, A. C. S. (2021). Estimate of wood volume based on vegetation indices.

Freire-Silva, J., Paz, Y. E., Lima-Silva, P. P., Pereira, J. A. S., & Candeias, A. L. B. (2019). Índices de vegetação do sensoriamento remoto para processamento de imagens na faixa do visível (RGB). *J. Hyperspectr. Remote Sens*, 9, 228-239.

Friedl, M. A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A., & Huang, X. (2010). MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote sensing of Environment*, 114(1), 168-182.

Gaida, W. (2021). Avaliação dos efeitos topográficos e direcionais sobre os índices de vegetação na definição de zonas de manejo em povoamentos de pinus no sul do Brasil (Doctoral dissertation, Universidade Federal de Santa Maria).

Gaida, W., Breunig, F. M., & Perrando, E. R. (2021). Efeito topográfico sobre a resposta espectral de povoamentos florestais de *Pinus taeda* Linnaeus no Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(7), 3765-3787.

Gamon, J. A., & Berry, J. A. (2012). Facultative and constitutive pigment effects on the Photochemical Reflectance Index (PRI) in sun and shade conifer needles. *Israel Journal of Plant Sciences*, 60(1-2), 85-95.

Gallardo-Salazar, J. L., Lindig-Cisneros, R. A., Lopez-Toledo, L., Endara-Agramont, A. R., Blanco-García, A., & Sáenz-Romero, C. (2023). Analysis of the Vigor of *Pinus hartwegii* Lindl. along an Altitudinal Gradient Using UAV Multispectral Images: Evidence of Forest Decline Possibly Associated with Climatic Change. *Forests*, 14(6), 1176.

Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., Garcia-Haro, F. J., & Meliá, J. (2002). A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of environment*, 82(2-3), 303-310.

Gitelson, A. A., Stark, R., Grits, U., Rundquist D., Kaufman, Y., Derry, D. (2002).

Gitelson, A. A.; GRITZ, Y.; MERZLYAK, M. N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*, v. 160, n. 3, p. 271–282, 2003.

Gitelson, A., Peng, Y., Viña, A., Arkebauer, T., & Rundquist, D. (2012). Green leaf area index estimation in maize and soybean: Combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. *Agronomy journal*, 104(5), 1336-1347.

Glenn, E. P., Huete, A. R., Nagler, P. L., & Nelson, S. G. (2008). Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. *Sensors*, 8(4), 2136-2160.

Guyon, D., & Bréda, N. (2016). Applications of multispectral optical satellite imaging in forestry. In *Land Surface Remote Sensing in Agriculture and Forest* (pp. 249-329). Elsevier.

Hovi, A., Raitio, P., & Rautiainen, M. (2017). A spectral analysis of 25 boreal tree species. *Silva Fennica*, 51(4), 7753.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1-2), 195-213.

Hufkens, K., Friedl, M., Sonnentag, O., Braswell, B. H., Milliman, T., & Richardson, A. D. (2012). Linking near-surface and satellite remote sensing measurements of deciduous broadleaf forest phenology. *Remote Sensing of Environment*, 117, 307-321.

INSTITUTO ÁGUA E TERRA – Geologia do Paraná- História evolutiva. <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Geologia-do-Parana-Historia-Evolutiva#:~:text=O%20Segundo%20Planalto%20constitui%20a,cretáceos%20no%20noroeste%20do%20Estado.>

INDÚSTRIA BRASIELIRA DE ÁRVORES - IBÁ. Relatório IBÁ 2020. SÃO PAULO, 2020. <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção da extração vegetal e da silvicultura. Rio de Janeiro: IBGE, v. 32, p. 1-15, 2017.

Ivanova, Y., Kovalev, A., & Soukhovolsky, V. (2020). Modeling the radial stem growth of the pine (*Pinus sylvestris* L.) forests using the satellite-derived NDVI and LST (MODIS/AQUA) data. *Atmosphere*, 12(1), 12.

Jafari, E., Naghavi, H., Adeli, K., & Latifi, H. (2020). A nondestructive, remote sensing-based estimation of the economic value of aboveground temperate Forest biomass (case study: Hyrcanian Forests, Nowshahr-Iran). *Journal of Sustainable Forestry*, 39(7), 750-770.

Jensen, J. R. (2009). Remote sensing of the environment: An earth resource perspective 2/e. Pearson Education India.

Jensen, J. R. Remote sensing of the environment: an earth resource perspective. 2. ed. Harlow: Pearson Educational Limited, 2014. 614 p. Catarina, Florianópolis, 2014.

Jiang, Z., Huete, A. R., Didan, K., & Miura, T. (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote sensing of Environment*, 112(10), 3833-3845.

Kaufman, Y. J., & Tanre, D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2), 261-270.

Liu, Y., Yang, R., Sun, M., Zhang, L., Li, X., Meng, L., ... & Liu, Q. (2022). Regional sustainable development strategy based on the coordination between ecology and economy: A case study of Sichuan Province, China. *Ecological Indicators*, 134, 108445.

Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Liu, L., Li, G., & Moran, E. (2016). A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*, 9(1), 63-105.

Macedo, F. L., Sousa, A. M. O., Gonçalves, A. C., Silva, H. R., & Rodrigues, R. A. F. (2017). Estimativa do volume de madeira para *Eucalyptus* sp. com imagens de satélite de alta resolução espacial. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, 45(114), 237-247. <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n114.01>.

Marín, S., Novák, M., Klančnik, K., & Gaberščik, A. (2016). Spectral signatures of conifer needles mainly depend on their physical traits. *Polish Journal of Ecology*, 64(1), 1-13.

Mattos, E. M., Binkley, D., Campoe, O. C., Alvares, C. A., & Stape, J. L. (2020). Variation in canopy structure, leaf area, light interception and light use efficiency among *Eucalyptus* clones. *Forest Ecology and Management*, 463, 118038.

Meneghini, A., Rahimzadeh-Bajgiran, P., Livingston, W., & Weiskittel, A. (2022). Detecting white pine needle damage through satellite remote sensing. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 48(2), 239-257.

Miguel, E. P., Rezende, A. V., Leal, F. A., Matricardi, E. A. T., Vale, A. T. D., & Pereira, R. S. (2015). Redes neurais artificiais para a modelagem do volume de madeira e biomassa do cerradão com dados de satélite. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 50, 829-839.

Oshunsanya, S. O., Oluwasemire, K. O., & Taiwo, O. J. (2017). Use of GIS to delineate site-specific management zone for precision agriculture. *Communications in soil science and plant analysis*, 48(5), 565-575.

Pertille, C. T., Nicoletti, M. F. (2022). VOLUMETRIC MODELING OF *Pinus taeda* L. FROM ORBITAL IMAGES.

Pertille, C. T., Nicoletti, M. F., & Dobner Jr., M. (2023). Estimating the commercial volume of a *Pinus taeda* L. plantation using active and passive sensors.

Pertille, C. T., Nicoletti, M. F., Topanotti, L. R., & Stepka, T. F. (2019). Biomass quantification of *Pinus taeda* L. from remote optical sensor data. *Advances in Forestry Science*, 6(2), 603-610.

Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). "Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change." *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503-510].

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. version 3.2. Open-Source Geospatial Foundation Project. 2023.

Rautiainen, M., Lukeš, P., Homolova, L., Hovi, A., Pisek, J., & Möttus, M. (2018). Spectral properties of coniferous forests: A review of in situ and laboratory measurements. *Remote Sensing*, 10(2), 207.

Roberts, D. A., Ustin, S. L., Ogunjemiyo, S., Greenberg, J., Dobrowski, S. Z., Chen, J., & Hinckley, T. M. (2004). Spectral and structural measures of northwest forest vegetation at leaf to landscape scales. *Ecosystems*, 7, 545-562.

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec. Publ*, 351(1), 309.

Sumnall <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431161.2022.2161853>

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150.

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150.

Waldhoff, G., Lussem, U., & Bareth, G. (2017). Multi-Data Approach for remote sensing-based regional crop rotation mapping: A case study for the Rur catchment, Germany. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 61, 55-69.

Zhang, Y., Dai, P., Liu, R., Liu, W., Xiao, A., Li, J., ... & Liu, J. (2022). Rational engineering of phospholipase C from *Bacillus cereus* HSL3 for simultaneous thermostability and activity improvement. *Journal of Biotechnology*, 355, 1-9.

Zhao, Y. et al. Predicting wheat yield at the field scale by combining highresolution Sentinel-2 satellite imagery and crop modelling. *Remote Sensing*, v. 12, n. 6, p. 1024, 2020.

#### 4 CONCLUSÃO GERAL

O estudo demonstrou que o acúmulo de resíduos do corte raso em solos derivados de material de origem com baixa reserva de nutrientes desempenha o papel de fornecer estes para as plantas. Nas faixas onde os resíduos foram depositados foi observado um aumento significativo na produtividade de volume de tora do *Pinus taeda* L. Além disso a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto mostrou-se eficiente para monitorar variações no dossel do *Pinus taeda*, contudo é fundamental considerar o estágio fenológico da planta e condições de manejo florestal para uma avaliação com maior precisão. Os três índices avaliados NDVI, VARI e EVI representaram a heterogeneidade constatada na coloração do dossel das árvores de *Pinus taeda* L. mas não foram bons preditores para o volume de madeira de tora. Esses resultados enfatizam a importância de práticas de manejo adequadas de resíduos, bem como a aplicação de tecnologias pode otimizar a avaliação da qualidade do sítio florestal com maior sustentabilidade.

## 6 REFERÊNCIAS GERAIS

Abrahão, S. A., Pinto, F. D. A. D. C., Queiroz, D. M. D., Santos, N. T., Gleriani, J. M., & Alves, E. A. (2009). Índices de vegetação de base espectral para discriminar doses de nitrogênio em capim-tanzânia. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 38, 1637-1644.

Abrão, S. F., Rosa, S. F., Reinert, D. J., Reichert, J. M., Secco, D., & Ebling, A. (2015). Alterações químicas de um Cambissolo Húmico causadas por florestamento com *Pinus taeda* em área de campo natural. *Floresta*, Curitiba, 45(3), 455-464. <https://doi.org/10.5380/rf.v45i3.36103>.

ÁGUAS PARANÁ - Instituto das Águas do Paraná. Dados de precipitação mensal do município de Piraí do Sul – PR. 2023.

