

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS FREDERICO WESTPHALEN
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL

Lincon de Souza

**INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS
FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO NO DESENVOLVIMENTO DE
CLONES DE *Pinus taeda* L.**

Frederico Westphalen, RS

2022

Lincon de Souza

INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO NO DESENVOLVIMENTO DE CLONES DE *Pinus taeda* L.

Trabalho de Conclusão de Curso II (TCC II), apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria, Campus Frederico Westphalen (RS) com requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Orientador: Prof^o Dr. Edison Rogério Perrando

Frederico Westphalen, RS

2022

Lincon de Souza

INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO NO DESENVOLVIMENTO DE CLONES DE *Pinus taeda* L.

Trabalho de Conclusão de Curso II (TCC II), apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria, Campus Frederico Westphalen (RS) com requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Aprovado em 12 de agosto de 2022:

**Edison Rogério Perrando, Prof^o Dr. (UFSM FW)
(Orientador)**

Magda Lea Bolzan Zanon, Prof^a Dra. (UFSM FW)

Adriana Maria Griebeler, Prof^a Msc. (UFRA)

Frederico Westphalen, RS

2022

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por todo apoio e amor concedido em momentos que necessitei, não apenas com palavras, mas também, através de boas energias enviadas de um lugar melhor, que me mantiveram firme para continuar e finalizar esta etapa.

Ao orientador e amigo, professor Dr. Edison Rogério Perrando, pela amizade, pelos conselhos e ensinamentos transmitidos, de forma pacienciosa e com sabedoria, durante todo o período de realização deste trabalho. Foi um prazer enorme trabalhar junto com o professor.

A Universidade Federal de Santa Maria campus Frederico Westphalen e ao departamento de Engenharia Florestal.

Aos amigos e colegas do estágio, Eng. Florestal Bruno Conte, Eng. Florestal Juliana Tramontina e a Equipe de Inventário (Donizete, Evandro, Jaison e Leandro), pela amizade, conhecimento repassado e por todo o auxílio prestado durante a execução da parte de coleta e análise dos dados.

Ao amigo e Eng. Florestal Vlademir Martarello da empresa Adami S/A pela oportunidade e concessão do estágio supervisionado.

E, a todas as amizades construídas neste período da graduação e do estágio.

Muito obrigado!!

RESUMO

INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO NO DESENVOLVIMENTO DE CLONES DE *Pinus taeda* L.

AUTOR: Lincon de Souza

ORIENTADOR: Profº Dr. Edison Rogério Perrando

O Brasil apresenta extensas áreas cultivadas com espécies do gênero *Pinus*, as quais concentram-se principalmente nas regiões Sul e Sudeste do país. Diante deste cenário, torna-se imprescindível a utilização de técnicas de Sensoriamento Remoto, em conjunto com Sistemas de Informações Geográficas (SIG), para gerir e analisar informações e auxiliar na tomada de decisão afim de adotar o melhor manejo em áreas de plantios florestais. A geoestatística é uma importante ferramenta de processamento de dados, pois visa mensurar as propriedades e as relações entre estas, considerando a localização espacial do fenômeno em estudo e, ainda, por meio da técnica de Krigagem, busca prever valores em locais onde não foram coletadas informações através da interpolação de dados. Isto permite a geração de mapas temáticos, que tem como finalidade a análise e interpretação de valores geoespacializados de determinado fenômeno. Portanto, o presente estudo tem como objetivo, a partir da coleta de informações em pontos georreferenciados a respeito do desenvolvimento de indivíduos clonais (variáveis dendrométricas) e características do solo (variáveis edáficas), mensurar o crescimento volumétrico dos indivíduos em diferentes regimes espaciais, analisar a variabilidade espacial dos atributos do solo e gerar mapas temáticos destes a partir da técnica geoestatística de Krigagem e, analisar a influência das características edáficas na produtividade do plantio florestal. Realizou-se a coleta de informações dendrométricas e edáficas em pontos amostrais distribuídos sobre a área de estudo, posteriormente, estas foram processadas e analisadas com o auxílio de um SIG possibilitando a elaboração de mapas temáticos. Para a obtenção de informações volumétricas foi utilizado o método de cubagem rigorosa destrutiva. Foram utilizados modelos volumétricos e de afilamento do fuste para estimar o volume do plantio e classifica-lo em sortimentos, respectivamente. Os resultados do presente estudo mostram, através de mapas temáticos, que há variabilidade espacial de atributos químicos e físicos no solo da área do experimento, exceto para os teores de cálcio, e também, que há variabilidade para o desenvolvimento volumétrico dos indivíduos clonais e seminais presentes na área. Atributos físicos, como profundidade e teor de argila no solo, evidenciaram maior influência sobre o desenvolvimento dos indivíduos de *Pinus taeda* L. comparados aos atributos químicos. Os sortimentos obtidos para cada clone e seminal, em número de toras e volume ha^{-1} , apresentaram diferenças não só pelo desenvolvimento dos indivíduos, mas também pelo número de árvores em função dos diferentes arranjos espaciais adotados no experimento.

Palavras-chave: SIG. Geoestatística. Krigagem. Atributos do solo. Sortimento. Produtividade Clonal.

ABSTRACT

INFLUENCE OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF PHYSICAL AND CHEMICAL ATTRIBUTES OF THE SOIL ON THE DEVELOPMENT OF CLONES OF *Pinus taeda* L.

AUTHOR: Lincon de Souza

ADVISOR: Prof^o Dr. Edison Rogério Perrando

Brazil has extensive areas of cultivation of the *Pinus* genus, concentrated mainly in the South and Southeast regions of the country, and for this reason it is essential to use Remote Sensing techniques, together with Geographic Information Systems (GIS), to manage and analyze information and assist in decision making in order to adopt the best management in forest plantation areas. Geostatistics is an important data processing tool, as it aims to measure the properties and the relationships between them, considering the spatial location of the phenomenon about study and also through the Kriging technique, it seeks to predict values in places where information was not collected through data interpolation. This allows the elaboration of thematic maps whose purpose is the analysis and interpretation of geospatialized values of a given phenomenon. Therefore, the present study aims from the collection of information at georeferenced points about the development of clonal specimen (dendrometric variables) and soil characteristics (edaphic variables) to measure the volumetric growth of specimen in different spatial regimes, analyze the spatial variability of soil attributes and elaborate thematic maps of these from the geostatistical technique of Kriging and analyze the influence of edaphic characteristics on productivity planting forestry. Dendrometric and edaphic information was collected at sampling points distributed over the area, later this information was processed and analyzed with the aid of GIS enabling the elaboration of thematic maps. The obtain volumetric information, the rigorous destructive cubing method was used. Volumetric and stem tapers were used to estimate the planting volume and classify it into assortments, respectively. The results of the present study evinced through thematic maps, that there is spatial variability of chemical and physical attributes in the soil in the experiment area, excepted for the calcium content and also, that there is variability for the volumetric development of clonal and seminal specimen present in the area. Physical attributes such as depth and clay content in the soil evinced greater influence on the development of specimen of *Pinus taeda* L. compared to chemical attributes. The assortments obtained for each clone and seminal specimen in number of logs and volume ha⁻¹, evinced differences not only by the development of specimen but also by the number of trees doe to of different spatial formation adopted in the experiment.

Keywords: GIS. Geoestatistics. Kriging. Soil attributes. Assortments. Clonal productivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura e componentes de um semivariograma experimental.	19
Figura 2 - Localização da área de estudo no Município de Ponte Serrada – SC.	25
Figura 3 - Representação dos tratamentos que compreendem dois diferentes clones e diferentes espaçamentos na área.	26
Figura 4 - Ilustração dos diferentes espaçamentos.	27
Figura 5 - Procedimento de coleta de solo (amostra composta) (A) e avaliação da compactação com penetrômetro digital (B) no interior da parcela de inventário florestal (IFC).	28
Figura 6 - Distribuição espacial de pontos de amostragem para levantamento de dados no estudo.	29
Figura 7 – Distribuição geoespacial do teor de Cálcio (cmolc dm^{-3}) no solo em plantio clonal de <i>Pinus taeda</i> no Município de Ponte Serrada, SC.	32
Figura 8 – Distribuição geoespacial do teor de Magnésio (cmolc dm^{-3}) no solo em plantio clonal de <i>Pinus taeda</i> no Município de Ponte Serrada, SC.	33
Figura 9 – Distribuição geoespacial do teor de potássio (g dm^{-3}) no solo em plantio clonal de <i>Pinus taeda</i> no Município de Ponte Serrada, SC.	34
Figura 10 – Distribuição geoespacial do teor de Fósforo (mg dm^{-3}) no solo em plantio clonal de <i>Pinus taeda</i> no Município de Ponte Serrada, SC.	36
Figura 11 – Distribuição geoespacial dos teores de argila (%) no solo em plantio clonal de <i>Pinus taeda</i> no Município de Ponte Serrada, SC.	37
Figura 12 – Distribuição geoespacial da saturação por Alumínio (%) no solo em plantio clonal de <i>Pinus taeda</i> no Município de Ponte Serrada, SC.	38
Figura 13 – Distribuição geoespacial da profundidade do solo, em centímetros, em plantio clonal de <i>Pinus taeda</i> no Município de Ponte Serrada, SC.	39
Figura 14 – Evidência de afloramento da rocha matriz e da redução de indivíduos no local.	39
Figura 15 – Distribuição geoespacial do volume (m^3) por árvore de cada material.	42
Figura 16 – Volume médio por árvore (m^3) para cada material por espaçamento	45
Figura 17 – Porcentagem de sortimento teórico e “real” para cada material testado, em cada espaçamento.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação dos modelos volumétricos testados para cada material.	30
Tabela 2 – Classes de sortimentos adotadas para o presente estudo.	31
Tabela 3 – Interpretação dos teores de Cálcio e Magnésio no solo (cmolc dm ⁻³).	33
Tabela 4 – Interpretação do teor de fósforo extraído pelo método Mehlich-1, conforme teor de argila.	36
Tabela 5 – Parâmetros estimados e medidas de precisão para cada modelo.	40
Tabela 6 – Estimativa de volume (m ³ ha ⁻¹) e número de toras por hectare (n.t. ha ⁻¹) para cada sortimento, material genético e espaçamento.	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	GERAL.....	12
2.2	ESPECÍFICOS.....	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	SETOR FLORESTAL BRASILEIRO	13
3.2	O GÊNERO <i>Pinus</i>	13
3.3	SENSORIAMENTO REMOTO E SILVICULTURA DE PRECISÃO	14
3.4	SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)	15
3.5	GEOESTATÍSTICA.....	17
3.5.1	Krigagem	19
3.5.2	Validação cruzada	20
3.6	ATRIBUTOS DO SOLO	21
3.7	OBJETIVOS DO MELHORAMENTO GENÉTICO	22
3.8	INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO DE PLANTIO	22
3.9	MULTIPRODUTOS MADEIREIROS.....	23
4	MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1	ÁREA DE ESTUDO	24
4.2	AMOSTRAGEM E VARIÁVEIS ANALISADAS	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1	ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO	32
5.1.1	Cálcio (Ca)	32
5.1.2	Magnésio (Mg)	33
5.1.3	Potássio (K)	34
5.1.4	Fósforo (P) e argila (%)	35
5.1.4	Saturação por alumínio	37
5.2	PROFUNDIDADE DO SOLO	38
5.3	PRODUTIVIDADE VOLUMÉTRICA	40
5.4	CLASSIFICAÇÃO DE SORTIMENTOS	44
6	CONCLUSÕES	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1 INTRODUÇÃO

O setor florestal assume grande relevância no cenário econômico brasileiro, representando 1,2% do PIB Nacional, com receita bruta total de R\$ 97,4 bilhões no ano de 2020, haja vista que constitui também extensas áreas de cultivo sobre o território brasileiro (IBÁ, 2020). O Brasil apresenta 9,55 milhões de hectares de árvores plantadas e, cerca de 18% (1,7 milhões de hectares) são cultivadas com espécies do gênero *Pinus* (IBÁ, 2021), estando os plantios localizados principalmente nas regiões Sul do país.

Espécies desse gênero vêm sendo introduzidas no Brasil há mais de um século, e duas delas, provenientes da América do Norte, se destacaram entre as demais na região Sul do Brasil, por apresentarem adaptação as condições edafoclimáticas, facilidade nos tratos culturais, rápido desenvolvimento e elevada produtividade: *Pinus elliottii* L. e *P. taeda* L. Essas espécies, assim como outras do gênero, possuem diversas finalidades, que inclui produção de madeira para confecção de móveis, marcenaria e artesanato, biomassa para celulose e papel, além de resinas em quantidade para a exploração comercial (SHIMIZU e SEBBEN, 2008).

Na região Sul do Brasil essas duas espécies têm sido cultivadas principalmente por empresas com foco na produção de resina e madeira para serraria, respectivamente. Nesse segmento, devido à grande extensão de áreas de plantio, é de suma importância que a base de informações a respeito destas áreas utilize ferramentas capazes de fazer uma gestão otimizada, o que pode ser feito por meio do sensoriamento remoto, a partir de imagens de satélites, radares ou de fotografias aéreas.

O sensoriamento remoto consiste na detecção e conversão, em níveis digitais, a radiação eletromagnética refletida ou emitida por determinado objeto ou superfície, sendo que a interação dos alvos com a radiação eletromagnética está relacionada diretamente com as propriedades físico-químicas e biológica dos mesmos, possibilitando o discernimento dos alvos durante avaliações (PEREIRA E BREUNIG, 2012). Além disso, o sensoriamento remoto é uma ferramenta utilizada num modelo conjunto com sistemas de informações geográficas (SIG) para colaborar com o planejamento do manejo de plantações florestais, facilitando o gerenciamento das atividades na etapa da silvicultura, tendo em vista que se baseia na coleta e análises de dados geoespaciais.

A utilização dessas ferramentas, em conjunto, viabiliza e aponta para o planejamento decisório sobre as intervenções localizadas na floresta com exatidão e precisão adequadas. Tem por objetivo, dentre outros não menos importantes, a redução de custos de produção e diminuição de impactos ambientais pelo uso racional de novas tecnologias e controle de qualidade no processo produtivo florestal.

Para a obtenção de informações confiáveis a partir de informações coletadas em parcelas amostrais, e que representem com fidelidade uma ampla área geofísica, a técnica da geoestatística assume papel relevante na construção desta base de informações. Esta técnica calcula estimativas dentro de um fenômeno natural com distribuição no espaço, e supõe que os valores das variáveis, consideradas como regionalizadas, apresentem uma dependência espacial.

Para a representação espacial qualitativa ou quantitativa das variáveis a serem analisadas em um estudo é possível a adoção da Krigagem, técnica que utiliza informações das variáveis em pontos amostrados e a correlação espacial entre estes para interpolar valores para pontos na área que não foram amostrados, possibilitando a predição de atributos espacialmente distribuídos, sem viés e com mínima variância da estimativa. Pelissari (2012), em estudo realizado sobre a silvicultura de precisão aplicada ao desenvolvimento de *Tectona grandis* L.f., utilizou o método de krigagem para mapear a distribuição geoespacial de atributos do solo e da produtividade, bem como Ortiz (2003) em estudo sobre a relação do potencial produtivo em um povoamento de Eucalipto e atributos do solo e relevo.

No ramo da silvicultura, o estudo de fatores que influenciam diretamente no desenvolvimento do cultivo, como por exemplo, os fatores edáficos, é de grande importância, pois o levantamento e a análise de dados, permite identificar uma melhor estratégia de manejo do solo, visando maior eficiência da atividade, o aumento da produtividade e a redução de custos. Segundo Potrich (2012), avaliar a variabilidade de atributos químicos e físicos do solo é uma importante ferramenta para determinar estratégias de manejo, tendo em vista que há heterogeneidade intrínseca dos solos, que se relaciona com os fatores de formação e pelo tipo de manejo adotado na área.