Aitken, R. L., Dickson, T., Hailes, K. J., & Moody, P. W. (1999). Response of field-grown maize to applied magnesium in acidic soils in north-eastern Australia. *Australian Journal of Agricultural Research*, 50(2), 191-198.

Alcantara, G. B. D., Ribas, L. L. F., Higa, A. R., Ribas, K. C. Z., & Koehler, H. S. (2007). Efeito da idade da muda e da estação do ano no enraizamento de miniestacas de *Pinus taeda* L. *Revista Árvore*, 31, 399-404.

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische zeitschrift*, 22(6), 711-728.

Andrade, T.C.G.R., Bacha, A.L., Camargo, M.B., Carvalho, L.B., 2021. Influence of phosphorus fertilization on the response of pinus genotypes to glyphosate subdoses. *New Forests* 2021 53:1 53, 143–160. <https://doi.org/10.1007/S11056-021-09849-Y>.

Aspinwall, M.J., King, J.S., McKeand, S.E., Bullock, B.P., 2011. Genetic effects on standlevel uniformity and above- and belowground dry mass production in juvenile

loblolly pine. *For Ecol Manage* 262, 609–619. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.04.029>.

Balbinot, R., Schumacher, M. V., Watzlawick, L. F., & Sanquetta, C. R. (2003). Inventário do carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. *RECEN-Revista Ciências Exatas e Naturais*, 5(1), 59-68.

Barbosa, R. I., Ramirez-Narvaez, P. N., Fearnside, P. M., Villacorta, C. D. A., & Carvalho, L. C. D. S. (2019). Allometric models to estimate tree height in northern Amazonian ecotone forests. *Acta Amazonica*, 49, 81-90.

Baret, F., & Buis, S. (2008). Estimating canopy characteristics from remote sensing observations: Review of methods and associated problems. *Advances in land remote sensing: System, modeling, inversion and application*, 173-201.

Batista, A. H., Motta, A. C. V., Reissmann, C. B., Schneider, T., Martins, I. L., & Hashimoto, M. (2015). Liming and fertilization in *Pinus taeda* plantations with severe nutrient deficiency in savanna soils. *Acta Scientiarum Agronomy, Maringá*, 37(1), 117-125. <https://doi.org/10.4025/actasciagrov37i1.18061>.

Beets, P. N., & Jokela, E. J. (1994). Upper mid-crown yellowing in *Pinus radiata*: some genetic and nutritional aspects associated with its occurrence. *New Zealand Journal of Forestry Science*, [s. l.], 24(1), 35-50.

Berg B. (2000) Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management* 133:13-22. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00294-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00294-7)

Berg B., Johansson M., Liu C., Fauri M., Sanborn P., Vesterdal L., Ni X., Hansen K., Ukonmaanaho L. (2017) Calcium in decomposing foliar litter – A synthesis for boreal and temperate coniferous forests. *Forest Ecology and Management* 403:137-144. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.08.022>.

Binkley, D., Stape, J.L., Bauerle, W.L., Ryan, M.G., 2010. Explaining growth of individual trees: Light interception and efficiency of light use by Eucalyptus at four sites in Brazil. *For Ecol Manage* 259, 1704–1713. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2009.05.037>.

Blackburn, G. A. (2002). Remote sensing of forest pigments using airborne imaging spectrometer and LIDAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 82(2-3), 311-321.

Bloss, F. D. (1994). *Crystallography and crystal chemistry: an introduction*. (No Title).

Boegh, E., Soegaard, H., Broge, N., Hasager, C. B., Jensen, N. O., Schelde, K., & Thomsen, A. (2002). Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote sensing of Environment*, 81(2-3), 179-193.

Bognola, I.A., Dedecek, R.A., Lavoranti, O.J., Higa, A.R., 2010. Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de Pinus taeda. *Pesq. Flor. Bras.* 30 (61), 37–49.

Cakmak I, Marschner H (1992) Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves. *Plant Physiol* 98(4):1222–1227. <https://doi.org/10.1104/pp.98.4.1222>

Cakmak I, Yazici AM (2010) Magnesium: a forgotten element in crop production. *Better Crops* 94(2):23–25

Carlson, C. A., Fox, T. R., Allen, H. L., Albaugh, T. J., Rubilar, R. A., & Stape, J. L. (2014). Growth responses of loblolly pine in the Southeast United States to midrotation applications of nitrogen, phosphorus, potassium, and micronutrients. *Forest Science*, 60(1), 157-169.

Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote sensing of Environment*, 62(3), 241-252.

Carter, R. E. I. D. (1992). Diagnosis and interpretation of forest stand nutrient status. *Forest fertilization: sustaining and improving nutrition and growth of western forests*. College of Forest Resources Contribution, 73, 90-97.

Cassol, H. L. G. (2013). Estimativa de biomassa e estoque de carbono em um fragmento de floresta ombrófila mista com uso de dados ópticos de sensores remotos.

Chaudhry, A. H., Nayab, S., Hussain, S. B., Ali, M., & Pan, Z. (2021). Current understandings on magnesium deficiency and future outlooks for sustainable agriculture. *International Journal of Molecular Sciences*, [s. l.], 22(4), 2-18. <https://doi.org/10.3390/ijms22041819>.

Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., ... & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145, 87-99.

Cleveland, C. C., & Liptzin, D. (2007). C: N: P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass?. *Biogeochemistry*, 85, 235-252.

Consalter, R., Barbosa, J.Z., Prior, S., Vezzani, F.M., Bassaco, M.V.M., Pedreira, G.Q., Motta, A.C.V., (2021). Mid-rotation fertilization and liming effects on nutrient dynamics of *Pinus taeda* L. in subtropical Brazil. *European Journal of Forest Research* 140, 19–35. <https://doi.org/10.1007/S10342-020-01305-4/FIGURES/5>.

Consalter, R., Motta, A. C. V., Barbosa, J. Z., Vezzani, F. M., Pons, R. R., Prior, S. A., & Bassaco, M. V. M. (2023). Pine root exploration of standing dead tree trunks: a short-cut biocycling process. *Forest systems*, 32(2), 9.

Consalter, R., Motta, A.C.V., Barbosa, J.Z., Vezzani, F.M., Rubilar, R.A., Prior, S.A., Nisgoski, S., Bassaco, M.V.M., 2021. Fertilization of *Pinus taeda* L. on an acidic oxisol in southern Brazil: growth, litter accumulation, and root exploration. *Eur J For Res* 140, 1095–1112. <https://doi.org/10.1007/S10342-021-01390-Z/TABLES/7>.

Curran, P. J. (1989). Remote sensing of foliar chemistry. *Remote sensing of environment*, 30(3), 271-278.

CW, R. (1967). Recognition and mapping of site types for afforestation.

Dagnachew, M., Kebede, A., Moges, A., & Abebe, A. (2020). Effects of climate variability on normalized difference vegetation index (NDVI) in the Gojeb River Catchment, Omo-Gibe Basin, Ethiopia. *Advances in Meteorology*, 2020, 1-16.

Dai, P. V. S., Baio, F. H. R., de Azevedo, G. B., Fagundes, L. A., & Trento, A. C. S. (2021). Estimate of wood volume based on vegetation indices.

Dell, M., Stone, C., Osborn, J., Glen, M., McCoull, C., Rimbawanto, A., ... & Mohammed, C. (2019). Detection of necrotic foliage in a young *Eucalyptus pellita* plantation using unmanned aerial vehicle RGB photography—a demonstration of concept. *Australian Forestry*, 82(2), 79-88.

Demattê, J. L. I. (2011). Ação do gesso e do calcário na relação cálcio: magnésio do solo e na produtividade da cana-de-açúcar. *Inform Agron*, 136, 11-16.

Di Bella, C. M., Paruelo, J. M., Becerra, J. E., Bacour, C., & Baret, F. (2004). Effect of senescent leaves on NDVI-based estimates of f APAR: Experimental and modelling evidences. *International Journal of Remote Sensing*, 25(23), 5415-5427.

Dobner Júnior, M., Higa, A. R., & Urbano, E. (2012). Determination of thinning optimum age and intensity in a *Eucalyptus dunnii* stand. *Floresta*, 42(3), 485-494.

Edwards, N. T., Taylor Jr, G. E., Adams, M. B., Simmons, G. L., & Kelly, J. M. (1990). Ozone, acidic rain and soil magnesium effects on growth and foliar pigments of *Pinus taeda* L. *Tree Physiology*, 6(1), 95-104.

Egnell, G. (2011). Is the productivity decline in Norway spruce following whole-tree harvesting in the final felling in boreal Sweden permanent or temporary?. *Forest Ecology and Management*, 261(1), 148-153.

Embrapa – Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. (2017). *Manual de Métodos de Análise de Solo*. Brasília: Embrapa.

Embrapa – Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília: Embrapa.

Ende, H. P., & Evers, F. H. (1997). Visual magnesium deficiency symptoms (coniferous, deciduous trees) and threshold values (foliar, soil). In Hüttl, R. F., Schaaf, W. *Magnesium Deficiency in Forest Ecosystems*, Dordrecht: Springer. pp. 3-22.

FAO, 2020. *Global Forest Resources Assessment, Global Forest Resources Assessment*. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca8753en>.

Forrester, D. I., Benneter, A., Bouriaud, O., & Bausch, J. (2017). Diversity and competition influence tree allometric relationships—Developing functions for mixed-species forests. *Journal of Ecology*, 105(3), 761-774.

Fortin, M., Van Couwenberghe, R., Perez, V., & Piedallu, C. (2019). Evidence of climate effects on the height-diameter relationships of tree species. *Annals of Forest Science*, 76, 1-20.

Freire-Silva, J., Paz, Y. E., Lima-Silva, P. P., Pereira, J. A. S., & Candeias, A. L. B. (2019). Índices de vegetação do sensoriamento remoto para processamento de imagens na faixa do visível (RGB). *J. Hyperspectr. Remote Sens*, 9, 228-239.

Friedl, M. A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A., & Huang, X. (2010). MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote sensing of Environment*, 114(1), 168-182.

Gaida, W. (2021). Avaliação dos efeitos topográficos e direcionais sobre os índices de vegetação na definição de zonas de manejo em povoamentos de pinus no sul do Brasil (Doctoral dissertation, Universidade Federal de Santa Maria).

Gaida, W., Breunig, F. M., & Perrando, E. R. (2021). Efeito topográfico sobre a resposta espectral de povoamentos florestais de *Pinus taeda* Linnaeus no Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(7), 3765-3787.

Gallardo-Salazar, J. L., Lindig-Cisneros, R. A., Lopez-Toledo, L., Endara-Agramont, A. R., Blanco-García, A., & Sáenz-Romero, C. (2023). Analysis of the Vigor of *Pinus hartwegii* Lindl. along an Altitudinal Gradient Using UAV Multispectral Images: Evidence of Forest Decline Possibly Associated with Climatic Change. *Forests*, 14(6), 1176.

Gamon, J. A., & Berry, J. A. (2012). Facultative and constitutive pigment effects on the Photochemical Reflectance Index (PRI) in sun and shade conifer needles. *Israel Journal of Plant Sciences*, 60(1-2), 85-95.

Gatiboni, L. C., Silva, W. C., Mumbach, G. L., Schmitt, D. E., Iochims, D. A., Stahl, J., & Vargas, C. O. (2020). Use of exchangeable and nonexchangeable forms of calcium, magnesium, and potassium in soils without fertilization after successive cultivations with *Pinus taeda* in southern Brazil. *Journal of Soils and Sediments*, [s. l.], 20, 665-674. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02460-x>.

Gatiboni, L.C., Vargas, C.O., Albuquerque, J.A., et al., 2017. Phosphorus fractions in soil after successive crops of *Pinus taeda* L. without fertilization. *Ciência Rural* 47, 1–8. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160595>.

Gent, J. A., Allen, H. L., Campbell, R. G., & Wells, C. G. (1986). Magnitude, duration, and economic analysis of loblolly pine growth response following bedding and phosphorus fertilization. *Southern Journal of Applied Forestry*, 10(3), 124-128.

Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., García-Haro, F. J., & Meliá, J. (2002). A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of environment*, 82(2-3), 303-310.

Gitelson, A. A., Gritz, Y., & Merzlyak, M. N. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of plant physiology*, 160(3), 271-282.

Gitelson, A. A., Stark, R., Grits, U., Rundquist D., Kaufman, Y., Derry, D. (2002).

Gitelson, A. A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., & Arkebauer, T. J. (2005).

Gitelson, A. A.; GRITZ, Y.; MERZLYAK, M. N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*, v. 160, n. 3, p. 271–282, 2003.

Gitelson, A., Peng, Y., Viña, A., Arkebauer, T., & Rundquist, D. (2012). Green leaf area index estimation in maize and soybean: Combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. *Agronomy journal*, 104(5), 1336-1347.

Glenn, E. P., Huete, A. R., Nagler, P. L., & Nelson, S. G. (2008). Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. *Sensors*, 8(4), 2136-2160.

Goetz, A. F., Vane, G., Solomon, J. E., & Rock, B. N. (1985). Imaging spectrometry for earth remote sensing. *science*, 228(4704), 1147-1153.

Gomes, S. S., Gonçalves, J. L. M., Rocha, J. H. T., & Menegale, M. L. C. (2019). Tolerance of Eucalyptus and Pinus seedlings to exchangeable Aluminium. *Scientia Agricola*, [s. l.], 76(6), 494-500. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0011>.

Gonçalves, J. D. M., DEMATTÊ, J. L. I., & COUTO, H. D. (1990). Relações entre a produtividade de sítios florestais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* com as propriedades de alguns solos de textura arenosa e média no Estado de São Paulo. IPEF, Piracicaba, 43(44), 24-39.

Grzebisz, W. (2011). Magnesium–food and human health. *Journal of Elementology*, 16(2).

Guyon, D., & Bréda, N. (2016). Applications of multispectral optical satellite imaging in forestry. In *Land Surface Remote Sensing in Agriculture and Forest* (pp. 249-329). Elsevier.

Hakamada, R.E., Stape, J.L., Lemos, C.C.Z., Almeida, A.E.A., Silva, L.F., 2015. Uniformidade entre árvores durante uma rotação e sua relação com a produtividade em *Eucalyptus* clonais. *Cerne* 21, 465–472. <https://doi.org/10.1590/01047760201521031716>.

Hentz, Â. M., Ruza, M. S., Corte, A. P., & Sanquetta, C. R. (2014). Técnicas de sensoriamento remoto para estimativa de biomassa em ambientes florestais. *Enciclopédia biosfera*, 10(18).

Horst, T. Z., Dalmolin, R. S. D., Caten, A. T., Moura-Bueno, J. M., Cancian, L. C., Pedron, F. A., & Schenato, R. B. (2018). Edaphic and Topographic Factors and their Relationship with Dendrometric Variation of *Pinus taeda* L. in a High Altitude Subtropical Climate. *Revista Brasileira e Ciência do Solo*, [s. l.], 42(0), e0180023. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20180023>.

Horst-Heinen, T. Z., Dalmolin, R. S. D., Caten, A. T., Moura-Bueno, J. M., Grunwald, S., Pedron, F. A., Rodrigues, M. F., Rosin, N. A., & Silva-Sangoi, D. V. (2021). Soil depth prediction by digital soil mapping and its impact in pine forestry productivity in South Brazil. *Forest Ecology and Management*, [s. l.], 488, e118983. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118983>.

Hovi, A., Raitio, P., & Rautiainen, M. (2017). A spectral analysis of 25 boreal tree species. *Silva Fennica*, 51(4), 7753.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1-2), 195-213.

Hufkens, K., Friedl, M., Sonnentag, O., Braswell, B. H., Milliman, T., & Richardson, A. D. (2012). Linking near-surface and satellite remote sensing measurements of deciduous broadleaf forest phenology. *Remote Sensing of Environment*, 117, 307-321.

INDÚSTRIA BRASIELIRA DE ÁRVORES - IBÁ. Relatório IBÁ 2020. SÃO PAULO, 2020. <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>

INSTITUTO ÁGUA E TERRA – Geologia do Paraná- História evolutiva. <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Geologia-do-Parana-Historia-Evolutiva#:~:text=O%20Segundo%20Planalto%20constitui%20a,cretáceos%20no%20noroeste%20do%20Estado.>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção da extração vegetal e da silvicultura. Rio de Janeiro: IBGE, v. 32, p. 1-15, 2017.

Ivanova, Y., Kovalev, A., & Soukhovolsky, V. (2020). Modeling the radial stem growth of the pine (*Pinus sylvestris* L.) forests using the satellite-derived NDVI and LST (MODIS/AQUA) data. *Atmosphere*, 12(1), 12.

Jafari, E., Naghavi, H., Adeli, K., & Latifi, H. (2020). A nondestructive, remote sensing-based estimation of the economic value of aboveground temperate Forest biomass (case study: Hyrcanian Forests, Nowshahr-Iran). *Journal of Sustainable Forestry*, 39(7), 750-770.

Jensen, J. R. (2009). Remote sensing of the environment: An earth resource perspective 2/e. Pearson Education India.

Jensen, J. R. Remote sensing of the environment: an earth resource perspective. 2. ed. Harlow: Pearson Educational Limited, 2014. 614 p. Catarina, Florianópolis, 2014.

Jiang, Z., Huete, A. R., Didan, K., & Miura, T. (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote sensing of Environment*, 112(10), 3833-3845.

Jiang, Z., Huete, A. R., Li, J., & Chen, Y. (2006). An analysis of angle-based with ratio-based vegetation indices. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(9), 2506-2513.

Júnior, P. C. F., Ishibashi, V., de Matos, J. L. M., Martinez, D. T., & Higa, A. R. (2021). Feasibility of early *Pinus taeda* L. selection to assess growth variables in progeny test. *Floresta*, 51(4), 937-945.

Karley, A. J., & White, P. J. (2009). Moving cationic minerals to edible tissues: potassium, magnesium, calcium. *Current opinion in plant biology*, 12(3), 291-298.

Kaufman, Y. J., & Tanre, D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2), 261-270.

Kirkby, C. A., Kirkegaard, J. A., Richardson, A. E., Wade, L. J., Blanchard, C., & Batten, G. (2011). Stable soil organic matter: a comparison of C: N: P: S ratios in Australian and other world soils. *Geoderma*, 163(3-4), 197-208.

Kirkby, C. A., Richardson, A. E., Wade, L. J., Batten, G. D., Blanchard, C., & Kirkegaard, J. A. (2013). Carbon-nutrient stoichiometry to increase soil carbon sequestration. *Soil Biology and Biochemistry*, 60, 77-86.

Kramer, R. (1998). *Chemometric techniques for quantitative analysis*. CRC Press.

Kulmann, M. S., Deliberali, I., Schumacher, M. V., Stahl, J., Figura, M. A., Ludvichak, A. A., & Stape, J. L. (2023). Can fertilization and stand uniformity affect the growth and biomass production in a *Pinus taeda* plantation in southern Brazil. *Forest Ecology and Management*, 541, 121075.

Larrinaga, A. R., & Brotons, L. (2019). Greenness indices from a low-cost UAV imagery as tools for monitoring post-fire forest recovery. *Drones*, 3(1), 6.

Le Maire, G., Marsden, C., Nouvellon, Y., Grinand, C., Hakamada, R., Stape, J. L., & Laclau, J. P. (2011). MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation biomass. *Remote sensing of Environment*, 115(10), 2613-2625.

Lines, E. R., Zavala, M. A., Purves, D. W., & Coomes, D. A. (2012). Predictable changes in aboveground allometry of trees along gradients of temperature, aridity and competition. *Global Ecology and Biogeography*, 21(10), 1017-1028.

Liu, Y., Yang, R., Sun, M., Zhang, L., Li, X., Meng, L., ... & Liu, Q. (2022). Regional sustainable development strategy based on the coordination between ecology and economy: A case study of Sichuan Province, China. *Ecological Indicators*, 134, 108445.

Lopes, A. S., & Cox, F. R. (1977). A survey of the fertility status of surface soils under "Cerrado" vegetation in Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, 41(4), 742-747.

Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Liu, L., Li, G., & Moran, E. (2016). A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*, 9(1), 63-105.

Macedo, F. L., Sousa, A. M. O., Gonçalves, A. C., Silva, H. R., & Rodrigues, R. A. F. (2017). Estimativa do volume de madeira para *Eucalyptus* sp. com imagens de satélite de alta resolução espacial. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, 45(114), 237-247. <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n114.01>.

Mafra, Á. L., Guedes, S. D. F. F., Klauberg Filho, O., Santos, J. C. P., Almeida, J. A. D., & Rosa, J. D. (2008). Carbono orgânico e atributos químicos do solo em áreas florestais. *Revista Árvore*, 32, 217-224.