Como os atributos do solo possuem influência direta sobre o crescimento das árvores, torna-se importante analisar quais destes atributos favorecem ou prejudicam o incremento de biomassa dos indivíduos. Bellote e Dedececk (2006) ressaltam que, as variações no crescimento de *Pinus taeda* são afetadas pela água disponível e a resistência do solo à penetração das raízes, situações que reduzem também a

expressão dos efeitos das propriedades químicas nos solos sobre o crescimento da espécie.

Como os solos apresentam características físicas e químicas com distribuição geoespacial heterogênea, uma das alternativas para introdução de povoamentos florestais, que possam se adaptar e se desenvolver plenamente sob essas condições edáficas e climáticas, é o plantio de indivíduos provenientes de programas de melhoramento genético. De acordo com Souza (2016), as estratégias de melhoramento florestal devem considerar os efeitos da interação genótipo x ambiente (GxA), visando maior produtividade do material genético, utilizando aqueles com maior capacidade de adaptação em diferentes locais. A interação de genótipos por ambientes é um fator muito importante e complicador do melhoramento genético, visto que cada genótipo oferece uma resposta específica em diferentes ambientes (NIERI, 2019).

Além dos atributos do solo, a escolha do espaçamento de plantio é outro aspecto que reflete uma distinção qualitativa e quantitativa da biomassa dos indivíduos em florestas plantadas. A escolha do espaçamento interfere na taxa de crescimento da população, qualidade da madeira, idade de corte, tratamentos silviculturais, manejo da floresta, uso final do produto, entre outros, tornando-se necessária a investigação científica e conhecimento das características edafoclimáticas do local, além da genética da espécie a ser introduzida (GONÇALVES, 2016), para definição do espaçamento adequado.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Caracterizar a distribuição geoespacializada de atributos físicos e químicos do solo que possam exercer influência sobre o crescimento e produtividade de clones de *Pinus taeda* L.

2.2 ESPECÍFICOS

- Analisar a variabilidade espacial de atributos químicos do solo em plantio clonal (fósforo, potássio, cálcio, magnésio e saturação por alumínio).

- Analisar a variabilidade espacial do teor de argila no solo, da profundidade e resistência do solo à penetração;
- Mensurar o crescimento volumétrico de dois clones de *P. taeda*, sob diferentes regimes de espaçamentos, com 7 anos de idade;
- Elaborar mapas temáticos de espacialidade de atributos químicos e físicos do solo que possam influenciar sobre a produtividade de um plantio clonal; e
- Estimar dados preliminares de produtividade volumétrica dos clones por meio de sortimentos florestais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SETOR FLORESTAL BRASILEIRO

O setor florestal brasileiro tem assumido patamares crescentes de crescimento nas últimas décadas, as atividades da indústria contribuíram para geração de mais de 536 mil empregos diretos e 1,5 milhão de indiretos. Os principais segmentos que o setor representa incluem madeira serrada, papel, celulose, laminados, painéis de madeira e carvão vegetal (IBÁ, 2021).

Ainda, segundo o relatório anual do IBÁ (2021), o setor constitui também extensas áreas de cultivo, somando cerca de nove milhões de hectares sobre o território nacional no ano de 2020. Deste total, 78% é compreendido pelo cultivo de espécies dos gêneros eucalipto, com área de 7,47 milhões de hectares, e pinus (18%) com área de 1,7 milhão de hectares, e o restante, 0,38 milhão de hectares, é representado por outras espécies, entre elas, acácia, paricá, teca, seringueira, etc.

O gênero *Pinus* tem maior importância nas regiões sul e sudeste do Brasil, pois, segundo IBÁ (2021), é a região do país que apresenta a maior área de cultivo, com cerca de 85% do total. O estado do Paraná é o principal produtor, com área de 0,73 milhão de hectares, seguido dos estados de Santa Catarina, Rio Grande do Sul e São Paulo.

3.2 O GÊNERO *Pinus*

Espécies do gênero *Pinus* vêm sendo plantadas no Brasil há mais de um século e foram trazidas para o país por imigrantes europeus que visavam a produção de madeira e para fins ornamentais. Em 1948, devido a incentivos do Serviço Florestal

do Estado de São Paulo, espécies americanas foram introduzidas e, dentre estas, destacaram-se as espécies *P. elliotii* e *P. taeda* por apresentarem facilidade nos tratamentos culturais, rápido desenvolvimento e produção, principalmente na região Sul e Sudeste. Em 1960, os plantios destas duas espécies se intensificaram ainda mais nas regiões Sul e Sudeste do país, devido sua tolerância à ocorrência de geadas e elevado rendimento de madeira (SHIMIZU, 2008).

Segundo Shimizu e Sebben (2008), o gênero *Pinus* inclui espécies produtoras de madeira com características variadas que proporcionam usos para diversos fins, como madeira de baixa densidade para uso em acabamentos, marcenaria e artesanato; madeira de alta densidade para produção de móveis, chapas, embalagens, celulose e papel; e, espécies que produzem grande quantidade de resinas que tornam viável a sua exploração comercial, a exemplo do *P. elliotii*.

Embora o gênero *Pinus* possua um amplo número de espécies com grande potencial de exploração, cada espécie apresenta particularidades importantes para um determinado uso. Aguiar et al. (2011) mencionam que espécies como *P. patula* e *P. greggii* produzem madeira densa e com alta resistência, e se adaptam bem às regiões temperadas e subtropicais; *P. chiapensis* produz madeira de baixa densidade e de excelente qualidade para marcenaria; *P. oocarpa*, *P. maximinoi* e *P. tecunumanii* produzem madeira de alta densidade e resistência mecânica, crescendo bem na região tropical, e *P. elliotii* e *P. caribaea* var. *hondurensis* são espécies recomendadas para produção de resina.

3.3 SENSORIAMENTO REMOTO E SILVICULTURA DE PRECISÃO

No segmento de produção florestal é comum, devido à grande extensão de áreas de plantio das empresas, que a base de informações a respeito destas áreas seja oriunda do sensoriamento remoto, podendo ser obtidas a partir de imagens de satélites, radares ou de fotografias aéreas. Neste contexto, o sensoriamento remoto se torna uma ferramenta imprescindível para coleta de dados que representam características detalhadas e específicas dos objetos de interesse, tornando a realização deste processo mais simples, reduzindo o número de operações em campo, conseqüentemente, diminuindo seus custos.

O sensoriamento remoto pode ser definido como o conjunto de técnicas relacionadas com a aquisição de informações e a análise de objetos sem o contato

físico com estes, assim, a interação dos alvos com a radiação eletromagnética está relacionada com as propriedades físico-químicas e biológicas dos mesmos. Tais informações são adquiridas a partir de sensores remotos que detectam e convertem, em níveis digitais, a radiação eletromagnética refletida ou emitida por determinado objeto da superfície terrestre (PEREIRA E BREUNIG, 2012), e que servem como fonte de informações necessárias aos princípios da silvicultura de precisão.

Para Vettorazzi e Ferraz (2000), a silvicultura de precisão pode ser considerada um método de gerenciamento das atividades silviculturais que se baseia na coleta e análise de dados geoespaciais, viabilizando intervenções localizadas na floresta, com a exatidão e a precisão adequadas, podendo ser aplicada em diversas etapas da condução de um povoamento florestal, seja na implantação, no manejo florestal ou ainda no planejamento da colheita (pré e pós-corte).

Nesse sentido, Ribeiro (2014) ressalta que a silvicultura de precisão é uma prática na qual se utiliza tecnologia de informação baseada no princípio da variabilidade do solo e clima. Tem por objetivo a redução de custos de produção, diminuição de impactos ambientais pelo uso racional de insumos agrícolas e aumento da produtividade. Por fim, se baseia em um método de gerenciamento das atividades silviculturais e de manejo que analisa as relações espaciais presentes e utiliza de todas as formas de geotecnologias.

Técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas, utilizadas em conjunto e aplicadas ao manejo florestal com o objetivo de prever o comportamento produtivo das florestas, definem a silvicultura de precisão. Além destas técnicas, surge a aplicação da geoestatística, que tem como objetivo, a partir da coleta de informações a campo, gerar mapas de produtividade na área de cultivo (RUFINO et al, 2006).

3.4 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

A ciência da informação geográfica é a base científica utilizada no desenvolvimento e sustentabilidade das tecnologias dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e, por abranger uma grande amplitude de conhecimentos, tem caráter multidisciplinar, integrando conhecimentos nas áreas de cartografia, geodésia, sensoriamento remoto, fotogrametria, e aquisição e tratamento de dados espaciais (FERREIRA, 2006).

Medeiros e Pires (1998), citam que um SIG é um *software* que gerencia e executa operações de consulta e atualização em dados georreferenciados armazenados em um banco de dados geográficos. Para Ferreira (2006), os Sistemas de Informações Geográficas representam uma categoria de programa computacional que possui sistema de entrada de informações geográficas utilizado para manipular, sintetizar, pesquisar, editar e visualizar tais informações, geralmente armazenadas em base de dados computacionais e que, combinado com equipamentos, dados, usuários e procedimentos, resolve problemas e auxilia nas tomadas de decisão e planejamentos estratégicos.

Um importante componente de um SIG é a base de dados geográficos, que agrega, além de dados espaciais (pontos, linhas, polígonos e pixels), os dados tabulares, que tem como função descrever cada uma das entidades espaciais utilizadas para representar graficamente os elementos geográficos. Os dados tabulares são relacionados aos dados gráficos e descrevem mais detalhadamente estes elementos geográficos. Deste modo, os dados geográficos são produzidos a partir da relação entre os dados espaciais e os dados tabulares, e a função destes dados é representar graficamente, fisicamente, qualitativa e quantitativamente os elementos presentes na superfície da terra (FERREIRA, 2006).

No setor florestal, os inventários florestais são fontes de dados para qualquer planejamento florestal e, da mesma forma, para um SIG. Atrelados a isso, os coletores digitais de dados possuem um papel importante na qualidade, rapidez e baixo custo de coleta e processamento de dados no campo, seja na definição de um esquema de amostragem, do tamanho da parcela, da intensidade de amostragem, das tabelas de volume, da implantação de um sistema computacional e na geração de relatórios (COUTO, 1993).

Um SIG permite o cálculo de distância entre dois pontos, a área de polígonos fechados, além de definir caminhos mínimos numa malha de estradas e calcular o melhor posicionamento de um serviço, como depósito de madeira, posto de fiscalização, entre outros, de modo a beneficiar o maior número de usuários ou minimizar o custo de deslocamento até o local de serviço (COUTO, 1993). Adicionalmente, pode ser aplicado ao manejo de árvores, visando a extração sustentável da madeira, onde todas as árvores produtoras de madeira são georreferenciadas, e sua volumetria sistematicamente monitorada, possibilitando a

retirada seletiva de árvores quando a taxa de crescimento do volume da floresta reduz (FERREIRA, 2006).

Couto (1993) cita que os cadastros florestais estão intimamente ligados ao inventário florestal e é através desta relação que relatórios gerenciais podem ser gerados. Em cadastros mais modernos, estão presentes inúmeras informações sobre as características físicas e químicas do solo, que alimentam um SIG de duas formas: através de atributos do solo (pH, textura, etc.) ou através de mapas temáticos (natureza espacial). Assim, conhecendo-se as relações entre os atributos do solo e a produtividade, muitas inferências podem ser feitas sobre, por exemplo, a compra de terras, a escolha de espécies para implantação e reforma de povoamentos florestais comerciais, dentre outras.

3.5 GEOESTATÍSTICA

A estatística clássica assume que a variabilidade sobre os valores médios é aleatória e independentemente da posição espacial. Contudo, estudos têm demonstrado que a variabilidade dos atributos do solo, dentro de certo domínio, pode ser expressa em função da distância de separação entre elas (POTRICH, 2012). Deste modo, a geoestatística objetiva mensurar as propriedades e relações considerando a localização espacial do fenômeno em estudo, ou seja, permite estudar, explorar e modelar fenômenos geográficos por meio de um modelo inferencial que considera explicitamente as relações espaciais presentes no fenômeno (RIBEIRO, 2014).

Andriotti (2003, apud KRAEMER, 2007) afirma que os fenômenos apresentam uma aparente continuidade no espaço, sendo a geoestatística capaz de representá-los por funções numéricas ordinárias que assumem um valor definido a cada ponto no espaço e, matematicamente, descrevem o fenômeno natural.

Para Landim e Sturaro (2002), a geoestatística calcula estimativas dentro de um fenômeno natural com distribuição no espaço e supõe que os valores das variáveis, consideradas como regionalizadas, sejam espacialmente correlacionados. Esta metodologia geoestatística procura extrair, de uma aparente aleatoriedade dos dados coletados a campo, os atributos estruturais do fenômeno regionalizado, em uma função de correlação entre os valores situados nas proximidades e direções no espaço amostrado.

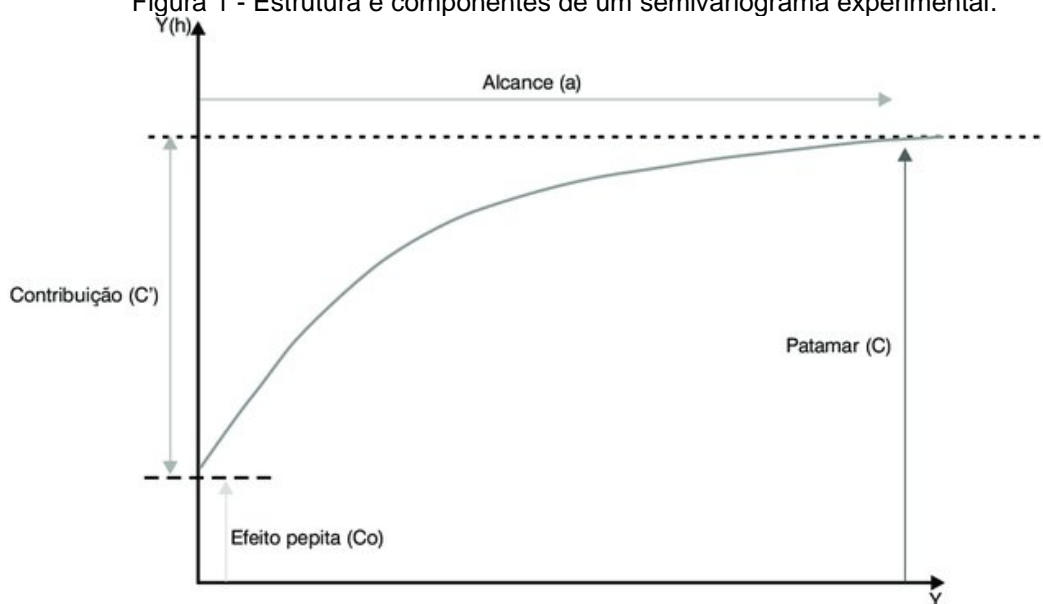
Para obter os valores de correlação dessas variáveis que estão distribuídas no espaço, torna-se necessária a análise de uma ferramenta chamada semivariograma, que visa medir a dependência espacial entre os fenômenos estudados. O semivariograma consiste em um gráfico que expressa a variação de características com a distância entre pontos no campo de amostragem, e se a variância aumenta com o acréscimo da distância, significa que a variância e a distância covariam, ou seja, são variáveis dependentes (PIRES, STRIEDER E DAL'ASTA, 2011).