Marín, S., Novák, M., Klančnik, K., & Gaberščik, A. (2016). Spectral signatures of conifer needles mainly depend on their physical traits. *Polish Journal of Ecology*, 64(1), 1-13.

Marschner, H. (Ed.). (2011). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Academic press.

Mattos, E. M., Binkley, D., Campoe, O. C., Alvares, C. A., & Stape, J. L. (2020). Variation in canopy structure, leaf area, light interception and light use efficiency among *Eucalyptus* clones. *Forest Ecology and Management*, 463, 118038.

Mavimbela, L. Z., Crous, J. W., Morris, A. R., & Chirwa, P. W. (2018). The importance of harvest residue and fertiliser on productivity of *Pinus patula* across various sites in their first, second and third rotations, at Usutu Swaziland. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 48(1), 1-14.

Mavimbela, L. Z., Crous, J. W., Morris, A. R., & Chirwa, P. W. (2018). The importance of harvest residue and fertiliser on productivity of *Pinus patula* across various sites in their first, second and third rotations, at Usutu Swaziland. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 48(1), 1-14.

Meiwes, K. J. (1995). Application of lime and wood ash to decrease acidification of forest soils. *Water, Air, and Soil Pollution*, [s. l.], 85(1), 143-152.

Meneghini, A., Rahimzadeh-Bajgiran, P., Livingston, W., & Weiskittel, A. (2022). Detecting white pine needle damage through satellite remote sensing. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 48(2), 239-257.

Mengel, K., Kirkby, E., 1982. *Principles of Plant Nutrition*, third ed. International Potash Institute, Bern, Switzerland, 655 pp

Mitchell, A. D., Loganathan, P., Payn, T. W., & Olykan, S. T. (2003). Magnesium and potassium fertilizer effects on foliar magnesium and potassium concentrations and upper mid-crown yellowing in *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science*, [s. l.], 33(2), 225-243.

Morales, C. A. S., Albuquerque, J. A., Almeida, J. A., Marangoni, J. M., Stahl, J., & Chaves, D. M. (2010). Qualidade do solo e produtividade de *Pinus taeda* no planalto catarinense. *Ciência Florestal*, Santa Maria, 20(4), 629-640. <https://doi.org/10.5902/198050982421>.

Moreira, A. (2007). Fertilidade, matéria orgânica e substâncias húmicas em solos antropogênicos da Amazônia Ocidental. *Bragantia*, 66, 307-315.

Moriwaki, T., Falcioni, R., Tanaka, F.A.O., Cardoso, K.A.K., Souza, L.A., Benedito, E., Nanni, M.R., Bonato, C.M., Antunes, W.C., 2019. Nitrogen-improved photosynthesis quantum yield is driven by increased thylakoid density, enhancing green light absorption. *Plant Sci.* 278, 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.PLANTSCI.2018.10.012>

Moro, L., Gatiboni, L.C., Simonete, M.A., Cassol, P.C., Chaves, D.M., 2014. Resposta de *pinus taeda* com diferentes idades `a adubação NPK no Planalto Sul Catarinense. *Rev. Brasileira Ciência do Solo* 38, 1181–1189. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400014>.

Motta, A. C. V., Barbosa, J. Z., Consalter, R., & Reissmann, C. B. (2014). Nutrição e adubação da cultura de *Pinus*. In Prado, R. M., Wadt, P. G. S. (Ed.). *Nutrição e adubação de espécies florestais e palmeiras*. Jaboticabal: FUNEP. pp. 383-426.

Moynier, F., & Fujii, T. (2017). Theoretical isotopic fractionation of magnesium between chlorophylls. *Scientific reports*, 7(1), 6973.

Munhoz, J.S.B., 2011. Caracterização da produtividade florestal e dos padrões de crescimento de *Pinus taeda* L. no sul do Brasil através de análise de tronco.

Dissertação. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 117p.

Myneni, R. B., Ramakrishna, R., Nemani, R., & Running, S. W. (1997). Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, 35(6), 1380-1393.

Oliveira, F. L., Garcia, J. N., & Florsheim, S. M. B. (2006). Propriedades da madeira de *Pinus taeda* L. em função da idade e da posição radial na tora. Properties of *Pinus taeda* L. wood in function of age and radial position in log. *Revista do Instituto Florestal*.

Oshunsanya, S. O., Oluwasemire, K. O., & Taiwo, O. J. (2017). Use of GIS to delineate site-specific management zone for precision agriculture. *Communications in soil science and plant analysis*, 48(5), 565-575.

Pavan, M. A., Bingham, F. T., & Pratt, P. F. (1985). Chemical and mineralogical characteristics of selected acid soils of the State of Paraná, Brazil. *Turrialba*; 35 (2): 131-139.

Pavinato, P. S., Pauletti, V., Motta, A. C. V., & Moreira, A. (2019). Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná

Pereira, M., Bassaco, M. V. M., Motta, A. C. V., Maeda, S., Prior, S. A., Marques, R., ... & Gomes, J. B. V. (2023). Influence of industrial forest residue applications on *Pinus taeda*: Soil, litter, growth, nutrition, and wood quality characteristics. *New Forests*, 54(1), 83-106.

Pereira, M., Bassaco, M. V. M., Motta, A. C. V., Maeda, S., Prior, S. A., Marques, R., ... & Gomes, J. B. V. (2023). Influence of industrial forest residue applications on *Pinus taeda*: Soil, litter, growth, nutrition, and wood quality characteristics. *New Forests*, 54(1), 83-106.

Pertille, C. T., Nicoletti, M. F. (2022). VOLUMETRIC MODELING OF *Pinus taeda* L. FROM ORBITAL IMAGES.

Pertille, C. T., Nicoletti, M. F., & Dobner Jr., M. (2023). Estimating the commercial volume of a *Pinus taeda* L. plantation using active and passive sensors.

Pertille, C. T., Nicoletti, M. F., Topanotti, L. R., & Stepka, T. F. (2019). Biomass quantification of *Pinus taeda* L. from remote optical sensor data. *Advances in Forestry Science*, 6(2), 603-610.

Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). "Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change." *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503-510].

Phillips, C., Stovall, J., Williams, H., & Farrish, K. (2021). Using the forestry reclamation approach for reclaimed surface mineland in the Western Gulf: Effects on *Pinus taeda* seedling growth and survival. *Forests*, 12(7), 845.

Pinto, C. B., Marques, R., Dalmaso, C. A., de Souza Kulmann, M. S., Deliberali, I., Schumacher, M. V., & de Oliveira Junior, J. C. (2023). Relationship between edaphoclimatic attributes and productivity of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in southern Brazil. *Forest Ecology and Management*, 544, 121162.

Potter, R. O., Carvalho, A. P., Fasolo, P. J., Bognola, I. A., Bhering, S. B., & Martorano, L. G. (2002). Caracterização dos solos do Município de Pirafó do Sul, PR.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. version 3.2. Open-Source Geospatial Foundation Project. 2023.

Quadros, L. P., Ducheiko, H. A. S., Maeda, S., Prior, S. A., Araújo, E. M., Gomes, J. B. V., ... & Motta, A. C. V. (2021). Effects of wood ash application on tree nutrition and soil dynamics in a *Pinus taeda* system. *Forest Science*, 67(5), 618-628.

Ralston, C. (1967). Recognition and mapping of site types for afforestation. In *FAO Word Symposium on man-made forest and their industrial importance*, Canberra (pp. 172-87).

Rautiainen, M., Lukeš, P., Homolova, L., Hovi, A., Pisek, J., & Möttus, M. (2018). Spectral properties of coniferous forests: A review of in situ and laboratory measurements. *Remote Sensing*, 10(2), 207.

Reinikainen, A., Veijalainen, H., Nousiainen, H., 1998. Puiden ravinnepuutokset—metsäntkasvattajan ravinneopas. The Finnish Forest Research Institute, Research Papers, 688, 44 pp.

Reissmann, C.B.; Abrao, H.R.S.; Brito, M.A.R. Efeito da Leira no crescimento, resistência a geada e níveis de N, P e K em *Eucalyptus Dumnii*, Maiden. *Rev. Set. Ciências Agrárias* 1991, 11, 121–125. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical research letters*, 32(8).

Rigatto, P. A., Dedecek, R. A., & Matos, J. L. M. D. (2004). Influência dos atributos do solo sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft. *Revista árvore*, 28, 267-273.

Rigatto, P. A., Dedecek, R. A., & Mattos, J. L. M. (2005). Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda*. *Revista Árvore*, 29, 701-709.

Roberts, D. A., Ustin, S. L., Ogunjemiyo, S., Greenberg, J., Dobrowski, S. Z., Chen, J., & Hinckley, T. M. (2004). Spectral and structural measures of northwest forest vegetation at leaf to landscape scales. *Ecosystems*, 7, 545-562.

Rodrigues, V. D. S., Motta, A. C. V., Barbosa, J. Z., Ercole, T. M., & Prior, S. A. (2023). Wood production and nutritional status of *Pinus taeda* L. in response to fertilization and liming: a meta-analysis of the Americas. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 16(4), 195.

Rodriguez, D. R. O. (2018). Propriedades da madeira de árvores de *Pinus taeda* L. com 17 anos de idade submetidas à fertilização com lodo compostado de fábrica de celulose por meio de análise de anéis de árvores (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. Obtido de

[https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-21082018175821/publico/Daigard\\_Ricardo\\_Ortega\\_Rodriguez\\_versao\\_revisada.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-21082018175821/publico/Daigard_Ricardo_Ortega_Rodriguez_versao_revisada.pdf)

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA Spec. Publ, 351(1), 309.

Ryan, M.G., Stape, J.L., Binkley, D., Fonseca, S., Loos, R.A., Takahashi, E.N., Silva, C.R., Silva, S.R., Hakamada, R.E., Ferreira, J.M., Lima, A.M.N., Gava, J.L., Leite, F.P., Andrade, H.B., Alves, J.M., Silva, G.G.C., 2010. Factors controlling Eucalyptus productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. For Ecol Manage 259, 1695–1703. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2010.01.013>.

Sass, A. L., Bassaco, M. V. M., Motta, A. C. V., Maeda, S., Barbosa, J. Z., Bognola, I. A., Bosco, J. V. G., Goularte, G. D., & Prior, S. A. (2020). Cellulosic industrial waste to enhance *Pinus taeda* nutrition and growth: a study in subtropical Brazil. *Scientia Forestalis*, [s. l.], 48(126), e3165 (1-16). <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.13>

Schneider, T., Bassaco, M. V. M., Batista, A. H., Pereira, M., Motta, A. C. V., & Reissmann, C. B. (2022). Avaliação dos micronutrientes no sistema serapilheira-solo-planta em floresta de *Pinus taeda* em decorrência de adubação e calagem. *Revista do Instituto Florestal*, 34(2), 134-147.

Schuchovski, M. S., Arce, J. E., & de Oliveira, E. B. (2019). Dominant height and site index for loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in two forestry clusters in the Southern Region of Brazil. *Scientia Forestalis*, (121), 92-104.

Sclifó Zucon, A. R., Pedreira, G. Q., Vargas Motta, A. C., Gotz, L. F., Maeda, S., Martins Bassaco, M. V., ... & de Oliveira Junior, J. C. (2022). Piling secondary subtropical forest residue: long-term impacts on soil, trees, and weeds. *Forests*, 13(8), 1183.

Scolforo, J. R. S., & do Amaral Machado, S. (1988). CURVAS DE ÍNDICE DE SÍTIO PARA PANTAÇÕES DE *Pinus taeda* NOS ESTADOS DO PARANÁ E SANTA CATARINA. *Floresta*, 18(1/2).

Sixel, R. M. D. M., Arthur Junior, J. C., Gonçalves, J. L. D. M., Alvares, C. A., Andrade, G. R. P., Azevedo, A. C., ... & Moreira, A. M. (2015). Sustainability of Wood Productivity of *Pinus Taeda* Based on Nutrient Export and Stocks in the Biomass and in the Soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39, 1416-1427.

Stahl, J., Angelo, A. C., Schumacher, M. V., de Souza, K. K. F., & Biernaski, F. A. (2017). Efeito da adubação fosfatada em *Pinus taeda* L. em Latossolo Vermelho na região de Telêmaco Borba, Paraná, Brasil. *Revista Ecologia e Nutrição Florestal-ENFLO*, 5(3), 78-86.

Stape, J.L., Binkley, D., Ryan, M.G., Fonseca, S., Loos, R.A., Takahashi, E.N., Silva, C.R., Silva, S.R., Hakamada, R.E., Ferreira, J.M.d.A., Lima, A.M.N., Gava, J.L., Leite, F.P., Andrade, H.B., Alves, J.M., Silva, G.G.C., Azevedo, M.R., 2010. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. *For Ecol Manage* 259 (9), 1684–1694. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2010.01.012>.

Stefano, E. di, Agyei, D., Njoku, E.N., Udenigwe, C.C., 2018. Plant RuBisCo: An Underutilized Protein for Food Applications. *J Am Oil Chem Soc* 95, 1063–1074. <https://doi.org/10.1002/AOCS.12104>.

Stutz, K. P., & Lang, F. (2023). Forest ecosystems create pedogenic patchworks through woody debris, trees, and disturbance. *Geoderma*, 429, 116246.

Sucre EB, Fox TR, 2009. Decomposing stumps influence carbon and nitrogen pools and fine-root distribution in soils. *For Ecol Manag* 258(10): 2242-2248. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.05.012>

Sumnall, M. J., Albaugh, T. J., Carter, D. R., Cook, R. L., Hession, W. C., Campoe, O. C., ... & Thomas, V. A. (2023). Estimation of individual stem volume and diameter from

segmented UAV laser scanning datasets in *Pinus taeda* L. plantations. *International Journal of Remote Sensing*, 44(1), 217-247.

Sun, O. J., & Payn, T. W. (1999). Magnesium nutrition and photosynthesis in *Pinus radiata*: clonal variation and influence of potassium. *Tree physiology*, [s. l.], 19(8), 535-540. <https://doi.org/10.1093/treephys/19.8.535>.

Testa, S., Soudani, K., Boschetti, L., & Mondino, E. B. (2018). MODIS-derived EVI, NDVI and WDRVI time series to estimate phenological metrics in French deciduous forests. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 64, 132-144.

Thomas, G. W. (1975). The relationship between organic matter content and exchangeable aluminum in acid soil. *Soil Science Society of America Journal*, 39(3), 591-591.

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150.

Tutua, S., Zhang, Y., Xu, Z., & Blumfield, T. (2019). Residue retention mitigated short-term adverse effect of clear-cutting on soil carbon and nitrogen dynamics in subtropical Australia. *Journal of Soils and Sediments*, 19, 3786-3796.

Verbruggen, N., & Hermans, C. (2013). Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. *Plant and soil*, 368, 87-99.

Waldhoff, G., Lussem, U., Bareth, G., 2017. Multi-data approach for remote sensing-based regional crop rotation mapping: a case study for the Rur catchment, Germany. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 61, 55-69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.04.009>.

Wang, F., Liu, X., Liu, X., Li, Y., & Wang, T. (2020, May). Spatial and Temporal changes in the Normalized Difference Vegetation Index and its Response to Climate

Change in Shaanxi Province, China. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 508, No. 1, p. 012121). IOP Publishing.

Watt, M. S., Pearse, G. D., Dash, J. P., Melia, N., & Leonardo, E. M. C. (2019). Application of remote sensing technologies to identify impacts of nutritional deficiencies on forests. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 149, 226-241.

Watzlawick, L. F., Kirchner, F. F., & Sanquetta, C. R. (2009). Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucária utilizando imagens do satélite IKONOS II. *Ciência florestal*, 19, 169-181.

Xie, K., Cakmak, I., Wang, S., Zhang, F., & Guo, S. (2021). Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants. *The Crop Journal*, [s. l.], 9(2), 249-256. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.10.005>.

Yang, H., Liu, T., Liu, C., Wang, J., Chen, K., Zhong, W., ... & Huang, S. (2013). Genetic parameters and efficiency of early selection for half rotation-aged growth and form traits in *Pinus taeda* in China. *Silvae Genet*, 62(1-6), 277-84.

Zhang, X., Chhin, S., Fu, L., Lu, L., Duan, A., & Zhang, J. (2019). Climate-sensitive tree height–diameter allometry for Chinese fir in southern China. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 92(2), 167-176.

Zhang, Y., Dai, P., Liu, R., Liu, W., Xiao, A., Li, J., ... & Liu, J. (2022). Rational engineering of phospholipase C from *Bacillus cereus* HSL3 for simultaneous thermostability and activity improvement. *Journal of Biotechnology*, 355, 1-9.

Zhao, Y. et al. Predicting wheat yield at the field scale by combining high-resolution Sentinel-2 satellite imagery and crop modelling. *Remote Sensing*, v. 12, n. 6, p. 1024, 2020.

Zheng, H., Cheng, T., Zhou, M., Li, D., Yao, X., Tian, Y., ... & Zhu, Y. (2019). Improved estimation of rice aboveground biomass combining textural and spectral analysis of UAV imagery. *Precision Agriculture*, 20, 611-629.

Zhu, Q., Vries, W., Liu, X., Zeng, M., Hao, T., Du, E., Zhang, F., & Shen, J. (2016). The contribution of atmospheric deposition and forest harvesting to forest soil acidification in China since 1980. *Atmospheric Environment*, [s. l.], 146, 215-222. <https://doi.org/10.1016/j.atmosen.2016.04.023>.

Zucon, A., Dominschek, R., & Motta, A. C. V. (2020). Can fertilization and liming affect the amount of litter and roots on *Pinus taeda* forest floor?. *Scientia Forestalis*, 48(128).

**APÊNDICE 1 - TABELA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO PROFUNDIDADE 0-20 CM PARTE 1 (TESTE T-STUDENT AO NÍVEL DE CONFIANÇA DE 95%)**

Ponto	pH	pH	Al	H+Al	Ca	Mg	K	P	CTC <sup>(t)</sup>	CTC <sub>ph7</sub>	C	N	C/N	m%	V%	
																CaCl2
<b>Média</b>	1VC	3,88 b	6,15 a	1,06 b	4,45 b	0,66 a	0,10 a	0,03 b	3,33 a	1,86 b	5,25 b	12,50 b	0,85 b	14,60 b	57,20 b	15,20 a
	1VE	4,03 b	5,17 b	2,5 a	9,32 a	0,72 a	0,10 a	0,04 a	4,95 a	3,37 a	10,20 a	55,40 a	2,39 a	23,30 a	73,30 a	8,77 b
<b>Desvio-padrão</b>		0,06	0,06	0,07	0,17	0,04	0,02	0	0,26	0,11	0,22	2,39	0,12	0,83	1,58	0,55
		0,04	0,29	0,75	1,91	0,06	0,02	0,01	1,52	0,72	1,87	24	1,03	2,71	5,8	1,84
<b>CV %</b>		1,58	0,95	6,27	3,89	6,2	20,11	9,52	7,9	5,75	4,27	19,12	13,73	5,7	2,76	3,64
		1,05	5,57	30,08	20,49	8,33	16,3	17,08	30,71	21,34	18,33	43,32	43,1	11,63	7,91	20,98
<b>Média</b>	2VC	4,01 a	5,66 a	1,56 b	6,72 a	0,75 a	0,10 a	0,03 a	4,75 a	2,45 b	7,61 a	16,30 b	1,06 b	15,20 b	63,40 a	12,00 a
	2VE	3,85 a	5,27 a	2,20 a	8,82 a	0,82 a	0,12 a	0,03 a	6,76 a	3,18 a	9,81 a	35,20 a	1,84 a	19,20 a	69,00 a	10,20 b
<b>Desvio-padrão</b>		0,04	0,32	0,3	1,61	0,05	0,02	0,01	1,61	0,33	1,65	4,13	0,18	1,84	4,19	1,95
		0,28	0,26	0,28	1,81	0,05	0,02	0	2,41	0,28	1,84	5,95	0,35	1,23	3,08	1,58
<b>CV %</b>		1,01	5,62	19,42	23,96	6,8	16,3	32,14	33,89	13,47	21,68	25,34	16,89	12,11	6,61	16,25
		7,32	4,88	12,86	20,52	5,91	13,58	9,5	35,65	8,93	18,76	16,9	19,08	6,41	4,46	15,49
<b>Média</b>	3VC	4,13 a	5,84 a	1,24 a	5,60 a	0,82 b	0,12 b	0,03 a	3,37 a	2,22 b	6,57 b	19,00 b	1,25 a	15,20 b	55,00 a	14,80 a
	3VE	4,13 a	5,21 b	2,08 a	11,80 a	1,28 a	0,15 a	0,09 a	8,42 a	3,62 a	13,30 a	45,00 a	2,09 a	21,70 a	57,00 a	12,90 a
<b>Desvio-padrão</b>		0,06	0,07	0,38	0,23	0,06	0,02	0	0,97	0,32	0,16	3,35	0,17	0,87	9,76	1,41
		0,18	0,35	0,77	5,33	0,52	0,06	0,08	7,12	1,05	5,26	14,2	0,75	1,36	12,2	6,26
<b>CV %</b>		1,47	1,15	30,89	4,13	6,73	16,61	12,87	28,69	14,37	2,48	17,63	13,68	5,72	17,75	9,53
		4,31	6,74	36,78	45,17	40,7	40	86,81	84,56	29,01	39,55	31,56	35,79	6,27	21,4	48,53
<b>Média</b>	4VC	3,71 a	6,15 a	1,10 b	4,65 b	0,81 b	0,11 b	0,02 b	3,11 a	2,08 b	5,64 b	17,80 a	1,10 b	15,30 a	51,20 a	17,90 a
	4VE	3,71 a	4,98 b	1,99 a	10,80 a	1,11 a	0,13 a	0,04 a	3,93 a	3,28 a	12,10 a	29,90 a	1,65 a	18,00 a	60,40 a	10,90 b
<b>Desvio-padrão</b>		0,06	0,35	0,43	1,11	0,05	0,01	0	0,52	0,47	1,15	9,16	0,39	3,15	9,05	2,93
		0,06	0,29	0,3	2,16	0,03	0,01	0,01	0,81	0,36	2,21	6,74	0,21	2,3	2,64	1,63
<b>CV %</b>		1,5	5,72	39,27	23,87	6,23	9,52	14,42	16,62	22,6	20,39	51,46	35,27	20,59	17,68	16,37
		1,5	5,72	15,28	20	2,98	8,85	20,37	20,71	10,82	18,26	22,54	12,91	12,78	4,37	14,95