Na representação gráfica de um semivariograma, os autores supracitados listam e descrevem seus principais parâmetros, também representados na Figura 1:

- *Alcance (a)*: distância, dentro da qual, as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente. Conforme Landim e Sturaro (2002), consiste na distância a partir da qual as amostras passam a não ter mais correlação entre si e a relação entre as amostras se torna aleatória;
- *Efeito Pepita (Co)*: revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Ou seja, as amostras tomadas na mesma posição devem ter os mesmos valores, caso isso não ocorra, o efeito deve ser atribuído a erros de medição ou o espaçamento dos intervalos não foi suficiente para caracterizar o comportamento espacial;
- *Patamar (C + Co)*: é o valor do variograma correspondente a seu *alcance (a)*. Desse ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras torna-se invariante com a distância.
- *Contribuição (C')*: é a diferença entre o patamar (C + Co) e o Efeito Pepita (Co);

O gráfico de um semivariograma experimental, $\gamma(\mathbf{h})$, calculado através da equação do semivariograma, é formado por uma série de valores, sobre os quais se objetiva ajustar uma função e, é importante que o modelo ajustado represente a tendência de $\gamma(\mathbf{h})$ em relação a distância (\mathbf{h}). O procedimento de ajuste é interativo, pois, nesse processo, o intérprete faz um primeiro ajuste e verifica a adequação do modelo teórico; dependendo do ajuste obtido, pode ou não redefinir o modelo, até obter um que seja considerado satisfatório (PIRES, STRIEDER e DAL'ASTA, 2011). Portanto, os modelos mais utilizados para o ajuste dos semivariogramas são: modelo esférico, modelo exponencial, modelo gaussiano e modelo linear.

Figura 1 - Estrutura e componentes de um semivariograma experimental.



Fonte: Adaptado de Druck et al. (2004)

As variáveis consideradas regionalizadas podem (ou não) demonstrar distintos graus de dependência espacial em diferentes direções. Vieira (2000) descreve que quando o gráfico do semivariograma é idêntico para qualquer direção de h ele é chamado isotrópico, situação distinta do anisotrópico, que muda de maneira desigual para direções diferentes e que deve sofrer transformações antes de ser utilizado. Segundo Pires, Strieder e Dal'Asta (2011), as diferenças entre os gráficos anisotrópicos podem ser percebidas comparando os semivariogramas estimados para as direções 0° , 45° , 90° e 135° , ou seja, há variações do alcance de acordo com as direções, estando os alcances máximo e mínimo em direções ortogonais, dando forma elipsoidal à área de influência da amostra (alongada na direção de variância mínima).

3.5.1 Krigagem

O interesse do pesquisador na análise geoestatística não se limita à obtenção de um modelo de dependência espacial, haja vista que também é desejada a predição de valores em pontos não amostrados, podendo ser em um ou mais pontos específicos da área ou, então, a obtenção de uma ampla malha de pontos interpolados através de um mapa de isolinhas ou de superfície. Portanto, para obter esse maior detalhamento da área de estudo se faz necessária a aplicação de um método de interpolação, como a Krigagem (PIRES, STRIEDER E DAL'ASTA, 2011).

Segundo Lamparelli, Rocha e Borghi (2001, apud KRAEMER, 2007), a geoestatística é um conjunto de técnicas que estimam valores regionalizados e espacializados de atributos ou características de uma determinada área a ser estudada, tendo como ferramenta básica este método de interpolação denominado Krigagem. Nesse contexto, a Krigagem é uma importante ferramenta na geração de estratos de processamento no inventário florestal, evidenciando o nível de correlação entre variáveis dendrométricas obtidas da mensuração (RUFINO et al. 2006).

De acordo com Landim e Sturaro (2002), a krigagem usa informações a partir do variograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras com valores conhecidos que irão estimar pontos desconhecidos. Nessa situação o método fornece, além dos valores estimados, o erro associado à tal estimativa, o que o distingue dos demais algoritmos de interpolação.

Na krigagem o procedimento é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, exceto pelo fato de que os pesos são determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Assim, os pesos são atribuídos de acordo com a variabilidade espacial expressa no semivariograma, ou seja, não apenas a distância dos vizinhos mais próximos ao ponto a ser estimado é considerada, mas também como as distâncias entre esses pontos influenciam na distribuição dos pesos (PIRES, STRIEDER E DAL'ASTA, 2011).

Dentre os métodos de estimativas comumente empregados, o método geoestatístico da krigagem pode ser considerado como o melhor estimador linear sem viés, cujo objetivo é a minimização da variância da estimativa, e as formas mais utilizadas são a *Krigagem simples* e a *Krigagem ordinária* (LANDIM e STURARO, 2002). Nesse sentido, o que torna a krigagem um ótimo interpolador é a maneira como os pesos são distribuídos, não sendo tendenciosos, tendo variância mínima e ainda pela possibilidade de que se conheça a variância da estimativa (PIRES, STRIEDER E DAL'ASTA, 2011).

3.5.2 Validação cruzada

Mesmo com os ajustes dos semivariogramas experimentais, ainda existe um certo grau de incerteza sobre os modelos selecionados, os parâmetros ajustados e a qualidade da krigagem, sendo possível avaliar esta incerteza pelo processo de validação cruzada. Pires, Strieder e Dal'Asta (2011) apontam que esta técnica

permite, através da comparação entre valores reais e estimados das informações disponíveis, escolher entre diferentes procedimentos de estimativa, entre diferentes estratégias de busca, ou ainda entre diferentes modelos variográficos. Os mesmos autores explicam esta referida técnica: cada ponto medido é excluído e seu valor estimado com os dados, ou seja, ela estima os valores da variável em estudo sobre os mesmos pontos amostrados e compara os novos valores com os dados medidos. Isso permite avaliar a qualidade dos ajustes dos semivariogramas, sendo ideal que o erro da estimativa tenha distribuição normal com média apresentando valor próximo de zero.

3.6 ATRIBUTOS DO SOLO

O solo é um fator ambiental com grande importância no desenvolvimento de plantações de pinus, considerando suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Dentre essas propriedades, os atributos do solo que mais se correlacionam com o crescimento e produtividade desta cultura florestal são: densidade do solo, textura e teores de nutrientes e minerais (BELLOTE e DEDECEK, 2006).

Ainda considerando a produtividade florestal, é importante saber como os indivíduos se desenvolvem, acumulando biomassa, pois o conhecimento desta acumulação e a influência que os atributos do solo têm sobre o crescimento das plantas são fundamentais para a definição dos melhores tipos de solos a serem utilizados para produção, ou os nutrientes necessários para suprir a produção demandada (BELLOTE e DEDECEK, 2006).

A classe de solo agrega informações imprescindíveis, destacando-se a profundidade do solo, a classe textural, os níveis de nutrientes, o teor de matéria orgânica, a atividade química da fração coloidal e a presença de camadas compactadas que poderiam restringir o crescimento das raízes e a percolação de água (RIGATTO, DEDECEK e MATTOS, 2005).

Em solos que apresentam maior compactação, o crescimento e a produtividade são prejudicados devido ao sistema radicular das árvores explorarem menores volumes de solo e, conseqüentemente, ocorrer menor absorção de volumes de água e menores quantidades de nutrientes (BELLOTE e DEDECEK, 2006).

Em estudo desenvolvido por Rigatto, Dedecek e Mattos (2005) foi apontado que em solos com alta fertilidade há um aumento na produtividade de *Pinus taeda*,

onde fatores químicos tiveram maior importância que os físicos, destacando ainda uma maior concentração de K, Ca e Mg nos sítios de maior produtividade do estudo.

Rufino et al. (2006) pressupõem que em solos que apresentam menores restrições físicas e químicas existam correlações mais fortes entre estratos de variáveis do solo e dendrométricas.

3.7 OBJETIVOS DO MELHORAMENTO GENÉTICO

O melhoramento genético de espécies florestais, utilizadas em cultivos homogêneos, tem se tornado cada vez mais presente no setor de produção florestal. O objetivo do melhoramento genético está relacionado diretamente com o aumento de propriedades qualitativas e quantitativas desejadas pelas empresas, como exemplo, da biomassa do tronco, de frutos, de folhas, de resina, de maior resistência a condições edafoclimáticas adversas, maior resistência e tolerância à ataque de pragas e doenças, entre outros.

No Brasil, dentre as espécies que mais apresentam trabalhos área de melhoramento genético, estão as espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, principalmente com trabalhos voltados para a produção de biomassa e resinas. No caso do gênero *Pinus*, Aguiar et al. (2011) mencionam que apesar de ser compreender espécies rústicas e tolerantes a diferentes condições edafoclimáticas, algumas delas respondem de forma diferente conforme a qualidade do sítio, uma vez que estas condições afetam diretamente no desenvolvimento vegetal e na produtividade dos indivíduos.

O melhoramento genético, principalmente das espécies de maior valor econômico, tais como *P. taeda*, *P. elliottii* e *P. caribaea var. hondurensis*, possibilitou significativos ganhos de produtividade de madeira, contribuindo também para a melhoria da qualidade da matéria-prima (AGUIAR et al. 2011).

3.8 INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO DE PLANTIO

A escolha do espaçamento a ser empregado em plantios florestais depende de diversos fatores. De acordo com Lima et al. (2013), destacam-se: a forma de crescimento e desenvolvimento radicial; as características do solo; o crescimento e o desenvolvimento das variáveis dendrométricas; a tolerância e a adaptabilidade da

espécie introduzida; as práticas silviculturais e técnicas de manejo; os fatores climáticos; as condições de mercado; os métodos de colheita e, principalmente, o objetivo da produção.

A utilização de um espaçamento adotado para uma mesma espécie em um mesmo sítio, implicará, segundo Sanquetta et al. (2003), no número de tratos culturais a serem executados, na taxa de crescimento dos indivíduos, no volume de madeira gerado, no sortimento de madeira, na taxa de mortalidade e dominância, na idade de estagnação do crescimento, nas práticas de implantação, de manejo, nos custos, entre outras particularidades.

Em relação a produtividade de plantios florestais, Lima et al. (2013) ressaltam que para *Pinus taeda* L. o espaçamento afeta o crescimento em volume por hectare, sendo que espaçamentos mais densos denotam em maiores incrementos anuais em volume por unidade de área, devido a maior quantidade de indivíduos presentes na área. Os mesmos autores relatam, ainda, que a melhor relação entre produção volumétrica e diâmetros maiores podem estar nos espaços vitais entre 5,0 m² e 8,0 m² para cada indivíduo, e recomendam espaçamentos mais adensados para maior produção de volume, mesmo com diâmetros menores.

3.9 MULTIPRODUTOS MADEIREIROS

Empresas que produzem matéria prima florestal possuem como um de seus principais objetivos obter algum tipo de retorno a partir de seus plantios florestais. Uma característica comum destes plantios florestais comerciais é que a demanda geralmente se concentra em um determinado tipo de produto para abastecer uma indústria, como madeira para laminação, serraria, processo (pasta celulósica e papel) e energia (ARCE, 2000).

Tais produtos, também chamados de sortimentos, são diretamente influenciados pela forma do fuste das árvores, visto que são classificados de acordo com o diâmetro limite preestabelecido para tal produto. Drescher, Schneider e Finger (1999) relatam que a forma das árvores possui uma variação muito grande dentro da floresta. Esta variação ocorre por causa da diminuição do diâmetro do fuste em direção ao topo da árvore, sendo conhecida como “*taper*”, influenciando diretamente o volume. Apontam, ainda, que a forma do fuste varia de acordo com a espécie, idade, espaçamento entre as árvores e as condições do sítio florestal.

Florestas plantadas com fins comerciais de produtos madeireiros possuem uma ampla variedade de sortimentos que podem ser explorados devido a forma do fuste das árvores. Conforme Arce (2000), a avaliação prévia do sortimento por classes diamétricas nos plantios florestais permite planejar os tipos de produtos a serem obtidos de maneira a otimizar o valor econômico da madeira em pé.

Kohler et al. (2015) apontam que a diversificação dos produtos auxilia no desenvolvimento estratégico das empresas e, portanto, para quantificar e qualificar estes produtos, modelos de afilamento do fuste passam a representar uma importante ferramenta para atender a essas novas necessidades. Essa gestão do manejo florestal na empresa permite a determinação de volumes das diferentes partes da árvore e conseguem representar a forma do tronco das árvores, a qual influencia diretamente na qualidade e na quantidade dos multiprodutos.

Souza (2013), cita que existem vários modelos de “*taper*” (forma do fuste) e que a utilização de um modelo específico dependerá da qualidade de seu ajuste frente a qualidade de dados, que deverá ser analisada pelo manejador, pois conjuntos de dados distintos geralmente têm características próprias e, com isso, provavelmente vão resultar no emprego de diferentes modelos.

Autores como Souza et al. (2008), Souza (2009); Costa et al. (2019), em estudos realizados sobre a forma do fuste da espécie *Pinus taeda* L., apontam que para estimativas de distintos sortimentos florestais o polinômio de 5º grau como a melhor equação para expressar a forma do fuste da espécie, evidenciando ótimos resultados de ajuste dos dados.

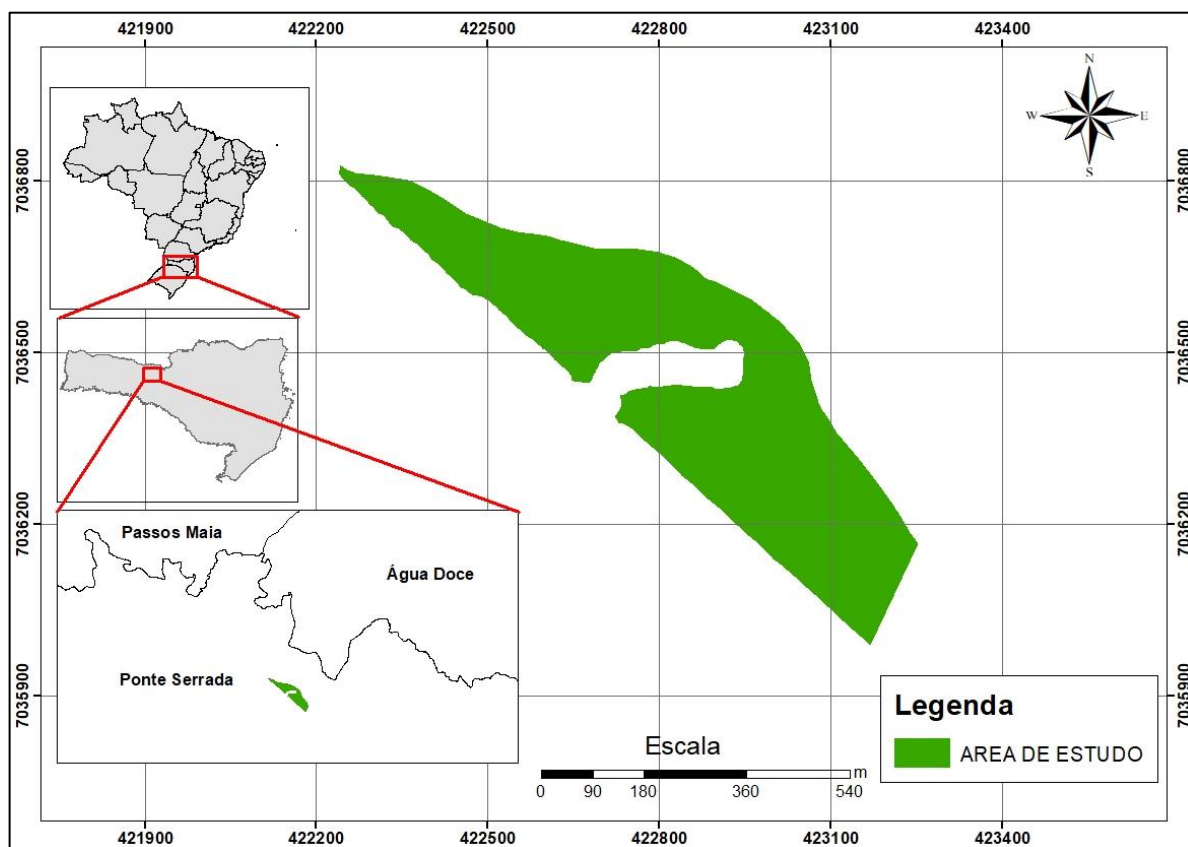
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado em uma área de cultivo da empresa Adami S/A, localizada no Município de Ponte Serrada (SC), como mostra a Figura 2. O município de Ponte Serrada está localizado na região oeste do estado de Santa Catarina, e pertence à região da Associação dos Municípios do Alto Irani (AMAI). Situa-se entre as coordenadas de latitude 26º 52' Sul e longitude 52º 01' Oeste, a uma altitude de 1.066 metros, e que apresenta temperatura média anual em torno de 17º C e precipitação pluvial anual média em torno de 2.200 mm (WREGGE et al., 2012). O clima

da região é subtropical e segundo Köppen, é classificado como *Cfa* - Clima temperado úmido com verão quente.