FONTE: A autora (2024).

**APÊNDICE 2 - TABELA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO PROFUNDIDADE 0-20 CM PARTE 2 (TESTE T-STUDENT AO NÍVEL DE CONFIANÇA DE 95%)**

Ponto	pH	pH	Al	H+Al	Ca	Mg	K	P	CTC <sup>(t)</sup>	CTC <sub>ph7</sub>	C	N	C/N	m%	V%	
																CaCl2
<b>Média</b>	5VC	4,08 a	5,71 a	1,19 a	6,13 a	0,93 b	0,11 a	0,03 a	4,14 b	2,27 a	7,20 a	23,50 a	1,44 a	16,30 a	49,90 a	15,00 a
	5VE	4,02 a	5,75 a	1,55 a	6,03 b	1,18 a	0,12 a	0,02 a	6,72 a	2,88 a	7,35 a	22,50 a	1,31 a	17,10 a	53,20 a	18,60 a
<b>Desvio-padrão</b>		0,01	0,12	0,53	0,54	0,05	0,01	0	1,06	0,51	0,54	2,37	0,08	1,08	15,5	1,53
		0,12	0,34	0,43	1,49	0,01	0,01	0,01	1,24	0,45	1,51	5,54	0,32	0,55	6,3	3,5
<b>CV %</b>		0,2	2,03	44,2	8,78	5,85	10,45	12,87	25,6	22,29	7,46	10,09	5,34	6,63	31,06	10,2
		2,99	5,98	28	24,71	1,02	8,7	24,01	18,45	15,52	20,54	24,62	24,58	3,23	11,84	18,82
<b>Média</b>	6VC	4,10 a	4,65 a	1,60 b	6,05 b	0,94 b	0,12 a	0,03 a	2,58 b	2,71 b	7,16 b	17,00 b	1,04 b	16,10 b	58,00 b	16,10 a
	6VE	3,80 b	4,65 a	3,62 a	13,80 a	1,18 a	0,17 a	0,04 a	7,63 a	5,02 a	15,20 a	58,70 a	2,71 a	22,00 a	70,90 a	9,48 b
<b>Desvio-padrão</b>		0,02	0,28	0,51	1,61	0,06	0	0	0,96	0,51	1,59	5,33	0,26	1,68	7,28	3,32
		0,09	0,28	1,26	2,81	0,11	0,07	0,01	1,52	1,24	2,79	23,7	1,07	3,96	7,47	2,04
<b>CV %</b>		0,6	6,11	32,06	26,61	6,35	0	14,19	37,36	18,86	22,21	31,35	24,52	10,43	12,55	20,62
		2,48	6,11	34,81	20,36	8,98	40,06	24,76	19,92	24,7	18,36	40,37	39,48	18	10,54	21,52
<b>Média</b>	7VC	4,15 a	4,79 a	3,34 a	12,70 a	0,93 b	0,15 a	0,06 a	7,67 a	4,50 a	13,80 a	44,70 a	2,19 a	20,40 a	74,20 a	8,44 b
	7VE	4,18 a	4,98 a	2,63 a	10,80 a	1,21 a	0,14 a	0,06 a	6,43 a	4,05 a	12,20 a	56,70 a	2,77 a	20,20 a	63,90 b	11,80 a
<b>Desvio-padrão</b>		0,03	0,13	0,34	1,22	0,06	0,01	0,01	2,21	0,31	1,17	4,66	0,19	0,43	2,7	1,07
		0,16	0,24	0,88	1,75	0,05	0	0,01	1,28	0,93	1,81	16,6	0,68	1,11	6,54	1,42
<b>CV %</b>		0,6	2,69	10,21	9,61	6,08	7,67	17,8	28,81	6,96	8,48	10,43	8,58	2,09	3,64	12,68
		3,8	4,8	33,57	16,2	3,91	0	18,87	19,91	22,89	14,84	29,28	24,62	5,5	10,23	12,03

FONTE: A autora (2024).

**APÊNDICE 3 - TABELA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO PROFUNDIDADE 0-20 CM PARTE 3 (TESTE T-STUDENT AO NÍVEL DE CONFIANÇA DE 95%)**

Ponto	pH	pH	Al	H+Al	Ca	Mg	K	P	CTC(t)	CTC <sub>pH7</sub>	C	N	C/N	m%	V%	
																CaCl <sub>2</sub>
<b>Média</b>	8VC	4,21 a	5,51 a	1,71 a	7,25 b	0,93 b	0,12 b	0,03 b	3,47 b	2,79 b	8,33 b	24,60 b	1,48 a	16,50 b	61,00 a	13,00 a
	8VE	3,94 b	4,88 b	2,45 a	11,80 a	1,21 a	0,14 a	0,04 a	11,40 a	3,85 a	13,20 a	33,00 a	1,63 a	20,20 a	62,50 a	10,80 a
<b>Desvio-padrão</b>		0,05	0,14	0,32	0,8	0,03	0,01	0	0,43	0,3	0,8	5,41	0,19	1,76	4,9	1,24
		0,11	0,2	0,75	1,64	0,04	0	0,01	4,27	0,74	1,61	3,48	0,13	0,84	8,17	1,61
<b>CV %</b>		1,09	2,45	18,71	11,06	2,92	8,7	15,87	12,31	10,61	9,59	21,99	13,04	10,67	8,03	9,54
		2,72	4,08	30,65	13,9	2,97	0	16,31	37,46	19,09	12,2	10,55	8,16	4,15	13,07	14,91
<b>Média</b>	9VC	4,08 a	5,76 a	1,44 b	5,90 b	1,01 a	0,11 a	0,03 a	6,72 a	2,61 b	7,06 b	12,20 b	0,84 b	14,60 b	55,10 a	16,50 a
	9VE	3,91 b	5,12 b	2,31 a	9,78 a	0,93 b	0,11 a	0,03 a	9,25 a	3,40 a	10,90 a	30,20 a	1,67 a	17,90 a	67,90 b	10,10 b
<b>Desvio-padrão</b>		0,04	0,08	0,25	0,38	0,11	0,01	0	4,22	0,32	0,44	1,45	0,05	1,16	3,67	1,3
		0,06	0,16	0,35	1,19	0,05	0,01	0,01	2,51	0,34	1,18	7,49	0,32	1,24	3,79	1,33
<b>CV %</b>		0,91	1,43	17,15	6,49	10,5	10,45	10,9	62,8	12,34	6,18	11,89	5,48	7,95	6,66	7,88
		1,44	3,16	15,24	12,17	5,43	10,45	24,83	27,14	10,09	10,83	24,8	19,1	6,93	5,58	13,17

FONTE: A autora (2024).

**APÊNDICE 4 - TABELA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO PROFUNDIDADE 20-40 CM PARTE 1 (TESTE T-STUDENT AO NÍVEL DE CONFIANÇA DE 95%)**

Ponto	pH	pH	AI	H+Al	Ca	Mg	K	P	CTC <sup>(t)</sup>	CTC <sub>pH7</sub>	C	N	C/N	m%	V%
<b>1VC</b>	4,13 a	6,58 a	0,61 b	3,00 b	0,74 a	0,13 a	0,02 b	3,50 a	1,50 b	3,89 b	6,99 b	0,73 b	9,61 b	40,30 a	22,90 a
<b>1VE</b>	4,12 a	6,00 b	1,21 a	5,15 a	0,77 a	0,11 a	0,03 a	3,88 a	2,12 a	6,06 a	19,40 a	1,06 a	18,20 a	56,60 b	15,60 b
<b>Desvio-padrão</b>	0,02	0,06	0,09	0	0,06	0,06	0	1,06	0,21	0,12	0,99	0,09	0,83	1,62	2,35
<b>CV %</b>	0,12	0,35	0,24	1,52	0,05	0,01	0,01	0,62	0,28	1,57	5,2	0,16	2,4	3,8	2,91
<b>2VC</b>	0,54	0,86	14,88	0	7,94	51,2	8,86	30,29	13,8	3,14	14,11	11,87	8,68	4,02	10,26
<b>2VE</b>	3,01	5,77	19,83	29,51	6,16	10,45	18,19	15,93	13,25	25,91	26,8	14,62	13,19	6,71	18,65
<b>Média</b>	4,14 a	6,43 a	0,81 a	3,63 a	0,77 b	0,09 b	0,02 a	2,85 a	1,69 b	4,51 b	8,50 a	0,73 a	11,70 b	47,70 a	19,60 a
<b>Desvio-padrão</b>	4,18 a	6,11 a	1,06 a	4,70 a	0,93 a	0,13 a	0,02 a	4,08 a	2,15 a	5,79 a	14,30 a	0,92 a	15,20 a	48,80 a	19,40 a
<b>CV %</b>	0,01	0,04	0,09	0,15	0,04	0,01	0	0,5	0,12	0,19	0,66	0,03	0,55	2,19	0,51
<b>3VC</b>	0,09	0,3	0,25	1	0,07	0,03	0,01	2,38	0,19	0,95	5,31	0,22	2,33	7,66	4,3
<b>3VE</b>	0,3	0,68	10,92	4,13	5,39	12,78	0	17,54	7,28	4,3	7,75	3,96	4,74	4,59	2,6
<b>Média</b>	2,23	4,83	23,68	21,28	6,98	19,85	28,44	58,33	8,84	16,41	37,13	23,91	15,33	15,7	22,16
<b>Desvio-padrão</b>	4,31 a	6,40 a	0,52 b	3,70 a	0,81 b	0,10 a	0,02 b	2,94 a	1,45 b	4,63 a	11,50 a	0,96 a	12,00 a	35,60 a	20,30 a
<b>CV %</b>	4,08 a	6,23 a	0,82 a	4,25 a	1,07 a	0,11 a	0,03 a	2,76 a	2,04 a	5,47 a	13,50 a	0,96 a	14,10 a	39,60 a	22,70 a
<b>Desvio-padrão</b>	0,03	0,17	0,09	0,42	0,05	0	0	0,95	0,07	0,43	0,92	0,06	1,47	4,97	1,95
<b>CV %</b>	0,46	0,21	0,2	0,7	0,06	0,01	0	0,46	0,14	0,65	2,72	0,17	1,96	7	3,77
<b>Desvio-padrão</b>	0,79	2,59	17,69	11,46	6,23	0	0	32,41	4,84	9,31	7,97	5,96	12,25	13,96	9,61
<b>CV %</b>	11,35	3,34	24,29	16,47	5,8	10,45	4,44	16,7	6,91	11,79	20,15	17,34	13,9	17,68	16,61

FONTE: A autora (2024).

**APÊNDICE 5 - TABELA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO PROFUNDIDADE 20-40 CM PARTE 2 (TESTE T-STUDENT AO NÍVEL DE CONFIANÇA DE 95%)**

Ponto	pH	pH	Al	H+Al	Ca	Mg	K	P	CTC <sup>(t)</sup>	CTC <sub>pH7</sub>	C	N	C/N	m%	V%
<b>Média</b>	4VC	4,25 a 6,43 a	0,62 b 3,60 b	0,89 b 0,12 a	0,02 b 3,10 a	1,66 b 4,64 b	12,80 b 0,88 b	14,10 b 37,00 b	22,70 a						
	4VE	4,07 b 5,84 b	1,26 a 5,72 a	1,15 a 0,12 a	0,03 a 2,98 a	2,56 a 7,03 a	21,90 a 1,25 a	17,40 a 49,00 a	19,20 a						
<b>Desvio-padrão</b>		0,07 0,23	0,17 0,67	0,03 0,02	0 1,2	0,2 0,7	5,07 0,22	2,25 5,85	2,56						
		0,1 0,35	0,22 1,49	0,08 0,01	0 0,46	0,19 1,5	3,58 0,17	0,56 5,51	4,15						
<b>CV %</b>		1,71 3,55	27,65 18,69	2,82 13,58	15,24 38,71	12,17 15,04	39,61 24,69	15,96 15,81	11,28						
		2,51 6,01	17,22 26,05	7,21 8,7	13,95 15,34	7,34 21,34	16,35 13,36	3,22 11,24	21,61						
<b>Média</b>	5VC	4,25 a 6,22 a	0,71 b 4,35 a	0,93 b 0,12 a	0,02 a 3,94 a	1,78 b 5,43 a	13,00 a 1,01 a	12,90 a 39,40 a	20,90 a						
	5VE	4,27 a 6,44 a	0,94 a 3,65 a	1,14 a 0,12 a	0,02 b 4,92 a	2,22 a 4,93 a	13,90 a 0,91 a	15,00 a 42,00 a	26,20 a						
<b>Desvio-padrão</b>		0,03 0,46	0,11 1,62	0,04 0,01	0 1,13	0,1 1,66	0,59 0,09	0,99 4,11	4,86						
		0,09 0,17	0,14 0,48	0,03 0	0 1,91	0,14 0,48	5,45 0,17	2,91 3,67	2,57						
<b>CV %</b>		0,62 7,43	15,18 37,24	4,59 8,7	6,79 28,68	5,84 30,57	4,55 9,09	7,69 10,43	23,25						
		2,03 2,7	14,61 13,15	2,43 0	14,16 38,82	6,13 9,7	39,21 18,96	19,4 8,74	9,81						
<b>Média</b>	6VC	4,00 a 5,93 a	1,03 b 5,38 a	0,93 b 0,11 a	0,02 a 3,50 b	2,10 b 6,45 a	10,50 b 0,76 b	13,50 b 48,20 a	17,50 a						
	6VE	4,00 a 5,50 a	1,43 a 7,30 a	1,20 a 0,12 a	0,03 a 4,78 a	2,79 a 8,66 a	27,30 a 1,41 a	19,30 a 51,30 a	15,90 a						
<b>Desvio-padrão</b>		0,17 0,41	0,3 1,73	0,04 0,01	0 0,47	0,3 1,71	3,61 0,17	2,38 8,4	4,33						
		0,04 0,18	0,09 1,11	0,03 0	0 0,51	0,07 1,09	5,14 0,25	0,99 2,12	2,47						
<b>CV %</b>		4,18 6,98	29,22 32,16	3,83 10,45	13,57 33,4	14,43 26,51	34,38 22,46	17,63 17,43	24,74						
		0,96 3,31	6,42 15,21	2,25 0	14,18 10,59	2,44 12,59	18,83 17,45	5,15 4,13	15,53						

FONTE: A autora (2024).

**APÊNDICE 6 - TABELA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO PROFUNDIDADE 20-40 CM PARTE 3 (TESTE T-STUDENT AO NÍVEL DE CONFIANÇA DE 95%)**

Ponto	pH	pH	AI	H+Al	Ca	Mg	K	P	CTC <sup>(t)</sup>	CTC <sub>pH7</sub>	C	N	C/N	m%	V%	
																CaCl2
<b>Média</b>	7VC	4,30 a	5,11 a	2,32 a	9,70 a	0,92 a	0,15 a	0,04 a	6,05 a	3,44 a	10,80 a	38,90 a	1,93 b	20,10 a	67,50 a	10,30 a
	7VE	4,41 a	5,25 a	1,85 b	8,90 a	1,12 a	0,12 a	0,04 a	4,47 a	3,13 a	10,20 a	44,60 a	2,37 a	18,80 a	59,40 a	12,70 a
<b>Desvio-padrão</b>		0,06	0,03	0,14	0	0,05	0,01	0,01	3,57	0,11	0,04	1,82	0,12	0,43	2,02	0,32
		0,12	0,34	0,26	2,33	0,28	0,04	0	1,12	0,43	2,55	8,53	0,28	1,52	7,36	2,41
<b>CV %</b>		1,49	0,61	5,99	0	5,27	7,67	14,39	59,01	3,08	0,36	4,68	5,96	2,14	2,99	3,11
		2,7	6,46	13,95	26,18	25,27	32,96	6,88	25,06	13,87	25	19,13	11,9	8,09	12,39	18,98
<b>Média</b>	8VC	4,23 a	5,90 a	1,38 a	5,53 b	0,95 b	0,10 a	0,02 a	4,39 a	2,46 a	6,60 b	14,70 a	0,98 a	15,00 b	55,30 a	16,40 a
	8VE	4,17 a	5,55 b	1,60 a	7,00 a	1,26 a	0,14 a	0,02 a	3,71 a	3,02 a	8,42 a	17,40 a	1,02 a	17,20 a	52,40 a	17,00 a
<b>Desvio-padrão</b>		0,04	0,18	0,45	0,81	0,08	0,01	0	1,08	0,53	0,88	2,21	0,14	0,46	5,85	1,05
		0,07	0,15	0,4	0,85	0,12	0,03	0	0,48	0,38	0,86	1,82	0,16	1,4	7,03	2,23
<b>CV %</b>		0,98	3,02	32,75	14,58	8,66	10,53	9,05	24,6	21,42	13,38	15,03	14,18	3,07	10,58	6,4
		1,63	2,77	25	12,13	9,37	25,33	5,71	12,96	12,48	10,24	10,46	15,88	8,14	13,42	13,12
<b>Média</b>	9VC	4,22 a	6,33 a	0,83 a	3,92 b	0,92 a	0,10 a	0,02 a	5,09 a	1,88 b	4,98 b	6,32 b	0,57 b	11,00 b	43,90 a	21,30 a
	9VE	4,09 b	5,77 b	1,27 b	5,90 a	1,12 a	0,11 a	0,03 a	3,80 a	2,54 a	7,17 a	18,40 a	1,19 a	15,50 a	50,20 a	17,70 a
<b>Desvio-padrão</b>		0,03	0,13	0,1	0,38	0,07	0,03	0,01	3,8	0,08	0,28	1,37	0,04	1,72	4,81	3,29
		0,05	0,07	0,16	0,38	0,17	0,01	0,01	0,65	0,11	0,4	2,5	0,16	0,31	6,14	2,32
<b>CV %</b>		0,7	2,1	12,1	9,62	7,38	28,3	31,77	74,66	4,29	5,62	21,68	6,96	15,64	10,96	15,45
		1,1	1,19	12,52	6,49	15,09	10,45	27,75	17,16	4,49	5,55	13,59	13,61	1,99	12,23	13,11

FONTE: A autora (2024).