Figura 2 - Localização da área de estudo no Município de Ponte Serrada – SC.



Fonte: O autor.

Os solos do município, de acordo com Embrapa (2006), são classificados como: Cambissolos Húmicos Distróficos e Neossolos Litólicos Eutróficos.

A vegetação nativa predominante no município é, na maior parte de suas zonas limítrofes, característica de Floresta Ombrófila Mista, que compreende espécies popularmente conhecidas como: imbuías, ervas-mate, canelas, cedros, etc; e também pinheiros (*Araucaria angustifolia* Bert.), espécie peculiar desta classificação fito fisiográfica, sendo que no ano de 2005 foi criado o Parque Nacional das Araucárias, abrangendo parte dos municípios de Ponte Serrada e Passos Maia.

Além disso, na região de Ponte Serrada (SC) encontra-se uma ampla área de cultivo de florestas de valor econômico, onde o gênero *Pinus* se destaca por ser a espécie florestal que apresenta extensas áreas de cultivo sob manejo sustentável de produção.

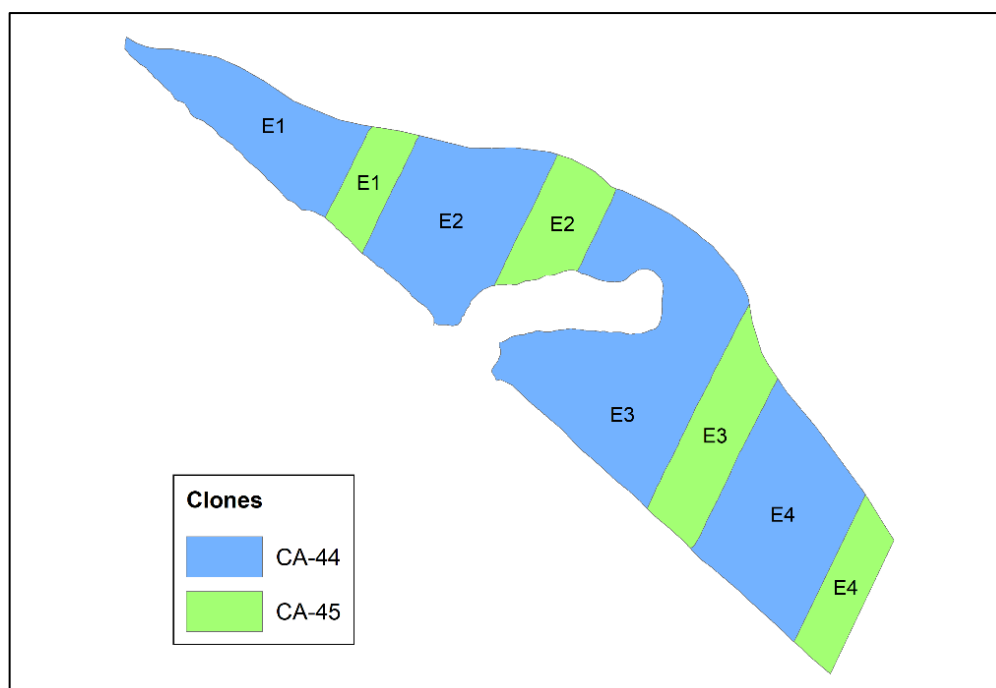
A área do presente estudo compreende 22,8 hectares da espécie *Pinus taeda* L, e contempla a distribuição de 8 subáreas para estudo com diferentes clones (CA-44 e CA-45) e com diferentes tratamentos de espaçamento entre plantas (plantio com sete anos de idade), como mostra a Figura 3.

O plantio das mudas de *Pinus taeda* L. (clones e seminais) na área de estudo ocorreu no ano de 2015, produzidas em viveiro próprio da empresa (mudas seminais comerciais), enquanto os dois clones, produzidos por embriogênese somática, foram adquiridos através de uma empresa parceira da Adami S/A

Os diferentes espaçamentos entre plantas (em metros) adotados no estudo apresentam a seguinte constituição:

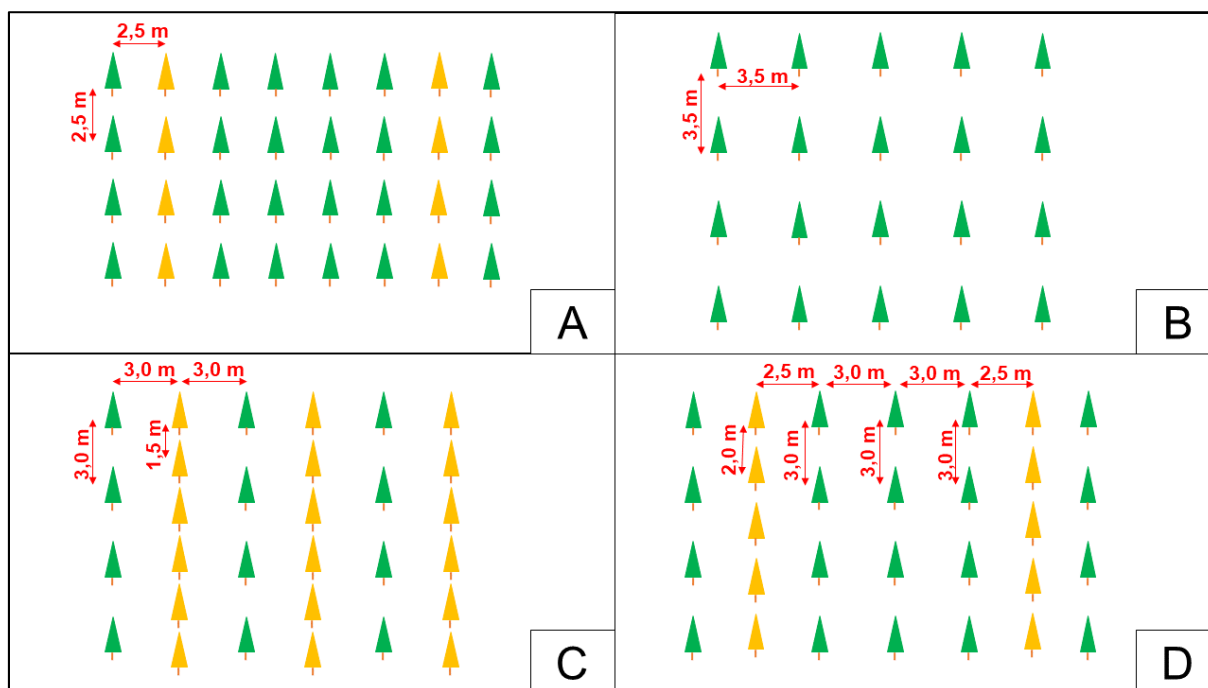
- (E1) = 2,5 m x 2,5 m, sendo a 5ª linha com mudas seminais;
- (E2) = 3,5 m x 3,5 m, apenas com plantio de dois clones;
- (E3) = 1,5 m x 3,0 m com mudas seminais e 3,0 m x 3,0 m para mudas de dois clones; e
- (E4) 2,0 m x 2,5 m x 3,0 m x 3,0 m x 3,0 m x 3,0 m x 2,5 m, com a 4ª linha com mudas seminais, conforme ilustrados pela Figura 4.

Figura 3 - Representação dos tratamentos que compreendem dois diferentes clones e diferentes espaçamentos na área.



Fonte: O autor.

Figura 4 - Ilustração dos diferentes espaçamentos.



A: Espaço E1; B: Espaço E2; C: Espaço E3 e D: Espaço E4

Fonte: O autor.

4.2 AMOSTRAGEM E VARIÁVEIS ANALISADAS

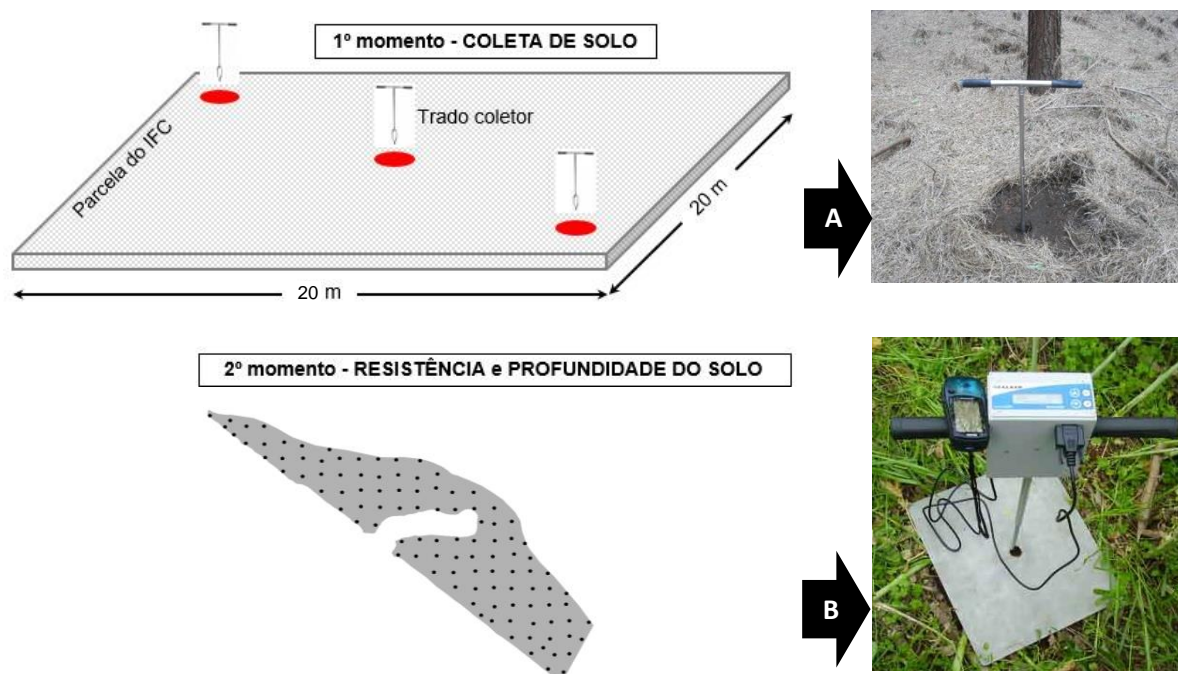
Durante a realização do presente estudo foram coletadas, em campo, informações dendrométricas através de parcelas permanentes de inventário florestal (para estimativas de incrementos e produtividade florestal) e informações correspondentes a alguns atributos físicos e químicos do solo comumente influentes sobre o desenvolvimento de plantas em plantios comerciais homogêneos em campo.

Para a obtenção de dados dendrométricos, utilizou-se parcelas de inventário permanentes com dimensões de 20 m x 20 m (400 m²), já instaladas pela empresa. Realizou-se censo dentro das parcelas de inventário, onde todas as árvores das parcelas foram medidas, sendo obtidos a circunferência à altura do peito (CAP, a 1,3 m acima do solo) com auxílio de uma fita centimétrica; e a altura total com um hipsômetro *Vertex IV*.

As coletas de solo foram realizadas com trado holandês, à profundidade de 0 – 25 cm, de forma composta em diagonal, em três pontos localizados dentro de cada parcela permanente inventariada (Figura 5A). Posteriormente, houve a homogeneização manual das três subamostras coletadas utilizando um balde, e, por

fim, a separação de aproximadamente 500 gramas de solo e alocação em embalagem de plástico devidamente identificado. As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Análises de Solo da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI/FW) para realização das análises físicas e químicas do solo. Na etapa de caracterização dos atributos químicos do solo foram analisados os teores de P, K, Ca, Mg, saturação por alumínio, e ainda como atributos físicos a textura do solo através do percentual de argila.

Figura 5 - Procedimento de coleta de solo (amostra composta) (A) e avaliação da compactação com penetrômetro digital (B) no interior da parcela de inventário florestal (IFC).



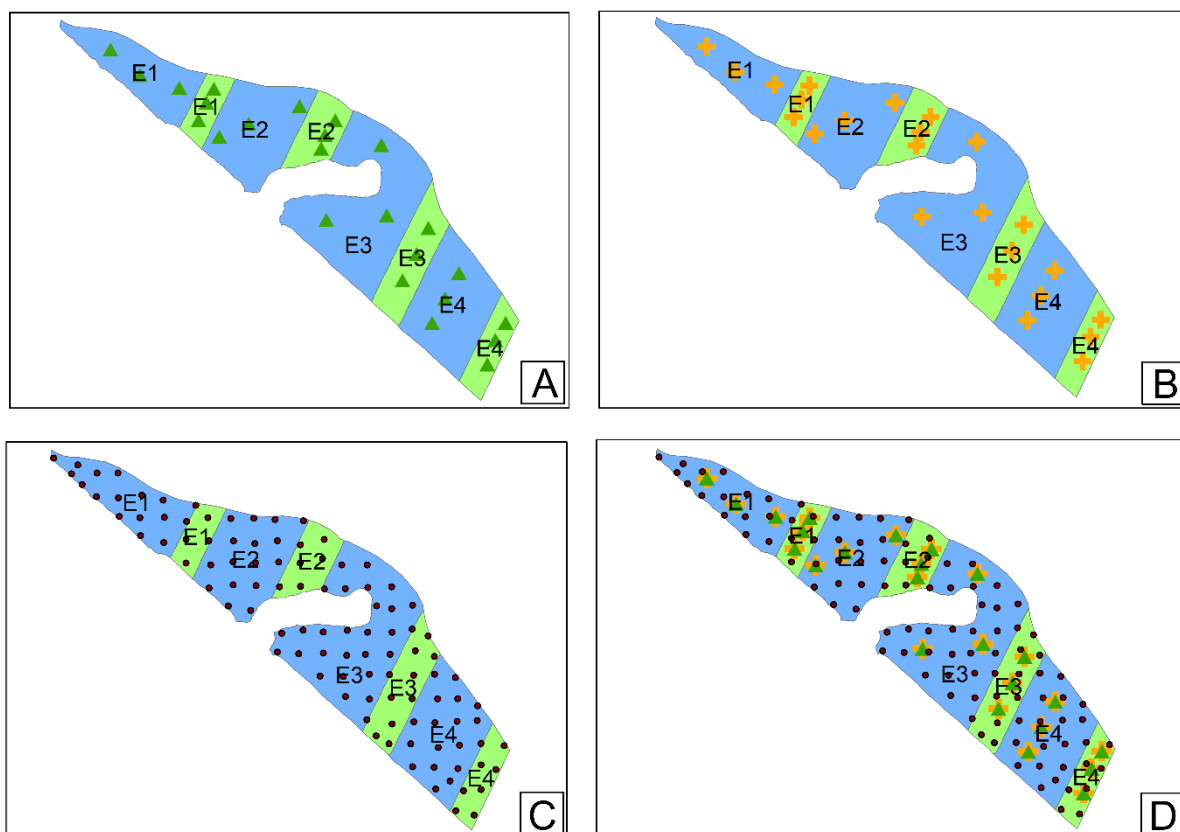
Fonte: O autor.