**APÊNDICE 7 - TABELA DE ANÁLISE DA MASSA DE SERAPILHEIRA PARTE 1  
(TESTE T-STUDENT AO NÍVEL DE CONFIANÇA DE 95%)**

	Ponto	Massa serapilheira grosseira t ha <sup>-1</sup>	Massa serapilheira fração fina t ha <sup>-1</sup>
<b>Média</b>	<b>1VC</b>	43,40 b	21,00 b
	<b>1VE</b>	69,20 a	28,80 a
<b>Desvio-padrão</b>		14,2	5,07
		9,51	1,44
<b>CV%</b>		32,72	24,14
		13,74	5
<b>Média</b>	<b>2VC</b>	122,00 a	25,80 a
	<b>2VE</b>	119,00 a	43,30 a
<b>Desvio-padrão</b>		16,3	5,28
		16,8	15,3
<b>CV%</b>		13,36	20,47
		14,12	35,33
<b>Média</b>	<b>3VC</b>	52,50 a	32,60 a
	<b>3VE</b>	67,50 a	33,30 a
<b>Desvio-padrão</b>		12,6	12,2
		25,4	5,8
<b>CV%</b>		24	37,42
		37,63	17,42
<b>Média</b>	<b>4VC</b>	100,00 a	42,20 b
	<b>4VE</b>	148,00 a	90,60 a
<b>Desvio-padrão</b>		44,1	10,5
		57,4	32,8
<b>CV%</b>		44,1	24,88
		38,78	36,2
<b>Média</b>	<b>5VC</b>	79,10 a	41,30 a
	<b>5VE</b>	65,60 a	40,90 a
<b>Desvio-padrão</b>		23,6	9,92
		18,6	16,6
<b>CV%</b>		29,84	24,02
		28,35	40,59

FONTE: A autora (2024).

**APÊNDICE 8 - TABELA DE ANÁLISE DA MASSA DE SERAPILHEIRA PARTE 2  
(TESTE T-STUDENT AO NIVEL DE CONFIANÇA DE 95%)**

	Ponto	Massa serapilheira grosseira t ha <sup>-1</sup>	Massa serapilheira fração fina t ha <sup>-1</sup>
<b>Média</b>	<b>6VC</b>	78,80 b	42,30 a
	<b>6VE</b>	125,00 s	28,30 a
<b>Desvio-padrão</b>		9,52	12,2
		22,8	12,8
<b>CV%</b>		12,08	28,84
		18,24	45,23
<b>Média</b>	<b>7VC</b>	51,60 a	40,80 a
	<b>7VE</b>	43,10 a	32,50 a
<b>Desvio-padrão</b>		3,13	4,96
		9,49	5,97
<b>CV%</b>		6,07	12,16
		22,02	18,37
<b>Média</b>	<b>8VC</b>	70,30 a	45,30 a
	<b>8VE</b>	110,00 a	65,50 a
<b>Desvio-padrão</b>		22,9	11,2
		35,8	13,5
<b>CV%</b>		32,57	24,72
		32,55	20,61
<b>Média</b>	<b>9VC</b>	70,90 b	52,20 b
	<b>9VE</b>	204,00 a	80,40 a
<b>Desvio-padrão</b>		16,8	9,21
		39,8	19,8
<b>CV%</b>		23,7	17,64
		19,51	24,63

FONTE: A autora (2024).

**APÊNDICE 9 - TABELA DE ANÁLISE DOS DADOS DENDROMÉTRICOS PARTE  
1 (TESTE T-STUDENT AO NÍVEL DE CONFIANÇA DE 95%)**

	Ponto Amostral	Altura (m)	Cubagem Hohenadl m <sup>3</sup>	DAP (cm)
<b>Média</b>	<b>1VC</b>	10,00 b	0,03 b	11,70 b
	<b>1VE</b>	14,90 a	0,09 a	18,40 a
<b>Desvio-padrão</b>		1,91	0,02	5,06
		1,44	0,06	7,22
<b>CV%</b>		19,1	81,58	43,25
		9,66	64,61	39,24
<b>Média</b>	<b>2VC</b>	9,16 b	0,03 a	13,30 b
	<b>2VE</b>	14,20 a	0,09 b	19,80 a
<b>Desvio-padrão</b>		1,12	0,01	2,27
		1,29	0,02	3
<b>CV%</b>		12,23	42,16	17,07
		9,08	25,23	15,15
<b>Média</b>	<b>3VC</b>	9,25 b	0,03 b	15,40 a
	<b>3VE</b>	14,90 a	0,09 a	18,80 a
<b>Desvio-padrão</b>		1,88	0,01	2,08
		1,31	0,05	5,65
<b>CV%</b>		20,32	26,52	13,51
		8,79	54,57	30,05
<b>Média</b>	<b>4VC</b>	9,75 b	0,03 b	13,50 b
	<b>4VE</b>	13,70 a	0,10 a	21,50 a
<b>Desvio-padrão</b>		1,53	0,02	4,42
		2,25	0,05	4,43
<b>CV%</b>		15,69	63,58	32,74
		16,42	45,67	20,6

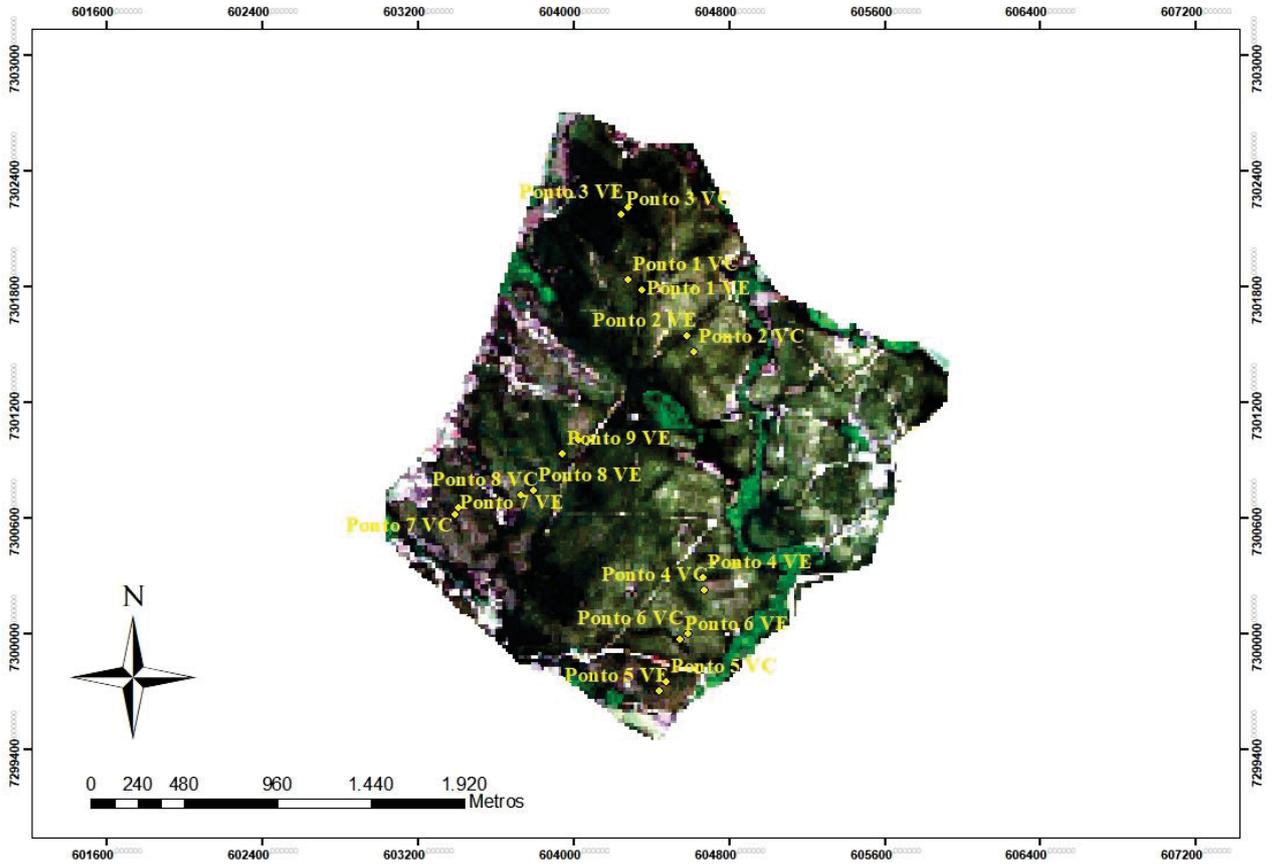
FONTE: A autora (2024).

**APÊNDICE 10 - TABELA DE ANÁLISE DOS DADOS DENDROMÉTRICOS PARTE  
2 (TESTE T-STUDENT AO NÍVEL DE CONFIANÇA DE 95%)**

	Ponto Amostral	Altura (m)	Cubagem Hohenadl m <sup>3</sup>	DAP (cm)
<b>Média</b>	<b>5VC</b>	8,33 b	0,03 b	13,50 b
	<b>5VE</b>	15,50 a	0,12 a	21,70 a
<b>Desvio-padrão</b>		1,67	0,02	3,56
		1,02	0,05	4,13
<b>CV%</b>		20,05	90,18	26,37
		6,58	38,15	19,03
<b>Média</b>	<b>6VC</b>	6,38 b	0,01 b	11,00 b
	<b>6VE</b>	14,40 a	0,10 a	20,20 a
<b>Desvio-padrão</b>		1,82	0,01	2,36
		1,88	0,04	3,2
<b>CV%</b>		28,53	61,11	21,45
		13,06	38,39	15,84
<b>Média</b>	<b>7VC</b>	11,00 b	0,10 a	23,30 a
	<b>7VE</b>	17,30 a	0,14 a	22,60 a
<b>Desvio-padrão</b>		2,53	0,05	4,07
		1,14	0,05	4,01
<b>CV%</b>		23	46,79	17,47
		6,59	36,76	17,74
<b>Média</b>	<b>8VC</b>	8,68 b	0,04 b	16,00 b
	<b>8VE</b>	15,70 a	0,13 a	22,10 a
<b>Desvio-padrão</b>		1,7	0,03	5,66
		1,03	0,05	4,92
<b>CV%</b>		19,59	66,83	35,38
		6,56	38,96	22,26
<b>Média</b>	<b>9VC</b>	9,76 b	0,01 b	5,59 b
	<b>9VE</b>	15,20 a	0,07 a	16,00 a
<b>Desvio-padrão</b>		2,22	0	1,31
		1,38	0,04	5,66
<b>CV%</b>		22,75	64,81	23,43
		9,08	60,98	35,38

FONTE: A autora (2024).

### APÊNDICE 11 - MAPA DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM- IMAGEM DO SATELITE SENTINEL-2



FONTE: A autora (2024).