Para obtenção de dados acerca da qualidade física do solo, considerando a profundidade e resistência do solo à penetração (compactação), foi utilizado o equipamento digital *PenetroLOG Falker* (Figura 5B). Especialmente para estas duas variáveis de estudo houve uma ampliação da grade de amostragem de dados. Para isso, a metodologia adotada para que os pontos de coleta cobrissem a área total de forma que melhor representa-se estes dois atributos do solo (variáveis profundidade e resistência do solo) foi a distribuição sistemática dos pontos amostrais no *software ArcGis 10.4*, através da ferramenta "*HawthsTools – Generate Regular Points*".

Em relação ao número de pontos amostrais para cada variável obtida, o local e número de parcelas para medições dendrométricas foram determinados pela empresa, correspondendo a um total de 24 parcelas permanentes de avaliação (Figura 6A), com 3 parcelas por subárea de estudo. Para a realização das coletas de solo, foram utilizados os mesmos pontos amostrais das parcelas de inventário, ou seja, o solo foi coletado apenas dentro de cada parcela (Figura 6 B).

A distribuição dos pontos amostrais para a coleta de informações a respeito da profundidade e resistência do solo foi realizada sobre a área utilizando uma grade amostral de 50 metros, totalizando 91 pontos amostrais, no entanto, à campo foram coletados dados adicionais em mais 15 pontos, totalizando 106 pontos amostrais (Figura 6 C). Portanto, ocorreram 130 pontos de coleta de dados sobre a área de estudo, como mostra a Figura 6 D, para que houvesse uma representatividade mais fiel das variáveis a serem analisadas.

Figura 6 - Distribuição espacial de pontos de amostragem para levantamento de dados no estudo.



A: Parcelas dendrométricas; **B:** Pontos para coleta de solo; **C:** Pontos para coleta de dados de profundidade e resistência do solo; e, **D:** Disposição de todos os pontos amostrais sobre a área.

Fonte: O autor.

Para os cálculos de produtividade volumétrica foi realizada a cubagem rigorosa destrutiva de um total de 33 indivíduos, sendo 3 de cada clone e 3 seminal em cada um dos espaçamentos existentes no campo, exceto no E2, onde foram cubadas 3 árvores por clone apenas por inexistir plantas de origem seminal. Portanto, para a seleção das 33 árvores a serem cubadas, a área foi dividida em 4 estratos, que correspondem aos diferentes espaçamentos. Portanto, para a cubagem rigorosa, foi utilizado o método da altura relativa de Hohenadl modificado, em que a altura total da árvore foi fracionada em 15 seções (0,5%, 1%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 95%). Após abatida, a altura total da árvore cubada foi medida com uma trena e, em cada uma das posições percentuais respectivas à altura da árvore definidas no método, foi coletada a circunferência com o auxílio de uma fita centimétrica.

A partir dos dados levantados na cubagem e devidamente identificados, totalizando 12 cubagens por clone e nove para seminal, foram testados modelos volumétricos para cada clone (Tabela 1), e analisadas as seguintes estatísticas: coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajus}), F calculado (F_{cal}) e o erro padrão da estimativa (S_{xy}). Com base nessas estatísticas, o modelo que melhor ajustou os dados foi selecionado.

Tabela 1 – Relação dos modelos volumétricos testados para cada material.

Modelos	Autor	Formulação
1	Hohenadl	$V = b_0 + b_1 \cdot (h \cdot d^2)$
2	Schumacher-hall	$\ln(v) = b_0 + b_1 \cdot \ln(d) + b_2 \cdot \ln(h)$
3	Spurr	$\ln(v) = b_0 + b_1 \cdot \ln(d^2 \cdot h)$

Fonte: O autor.

Para expressar a forma do fuste da árvore, além de os dados serem separados por genótipo, foram também separados por espaçamento, totalizando 3 cubagens para cada clone e seminal por espaçamento. Para isso, foi utilizada a equação classificada como polinômio de 5º grau (Equação 1) para ajustar os dados e retratar a forma do fuste.

$$di/d = b_0 + b_1 * \left(\frac{hi}{h}\right) + b_2 * \left(\frac{hi}{h}\right)^2 + b_3 * \left(\frac{hi}{h}\right)^3 + b_4 * \left(\frac{hi}{h}\right)^4 + b_5 * \left(\frac{hi}{h}\right)^5 \quad (1)$$

Com base na expressão da forma do fuste, também foram determinadas as classes de sortimentos expressas em volume (m³) e em número de peças (toretos) correspondentes aos critérios apresentados na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2 – Classes de sortimentos adotadas para o presente estudo.

Classe	Diâmetro Ponta Fina (cm)	Comprimento (m)
S I	35	3,05
S II	25	3,05
S III	18	2,55
S IV	8	2,40

S: Sortimento;

Fonte: O autor.

Com base na classificação dos sortimentos estudados, as tabelas de sortimentos foram calculadas considerando-se o volume teórico e o volume “real”, sendo que o volume teórico compreende o volume até a altura em que o diâmetro da ponta fina se localiza no fuste e, o volume “real” considera o volume de determinado sortimento se o comprimento da peça for igual ou superior ao comprimento predeterminado para tal sortimento. Em casos de o comprimento ser menor, há a migração deste volume para a próxima classe de sortimento e, em caso de o comprimento ser maior, ocorre a migração de volume correspondente ao comprimento residual para a próxima classe de sortimento.

Com os dados obtidos a partir da coleta de informações dendrométricas (inventário contínuo), de dados geoespacializados de profundidade e resistência do solo a campo; da composição nutricional através de laudos técnicos de análise química do solo fornecidos pelo laboratório, e juntamente com as coordenadas de cada ponto de coleta no campo, toda a base cadastral destes dados supracitados foram importados, processados e analisados geoestatisticamente pelo *Software* ArcGis 10.4. Posteriormente foram gerados mapas temáticos para cada atributo do solo através do método de interpolação por krigagem ordinária e, com isso, permitir o cruzamento de informações geoestatísticas e regionalizadas a respeito da produtividade volumétrica das plantas na área de estudo (clones e seminal) em relação às características do solo, em cada um dos espaçamentos de plantio. Nos casos em que não houve ajuste de dados quando interpolados por krigagem foi adotado o método Inverse Distance Weighting (IDW) para interpolação dos mesmos.

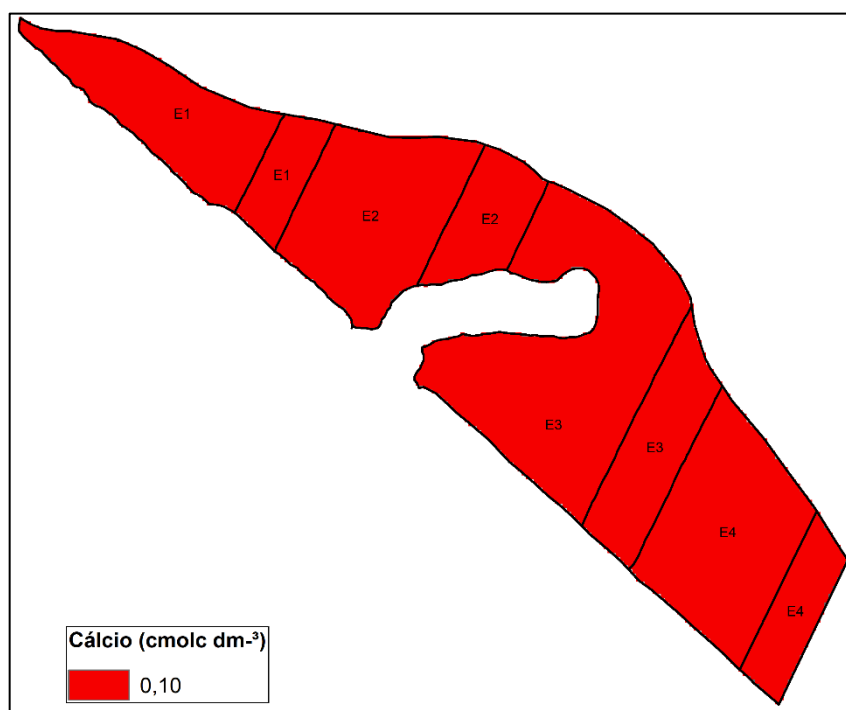
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

5.1.1 Cálcio (Ca)

A distribuição geoespacial para os teores de cálcio presentes no solo da área de estudo é representada pela Figura 7.

Figura 7 – Distribuição geoespacial do teor de Cálcio (cmolc dm^{-3}) no solo em plantio clonal de *Pinus taeda* no Município de Ponte Serrada, SC.



Fonte: O autor.

Constata-se que não há variação nos níveis de cálcio na área do experimento e que, além disso, de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – SBCS (Tabela 3) os teores de cálcio do solo aqui revelados são muito baixos, o que pode afetar no desenvolvimento das plantas. O Instituto Internacional de Nutrição Vegetal (1998) (IPNI) discorre sobre a função do cálcio nas plantas mencionando que esse nutriente estimula o desenvolvimento das raízes e folhas, reforça a estrutura das plantas formando compostos que fazem parte das paredes celulares, além de influenciar indiretamente sobre a produção de biomassa por induzir uma redução nos valores do solo, tornando-o mais ácido e, em caso de deficiência deste nutriente, um

dos principais sintomas é a redução no crescimento das raízes. Estes apontamentos corroboram com os valores de pH do solo constatados na área de estudo, haja vista que o valor médio do pH do solo se mostrou em torno de 4,36.

Tabela 3 – Interpretação dos teores de Cálcio e Magnésio no solo (cmolc dm⁻³).

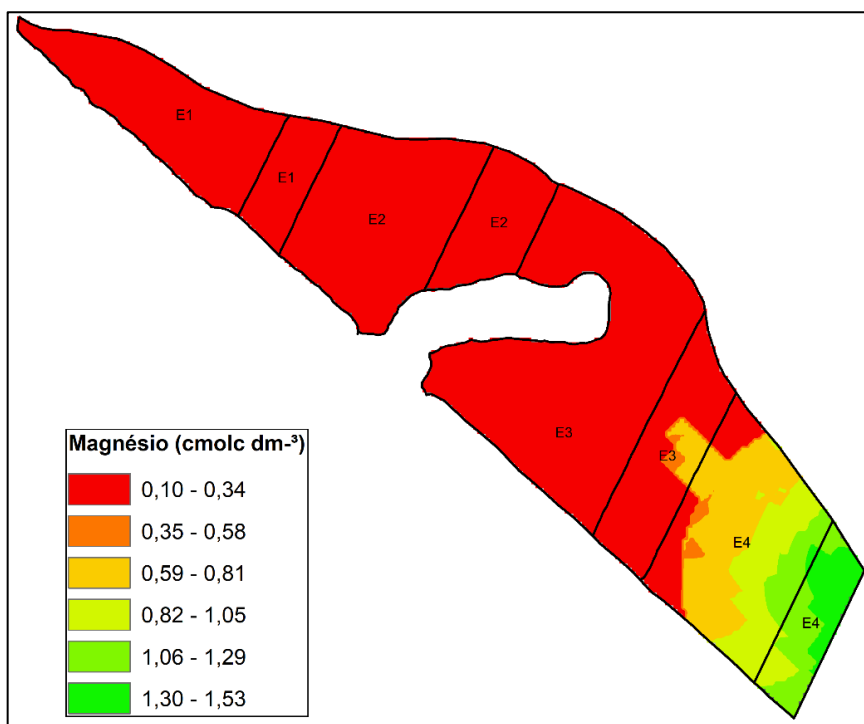
Interpretação	Cálcio	Magnésio
	(cmolc dm ⁻³)	
Baixo	≤ 2,0	≤ 0,5
Médio	2,0 - 4,0	0,5 - 1,0
Alto	> 4,0	> 1,0

Fonte: SBCS – Núcleo Regional Sul (2016).

5.1.2 Magnésio (Mg)

A geoespacialidade para os teores de magnésio no solo apresenta peculiaridades por se distribuir em aproximadamente dois terços da área experimental com os menores níveis no solo, como mostra a Figura 8.

Figura 8 – Distribuição geoespacial do teor de Magnésio (cmolc dm⁻³) no solo em plantio clonal de *Pinus taeda* no Município de Ponte Serrada, SC.



Fonte: O autor.

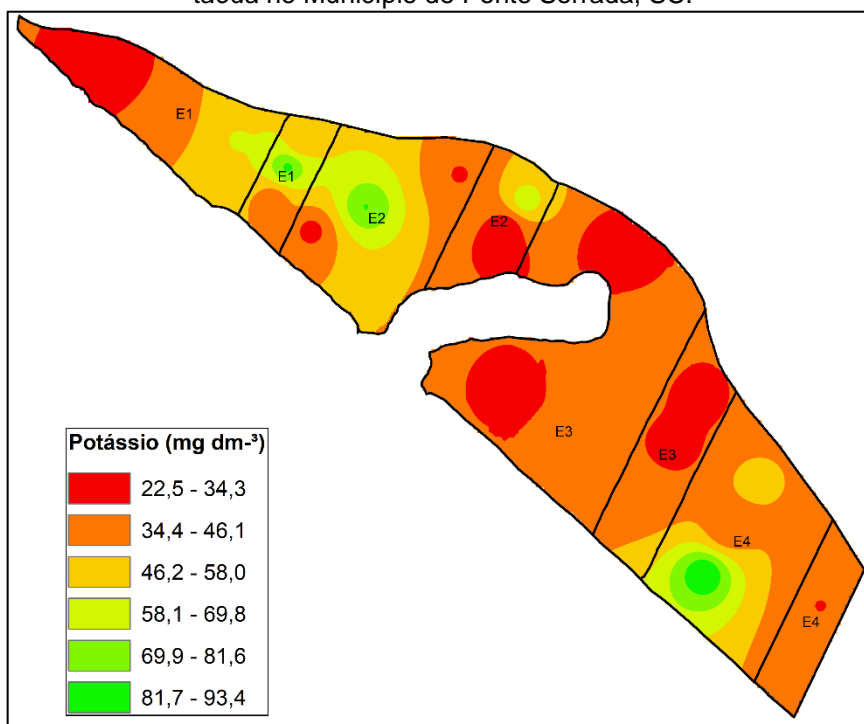
Nota-se que nas subáreas que compreendem os espaçamentos E1, E2 e E3, os teores de magnésio no solo são também classificados como baixos, segundo a SBCS (2016) [Tabela 3], enquanto que nas subáreas representadas pelo espaçamento E4 os níveis deste elemento nutricional variam de médio a alto.

De acordo com IPNI (1998), o magnésio é o átomo central na molécula de clorofila e, assim, está envolvido diretamente na fotossíntese, sendo juntamente com o nitrogênio, os únicos elementos do solo encontrados na clorofila. Além disso, este nutriente ajuda no metabolismo, na respiração celular da planta e na ativação de sistemas enzimáticos, e sua deficiência no solo ou indisponibilidade à planta causa sintomas de amarelecimento das folhas, prejudicando a fotossíntese.

5.1.3 Potássio (K)

A distribuição geoespacial para os teores de potássio foi moderadamente variável na área de estudo (Figura 9).

Figura 9 – Distribuição geoespacial do teor de potássio (g dm^{-3}) no solo em plantio clonal de *Pinus taeda* no Município de Ponte Serrada, SC.



Fonte: O autor.

De acordo com a Embrapa (2015), os teores de potássio na área do experimento variam de baixo a alto ($22,5 \text{ mg dm}^{-3}$ a $93,4 \text{ mg dm}^{-3}$), tendo em vista que

são valores considerados baixos quando < 30 , médio entre 30 e 60 e alto quando $> 60 \text{ mg dm}^{-3}$. Segundo a IPNI (1998), o potássio é um macronutriente muito importante para as plantas, sendo também vital para a fotossíntese. Em casos de deficiência deste nutriente na planta, a fotossíntese diminui e a respiração aumenta, sendo duas situações que diminuem o suprimento de carboidratos para as plantas, é um nutriente essencial na síntese proteica e é importante na decomposição de carboidratos, um processo importante para geração de energia para o crescimento das plantas.

5.1.4 Fósforo (P) e argila (%)

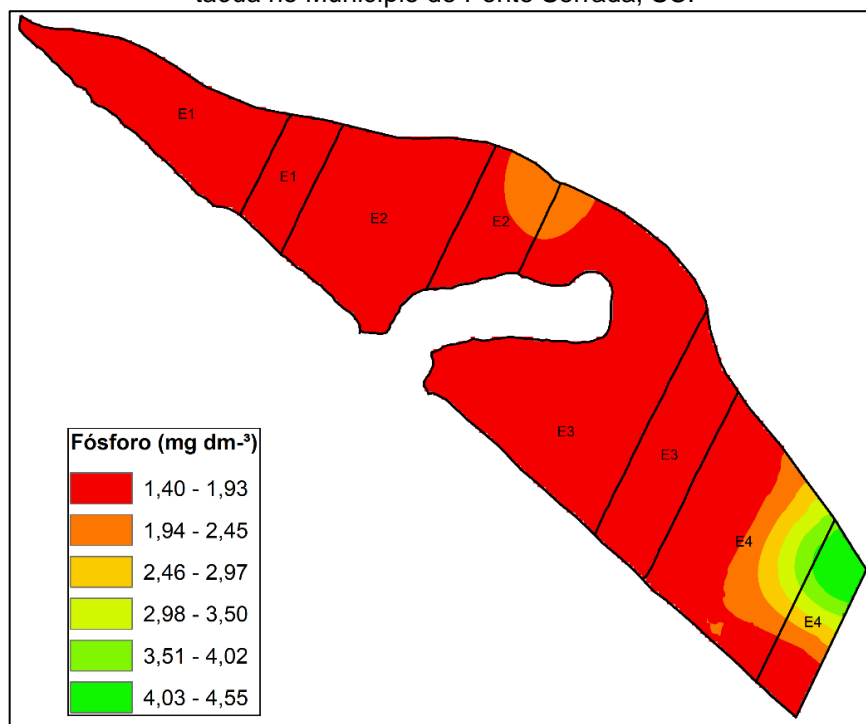
A variabilidade espacial do fósforo no solo assumiu comportamento semelhante à distribuição do magnésio em toda a extensão de área do teste clonal, como mostra a Figura 10.

Percebe-se que para os teores de fósforo há também pouca variabilidade na maior parte da área, havendo maior variação apenas em uma fração do espaçamento E4.

Os níveis de fósforo observados na área do experimento apontam para o fato de que a disponibilidade deste nutriente tem uma relação direta com a classe textural de solo, ou seja, solos mais argilosos, associados a baixos valores de pH (como os que foram também constatados neste estudo), tendem a indisponibilizar este nutriente para adsorção pelas raízes da planta. Neste sentido, considerando que os teores de argila na área do experimento variaram de 30,5 a 47,3% (Figura 11), que a acidez do solo é elevada e que a disponibilidade do fósforo está diretamente relacionada a esses dois fatores, a variação nos teores de fósforo em praticamente toda a área do estudo, segundo a SBCS (2016), é classificada como teores variando de muito baixo a baixo (Tabela 4).

Nesse sentido, o IPNI (1998) menciona que o fósforo é um nutriente essencial para o desenvolvimento das plantas e nenhum outro nutriente pode substituí-lo. Este nutriente atua na fotossíntese, na respiração, no armazenamento e na transferência de energia, na divisão celular, no crescimento das células e em vários outros processos. Ainda, na deficiência deste nutriente, o principal sintoma é o subdesenvolvimento em toda a planta, a forma da folha pode ficar distorcida, entre outros.

Figura 10 – Distribuição geoespacial do teor de Fósforo (mg dm^{-3}) no solo em plantio clonal de *Pinus taeda* no Município de Ponte Serrada, SC.



Fonte: O autor.

Tabela 4 – Interpretação do teor de fósforo extraído pelo método Mehlich-1, conforme teor de argila.

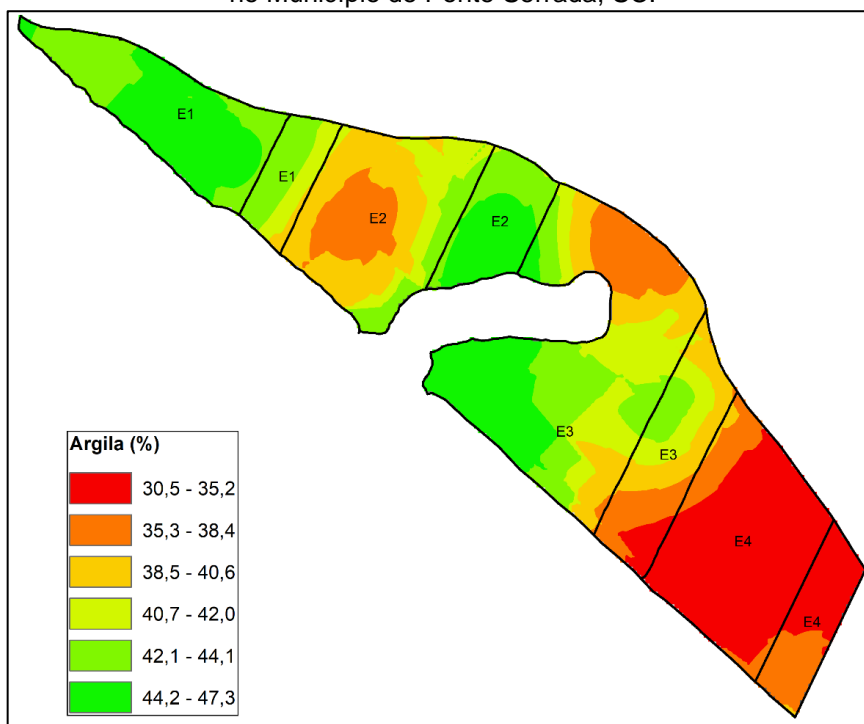
Classe de Disponibilidade	Classe de Teor de Argila			
	1	2	3	4
	mg de P dm^{-3}			
Muito Baixo	$\leq 1,5$	$\leq 2,0$	$\leq 3,0$	$\leq 5,0$
Baixo	1,5 - 3,0	2,1 - 4,0	3,1 - 6,0	5,1 - 10,0
Médio	3,1 - 4,5	4,1 - 6,0	6,1 - 9,0	10,1 - 15,0
Alto	4,6 - 9,0	6,1 - 12,0	9,1 - 18,0	15,1 - 30
Muito Alto	$> 9,0$	$> 12,0$	$> 18,0$	$> 30,0$

Teores de Argila: Classe 1: $> 60\%$; Classe 2: 60 a 41%; Classe 3: 40 a 21% e Classe 4: $\leq 20\%$

Fonte: SBCS – Núcleo Regional Sul (2016).

Em relação ao teor de argila no solo (Figura 11), percebe-se que há variabilidade em seus valores na área do experimento, destacando que tais teores se encaixam em duas classes: classe 2 (textura argilosa) e classe 3 (textura média), justamente com valores mais elevados na extensão correspondente à área com os mais baixos níveis de fósforo no solo (Figura 10). Constata-se, ainda, que as regiões com percentuais mais baixos de argila no solo mostram uma amplitude maior do elemento fósforo no solo, que é a região do espaçamento E4 no estudo.

Figura 11 – Distribuição geoespacial dos teores de argila (%) no solo em plantio clonal de *Pinus taeda* no Município de Ponte Serrada, SC.



Fonte: O autor.

5.1.4 Saturação por alumínio

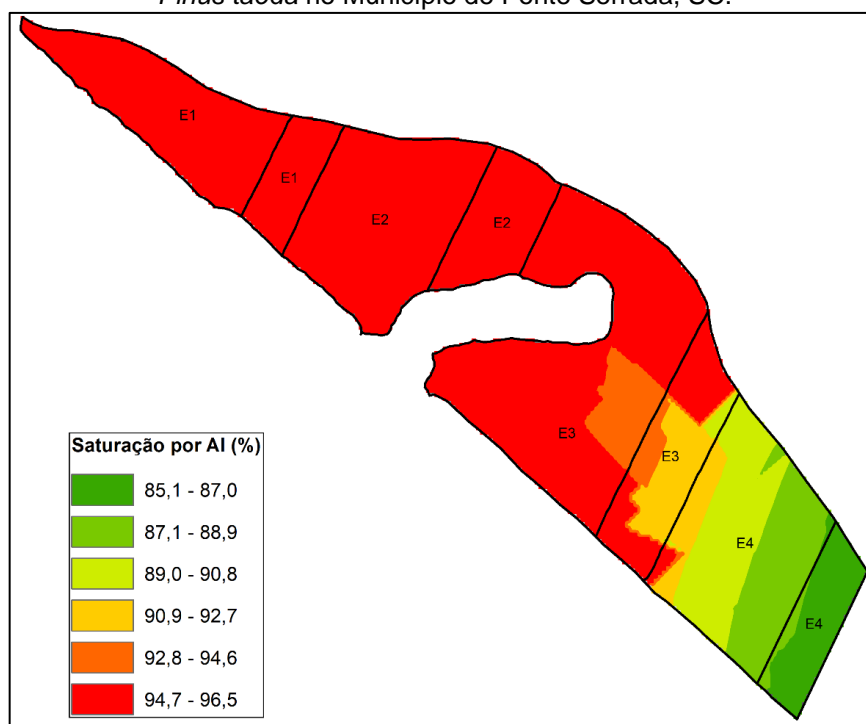
Analisando a distribuição dos teores de saturação por alumínio no solo (Figura 12), percebe-se que, embora apresente variações geoespaciais em seus teores, esses valores são consideravelmente elevados, o que explica a elevada acidez do solo, sendo que a faixa de pH e de saturação por alumínio na área do experimento ficou entre 4,1 e 4,7; 85,1% a 96,5% respectivamente, consideradas, segundo a SBCS (2016) como valor de pH baixo ($\leq 5,0$) e de saturação alto ($>20\%$).

De acordo com IPNI (1998), quanto mais ácido for um solo, maior será o teor de alumínio trocável (em valor absoluto), menores os teores de Ca, Mg, K, menor a soma de bases e maior a porcentagem de saturação por alumínio, proporcionando efeito prejudicial ao desenvolvimento e produção de culturas sensíveis a este cenário de acidez do solo.

Convém salientar que a calagem prévia dos solos ácidos, além de proporcionar aumento do pH e da saturação por bases, promove a neutralização do alumínio e de grande parte do ferro e do manganês, aumentando a atividade biológica e a eficiência dos fertilizantes, resultando ainda em diminuição na capacidade de fixação via

precipitação do P, favorecendo, conseqüentemente, o desenvolvimento vegetal (ERNANI et. al., 1996).

Figura 12 – Distribuição geoespacial da saturação por Alumínio (%) no solo em plantio clonal de *Pinus taeda* no Município de Ponte Serrada, SC.



Fonte: O autor.

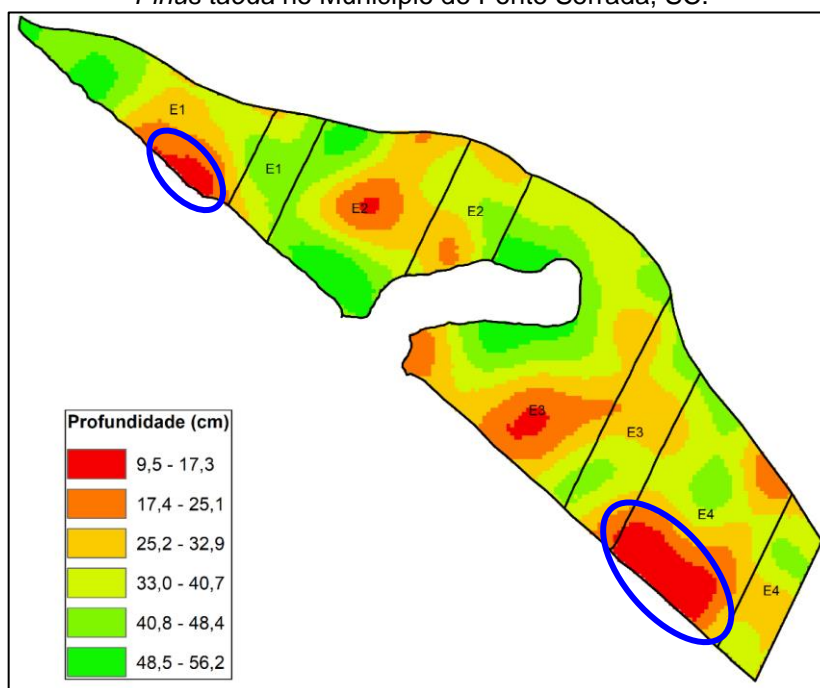
5.2 PROFUNDIDADE DO SOLO

Em relação ao atributo profundidade do solo, a área do experimento apresenta elevada heterogeneidade, havendo áreas com solos consideravelmente profundos, solos mais rasos e com afloramento superficial de rochas, como mostra a Figura 13.

Parte dos solos mais rasos constatados na área de estudo estão localizados nos espaçamentos E4 e E1 (destaque em vermelho), inclusive com a presença de afloramentos da rocha matriz, conforme apontados na Figura 13 e perceptíveis visualmente na Figura 14. Essa realidade observada de classes decrescentes de profundidade, como no caso de valores (embora pontuais) entre 17,4 a 25,1 cm e até mesmo atingir apenas 9,5 cm de profundidade, sinaliza uma influência direta sobre a capacidade potencial de desenvolvimento do sistema radicular das árvores no estudo. Neste cenário destaca-se principalmente o espaçamento E4, que apresenta uma porção de sua área com afloramento da rocha matriz e, no entorno desta área,

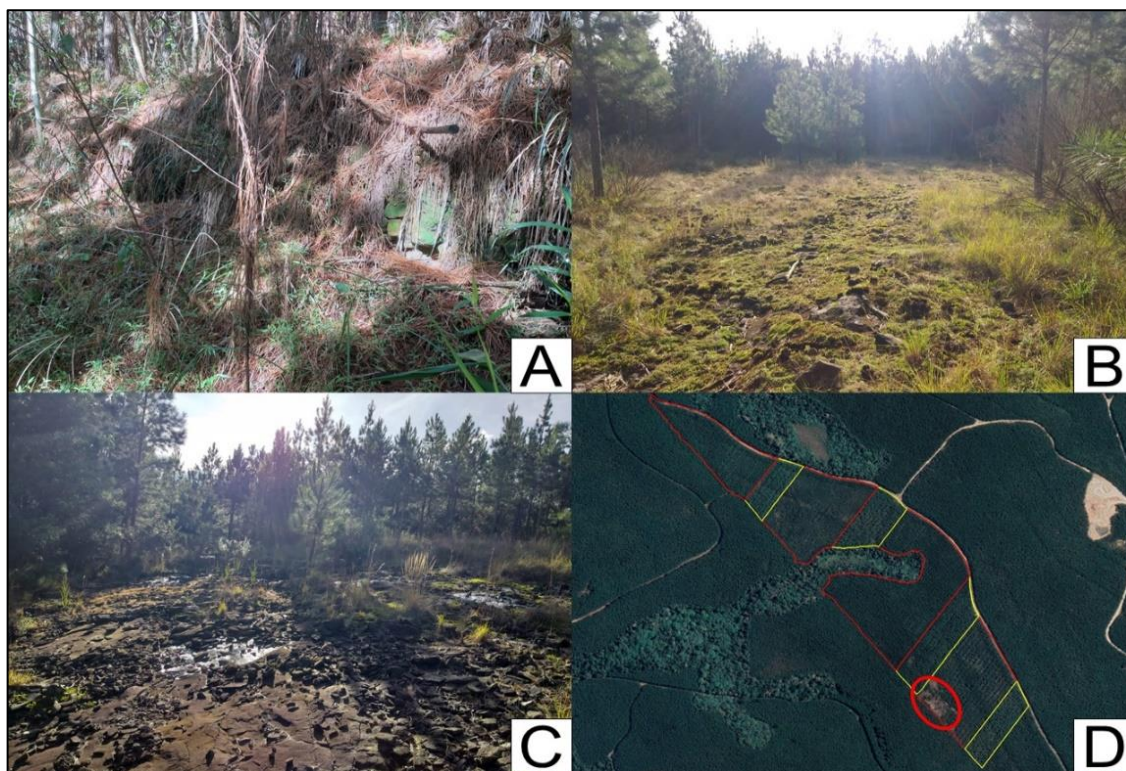
evidenciando a presença de plantas subdesenvolvidas, além de uma considerável redução no número de árvores no local.

Figura 13 – Distribuição geoespacial da profundidade do solo, em centímetros, em plantio clonal de *Pinus taeda* no Município de Ponte Serrada, SC.



Fonte: O autor.

Figura 14 – Evidência de afloramento da rocha matriz e da redução de indivíduos no local.



A: Afloramento da rocha matriz no Espaçoamento E1; **B e C:** Afloramento da rocha matriz e indivíduos subdesenvolvidos no Espaçoamento E4; **D:** Vista aérea do espaçoamento E4 em detalhe (imagem do Google Earth).
Fonte: O autor.

5.3 PRODUTIVIDADE VOLUMÉTRICA

A Tabela 5 apresenta os parâmetros para os quatro modelos volumétricos testados, com os respectivos coeficientes de determinação ajustado, F calculado e o erro padrão da estimativa.

Tabela 5 – Parâmetros estimados e medidas de precisão para cada modelo.

Modelos	Parâmetros estimados					S _{xy}
	b ₀	b ₁	b ₂	R ² ajus.	F cal	
Clone CA-44						
1 - Hohenadl	0,01728	0,00003		0,984	681,67	0,007
2 - Schumacher-hall	-9,94331	1,63421	1,28890	0,989	475,46	0,036
3 - Spurr	-9,67190	0,93188		0,986	748,95	0,040
Clone CA-45						
1 - Hohenadl	0,01259	0,00003		0,990	1071,57	0,006
2 - Schumacher-hall	-9,66296	1,75025	1,05808	0,989	517,61	0,034
3 - Spurr	-9,43524	0,90512		0,990	1057,48	0,034
Seminal						
1 - Hohenadl	0,01363	0,00003		0,950	153,22	0,008
2 - Schumacher-hall	-9,45049	1,97032	0,71553	0,956	87,43	0,054
3 - Spurr	-9,51248	0,91001		0,960	190,92	0,052

Fonte: O autor.

Com vista aos resultados apresentados pela Tabela 5, o modelo selecionado para estimar o volume de cada material na área do experimento foi o de Hohenadl (Modelo 1), que apresentou bons valores de coeficiente de determinação ajustado (R²_{ajus}) e de F calculado e, ainda, os menores valores para o erro padrão da estimativa (S_{xy}).

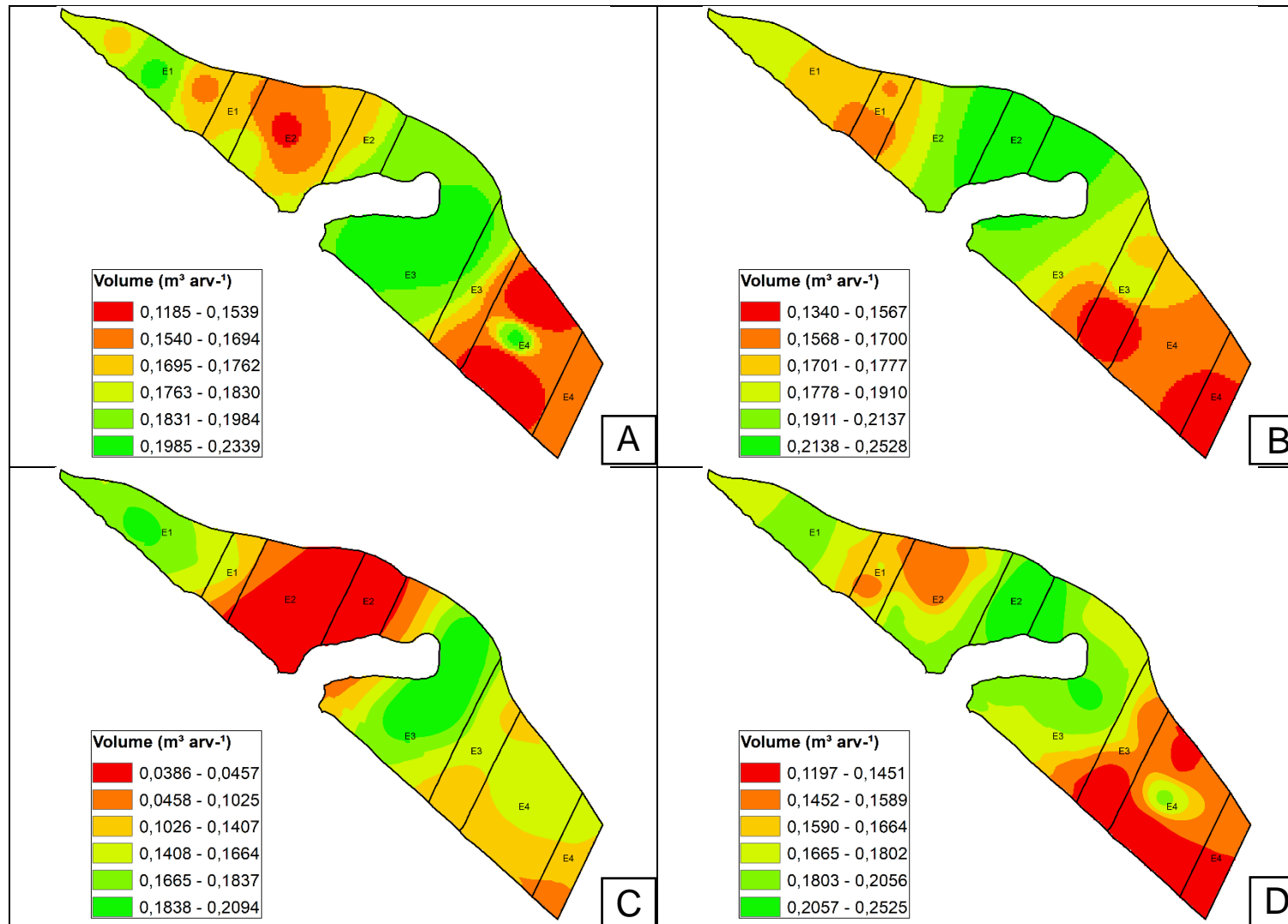
Por se tratar de um estudo clonal com idade de apenas 7 anos em campo, e atrelado ao fato de que também foi investigado o efeito de diferentes espaçamentos sobre o desenvolvimento inicial das plantas (clones e seminal), a análise de produtividade se baseou na variável volume médio por árvore (m³ árv⁻¹), em cada um dos espaçamentos.

Na Figura 15 são apresentadas as classes de produtividade geoespacializadas para os clones CA-44 e CA-45 (15 A e 15 B), material seminal (15 C) e a amplitude de produtividade total das árvores na área de estudo (15 D).

É possível perceber, analisando de forma separada cada material, que há uma tendência de superioridade de volume por árvore nos espaçamentos E3, área constituída pelo clone CA-44 + seminal e, no espaçamento E2, área constituída pelo clone CA-45. Portanto, pode-se afirmar que, tanto o clone CA-44 quanto o seminal, tiveram seu melhor desempenho no espaçamento E3 e, ainda, que o clone CA-45 apresentou maior produtividade volumétrica no espaçamento E2. Cabe ressaltar que, a produtividade do clone CA-45 no espaçamento E2 é a mais relevante quando comparada ao seu próprio clone e aos demais materiais em toda a área de estudo.

A região que apresenta a menor produtividade média está localizada na área compreendida pelo espaçamento E4, aonde todos os materiais apresentam inferioridade em seu desenvolvimento volumétrico médio. Cabe atentar para, analisando separadamente o material seminal, a região de menor valor de volume por árvore, demonstrada pela cor vermelha no mapa (espaçamento E2), não apresenta material seminal, portanto, considera-se também, a menor produtividade para este material no espaçamento E4.

Figura 15 – Distribuição geoespacial do volume (m^3) por árvore de cada material.



A: Volume médio clone CA-44; **B:** Volume médio clone CA-45; **C:** Volume médio Seminal; **D:** Volume considerando todos os genótipos.

Fonte: O autor

Ruiz, Zanata e Pissara (2016) concluem que, ao comparar as informações acerca da influência dos atributos químicos do solo com os atributos de crescimento das plantas, o crescimento do povoamento em área de *Pinus* foi maior em locais com maiores concentrações de Ca, Mg, P e K no solo em relação a locais com menores menor disponibilidade destes elementos. Esta ponderação apresentada pelos autores corrobora com os resultados observados para estes mesmos atributos químicos do solo no presente estudo, haja vista que estes nutrientes se mostraram sob níveis abaixo das faixas adequadas no solo para um padrão de crescimento ideal das plantas no campo.

Em estudo realizado por Rigatto (2005), que investigou a influência de atributos químicos sobre a produtividade e qualidade da madeira de *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft, foi apontado que dos atributos químicos do solo analisados, as maiores correlações com as variáveis de produtividade foram obtidas entre o pH, K, Ca + Mg, saturação de bases e saturação por alumínio, sendo que esta última apresentou uma correlação negativa. Portanto, em solos que apresentam níveis de teores de nutrientes adequados, uma faixa de pH mais elevada e conseqüentemente, baixa saturação por alumínio, o desenvolvimento da espécie *Pinus taeda* tende a ser superior quando comparado a regiões em que o solo apresenta características contrárias.

Pela análise da distribuição de alguns dos atributos químicos do solo, principalmente Ca, Mg e P, que na maior parte da área do experimento são considerados baixos, indicando baixa disponibilidade às plantas, é possível inferir que essa tendência não foi observada para o desenvolvimento das árvores em regiões na área do estudo que apresentam teores mais elevados destes elementos no solo.

Considerando, ainda, a saturação por alumínio na área total, embora apresente variação em seus valores em determinadas regiões, compreendendo as subáreas dos espaçamentos E3 e E4, demonstra teores muito altos, o que torna o solo da área bastante ácido, com pH variando de 4,1 a 4,7.

Em vista disso, a variabilidade no desenvolvimento volumétrico das árvores pode estar relacionada à profundidade e aos teores de argila no solo, pois, de acordo com estudo realizado por Bellote, Dedeczek e Filho (2005), onde estabeleceram uma equação de regressão múltipla de crescimento da espécie *Pinus taeda* através de atributos físicos e químicos do solo para selecionar as variáveis que estavam mais relacionadas com o crescimento das árvores. Os autores constataram que a

resistência do solo à penetração das raízes a 30 cm de profundidade é uma das variáveis de maior importância pela variação que descreve o crescimento em diâmetro e altura das árvores. Portanto, maiores diâmetros e altura dos indivíduos são encontrados em locais onde os solos apresentam maior profundidade de resistência à penetração das raízes. Estes mesmos autores mencionam também que solos de textura argilosa propiciaram maiores taxas de crescimento em altura do *Pinus taeda* aos 12 anos de idade, superando em aproximadamente 2 metros a altura média das árvores quando em solos de textura média.

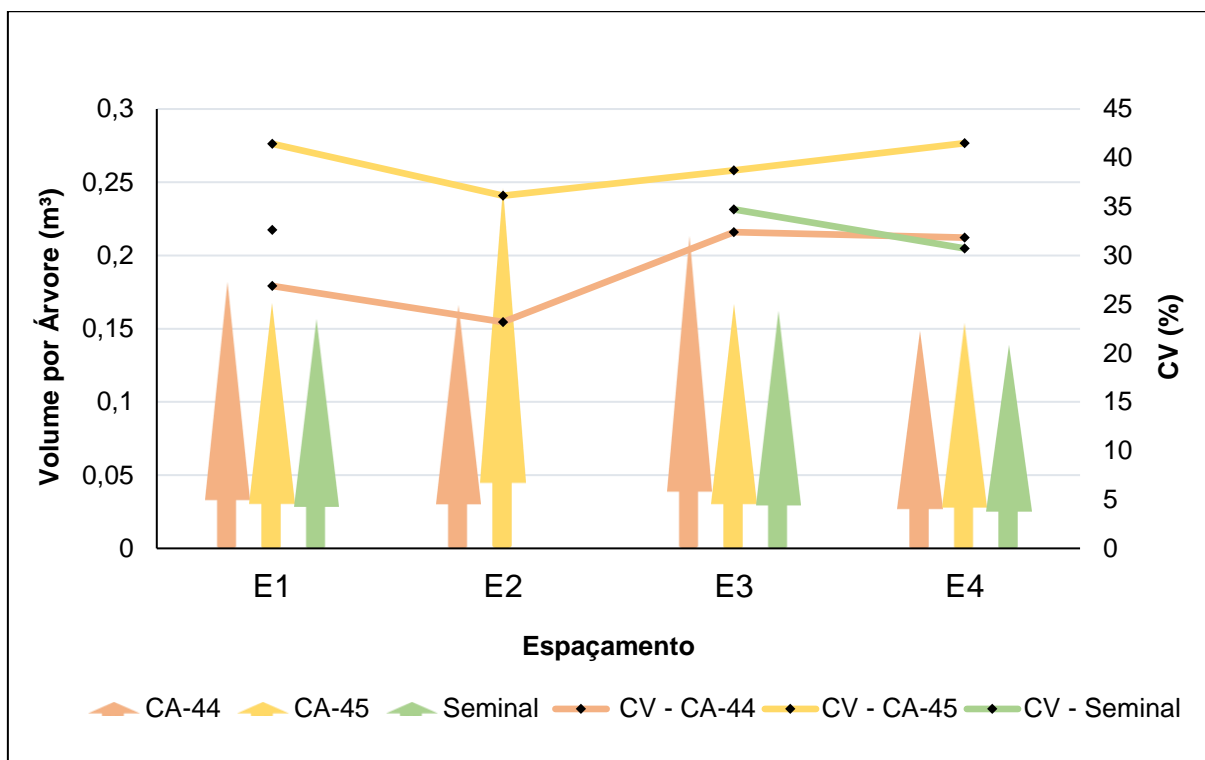
Essas considerações, em especial com relação aos atributos físicos do solo, podem explicar a variabilidade da produção da floresta do presente estudo, visto que os valores de volume por árvore tendem a aumentar em regiões que apresentam solos mais profundos e mais intemperizados (com maior teor de argila).

Estas regiões de solos mais profundos correspondem aos espaçamentos E3 compreendendo o clone CA-44 + seminal, E2 compreendendo o clone CA-45 e E1 compreendendo o clone CA-44 + seminal, apresentando também maiores teores de argila. Na Figura 15 A, B e C, que considera apenas a distribuição geoespacial do volume médio ($\text{m}^3 \text{árv}^{-1}$) de cada material testado, podemos observar que ambos os clones e também o material seminal apresentaram o mesmo comportamento, ou seja, maior crescimento em áreas de maior profundidade (menor resistência do solo) e teor de argila mais elevado, comparando às áreas que apresentam resultados inferiores a estes mencionados.

5.4 CLASSIFICAÇÃO DE SORTIMENTOS

Em relação ao volume médio por árvore (em m^3) apresentado na Figura 16, nota-se que não há uma diferença relevante entre o desenvolvimento volumétrico das árvores dentro dos espaçamentos E1 e E4, embora o espaçamento E4 compreenda a área do experimento que, de modo geral, apresenta os menores valores volumétricos por árvore.

Para os espaçamentos E2 e E3, percebe-se que ambos os clones apresentam notável diferença de crescimento volumétrico entre si e o seminal. O clone CA-45 teve seu melhor desempenho no espaçamento E2, com crescimento volumétrico superior ao CA-44 considerando o mesmo arranjo espacial.

Figura 16 – Volume médio por árvore (m³) para cada material por espaçamento

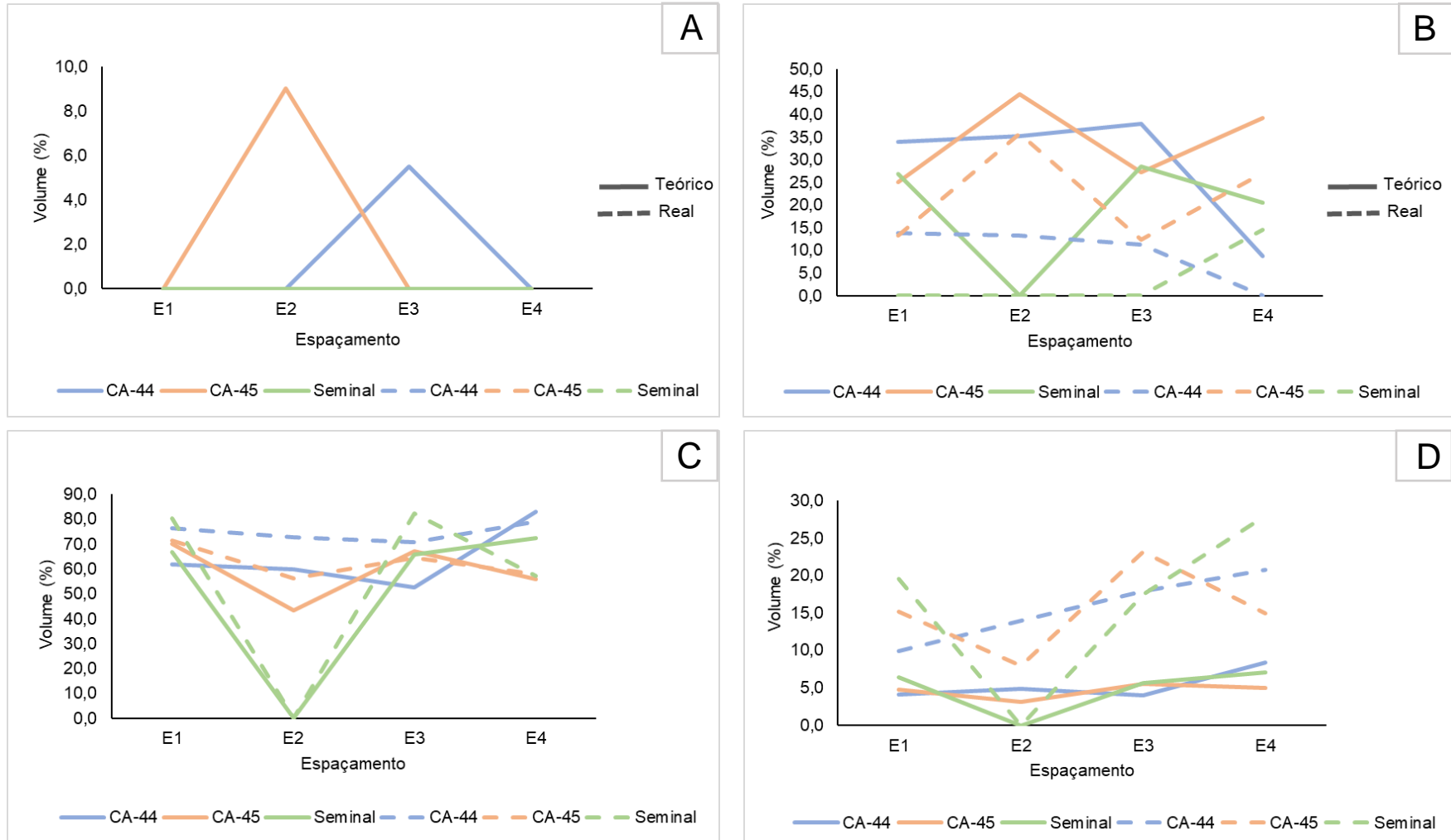
Fonte: O autor.

O clone CA-44 obteve seu melhor desempenho no espaçamento E3, demonstrando crescimento volumétrico superior aos demais materiais, considerando a mesma composição de espaçamento. No entanto, o desenvolvimento volumétrico constatado para o material seminal mostrou-se bastante semelhante nas áreas dos espaçamentos E1, E3 e E4, sendo importante salientar que todos os materiais avaliados apresentaram seu menor desenvolvimento na área representada pelo espaçamento E4.

Considerando que o coeficiente de variação (%) é interpretado como a variabilidade/dispersão dos dados em relação à média, os valores apresentados mostram que há maior heterogeneidade no desenvolvimento do clone CA-45 em relação ao clone CA-44 e seminal, considerando todos os espaçamentos adotados. Em contrapartida, as plantas pertencentes ao clone CA-44 apresentam, de modo geral, maior homogeneidade no seu desenvolvimento em campo.

Com base na produtividade volumétrica e com os sortimentos já estimados foi possível projetar graficamente os resultados obtidos como sendo volume teórico e, em havendo migração de volume entre sortimentos, em volume “real”. Estes resultados estão expressos na Figura 17. Contudo, torna-se necessário enfatizar que:

Figura 17– Porcentagem de sortimento teórico e “real” para cada material testado, em cada espaçamento.



A: Sortimento II; **B:** Sortimento III; **C:** Sortimento IV e **D:** Resíduo.

Fonte: O autor.

(a) não há indivíduos seminais no espaçamento E2 e neste, são apresentados graficamente como zero; e (b) que por não ter havido enquadramento de volume teórico nem tampouco volume “real” para o sortimento I (diâmetro igual ou superior a 35 cm na ponta fina), não há representação gráfica para este sortimento na Figura 17. Justifica-se este por não haver volume pertencente a esta classe de sortimento devido à idade atual do povoamento (7 anos).

Kohler et al. (2015), em estudo sobre a evolução dos sortimentos para *Pinus taeda*, mencionam que somente a partir dos 13 anos de idade a floresta produz volume de madeira para o sortimento que considera o diâmetro na ponta fina de 35 cm, aumentando exponencialmente a partir de então, chegando a apresentar mais de 30% do volume total produzido a partir da idade de 19 anos.

No sortimento II é possível constatar que há apenas sortimento teórico, tendo em vista que o diâmetro limite deste sortimento não corresponde ao comprimento predeterminado da tora. Cabe ressaltar que o volume deste sortimento aparece para os clones CA-44 e CA-45 respectivamente nos espaçamentos E3 e E2, pois, conforme apresentado anteriormente, ambos os clones apresentaram suas maiores produtividades médias, podendo ser correlacionada também aos atributos físicos do solo.

Já nos sortimentos III, IV e Resíduo se percebe que há diferenças no percentual de volume entre sortimento teórico e “real”, e isto ocorre devido a migração de sortimentos, que está relacionada ao comprimento predeterminado para as peças. Portanto, para o sortimento III é perceptível uma diminuição na percentagem de volume “real” em comparação ao teórico, o que proporciona, a partir da migração do volume residual, o aumento do percentual do sortimento “real” na classe IV e Resíduo.

A Tabela 6 apresenta os resultados de volume “real” (em $m^3 ha^{-1}$) e número de toras (n.t. ha^{-1}) de cada sortimento. Deste modo, e considerando que o número de árvores presente em cada espaçamento é diferente em função do arranjo espacial, há uma notável diferença de volume e número de toras quando comparados os espaçamentos de plantio testados.

Tabela 6 – Estimativa de volume (m³ ha-1) e número de toras por hectare (n.t. ha-1) para cada sortimento, material genético e espaçamento.

Total ha ⁻¹			Sortimento I			Sortimento II			Sortimento III			Sortimento IV			Resíduo	
CA-44																
Espaç	Volume	n árv.	n.t.	Volume	%	n.t.	Volume	%	n.t.	Volume	%	n.t.	Volume	%	Volume	%
E1	215,2	1175	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	392	29,6	13,8	4308	164,2	76,3	21,4	9,9
E2	126,6	775	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	258	16,9	13,3	2325	92,0	72,7	17,7	14,0
E3	98,1	450	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	150	11,1	11,3	1500	69,4	70,8	17,5	17,9
E4	94,7	600	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	0	0,0	0,0	1600	75,0	79,2	19,7	20,8
CA-45																
Espaç	Volume	n árv.	n.t.	Volume	%	n.t.	Volume	%	n.t.	Volume	%	n.t.	Volume	%	Volume	%
E1	191,2	1150	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	383	25,2	13,2	3833	136,9	71,6	29,0	15,2
E2	210,9	850	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	850	75,4	35,7	2550	119,0	56,4	16,6	7,9
E3	84,7	500	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	167	10,5	12,3	1333	54,6	64,5	19,6	23,2
E4	112,6	725	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	483	30,5	27,1	1933	65,3	58,0	16,7	14,9
Seminal																
Espaç	Volume	n árv.	n.t.	Volume	%	n.t.	Volume	%	n.t.	Volume	%	n.t.	Volume	%	Volume	%
E1	59,1	375	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	0	0,0	0,0	1125	47,6	80,5	11,6	19,5
E2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E3	203,0	1250	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	0	0,0	0,0	3750	167,4	82,5	35,6	17,5
E4	59,6	425	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	142	8,7	14,6	850	34,2	57,4	16,7	28,0

Sendo: n.t = número de toras

Fonte: O autor.

A partir dos resultados alcançados na classificação dos sortimentos é possível verificar que o volume e número de árvores por hectare entre os clones apresentam-se de forma nitidamente discrepantes nos espaçamentos E2 e E4, o que pode ser resultado da influência dos diferentes espaçamentos e materiais testados. Num primeiro momento convém salientar que houve um elevado número de falhas em algumas parcelas de inventário dentro da área compreendida pelo clone CA-44. Porém este fato, atrelado ao desenvolvimento dos indivíduos, permite a constatar uma diferença importante no volume e no número de toras por hectare para os sortimentos que foram classificados. O volume e número de árvores ha^{-1} apresentados na Tabela 6, foram calculados a partir dos dados levantados em inventário.

Apesar do cenário supracitado, percebe-se que o número de toras e o volume para as classes de sortimentos III e IV dos clones CA-44 e CA-45, nos espaçamentos E2 e E4 são bem distintos. No espaçamento E2, o clone CA-45 apresenta 35,7% do seu volume total na classe de sortimento III e, ainda, há pelo menos uma tora por árvore neste sortimento, representando 850 toras ha^{-1} . Já o clone CA-44, neste mesmo espaçamento e mesma classe do sortimento III, apresenta apenas 13,3% do seu volume ha^{-1} , que corresponde à estimativa de somente 258 toras por hectare para esta classe de sortimento.

Para o espaçamento E4, levando em conta o clone CA-45, nota-se que este apresenta 27,1% do seu volume total na classe de sortimento III, enquanto o clone CA-44 não apresenta volume para esta classe de sortimento, pois para este último clone 79,2 % do volume total ficou representado apenas na classe IV. Portanto, o percentual de volume do clone CA-44 na classe IV é superior ao percentual de volume do clone CA-45, porém, o número de toras por hectare do CA-44 é inferior ao do CA-45, e isso pode ser explicado pelo menor número de árvores apresentado pelo clone CA-44. Complementarmente, cabe ressaltar que há também um maior aproveitamento de madeira por parte do clone CA-45 em relação aos outros materiais, nos espaçamentos E2 e E4, minimizando, desta forma percentual de resíduo.

Nos espaçamentos E1 e E3 é possível verificar que entre os clones o percentual de volume e número de toras por hectare não mostram diferenças relevantes para as classes de sortimento III, pois apresentam semelhança para o número de indivíduos e desenvolvimento volumétrico. No entanto, o clone CA-44 apresenta maior aproveitamento de madeira no sortimento IV em ambos os

espaçamentos (E1 e E3) e, conseqüentemente, apresenta maior número de toras comparado ao clone CA-45.

Já para o material seminal nos espaçamentos E1, E3 e E4, o volume total e número de árvores por hectare apresentam valores bastante distintos em relação aos dois clones, devido ao arranjo do espaçamento em que os indivíduos estão dispostos no campo.

Nos espaçamentos E1 e E3, para o seminal, verifica-se que há volume apenas na classe de sortimento IV, embora este material apresente 80,5% do volume total no E1, o volume e o número de toras ha^{-1} , quando comparado aos dois clones, é bastante reduzido em função do número de indivíduos, que estão presentes apenas na 5ª linha de plantio. Em contrapartida, no E3, o volume e o número de toras por hectare para a classe IV (167,4 e 3750, respectivamente) são bastante superiores aos apresentados pelos dois clones, visto que o número de árvores é bastante elevado em função do arranjo do espaçamento adotado.

É possível ainda perceber que, embora os indivíduos seminais apresentem volume apenas na classe de sortimento IV nos espaçamentos E1 e E3, o maior aproveitamento de madeira é justamente nestes dois espaçamentos se comparados ao aproveitamento no espaçamento E4, que apesar de apresentar volume na classe de sortimento III, tem maior percentual de volume residual.

Em estudo realizado por Kohler (2013), que analisou a evolução do afilamento do tronco e do sortimento em plantios de *Pinus taeda*, um dos resultados apontados foi que a diferença da porcentagem volumétrica das classes de sortimento se dá em função do crescimento dos indivíduos no decorrer do tempo (elevações no incremento). O mesmo autor ainda menciona que há uma redução do percentual de volume dos sortimentos que apresentam diâmetro limite inferior a 8 cm à medida que o desenvolvimento volumétrico das árvores aumenta.

Contudo, analisando o desenvolvimento volumétrico de cada material em cada espaçamento e, ainda, considerando que a classe de resíduo do presente estudo é representada por diâmetros menores que 8 cm, percebe-se que há uma certa relação de maior aproveitamento do volume de madeira dos indivíduos clonais e seminais, em áreas onde estes apresentaram maior desenvolvimento volumétrico médio, quando estes materiais são comparados entre si no mesmo espaçamento.

6 CONCLUSÕES

A área do presente estudo apresenta variabilidade espacial para todas as variáveis inerentes aos atributos químicos e físicos do solo, bem como para a descrição regionalizada do crescimento dos indivíduos clonais e seminais de *Pinus taeda* L.

Os resultados de produtividade alcançados podem estar também relacionados às características edáficas da área aonde esses tratamentos se localizam. Em vista disso, conclui-se que a profundidade do solo e teor de argila tiveram um papel importante no desenvolvimento dos indivíduos, visto que há pouca correlação visual do desenvolvimento dos indivíduos quando relacionados aos atributos químicos do solo.

O desenvolvimento aos 7 anos de idade do material testado no experimento (clones + seminal) assumiu patamares semelhantes de produtividade nos espaçamentos E1 e E4. Contudo, no espaçamento E2 (plantas menos adensadas) o clone CA-45 mostra uma tendência de crescimento volumétrico levemente superior ao CA-44, enquanto que este clone mostra uma produtividade mais elevada em relação ao clone CA-45 e seminal no espaçamento E3, cujas plantas estão mais adensadas.

Regiões de solos com profundidade e teor de argila mais elevados tendem a proporcionar tanto aos indivíduos clonais quanto aos seminais de *Pinus taeda* L., maior capacidade de desenvolvimento volumétrico em comparação com regiões que apresentam características contrárias.

Na classificação dos sortimentos conclui-se que há tendência de superestimação quando considerado o sortimento teórico, o volume das classes de sortimentos de maior qualidade (S. II e S. III). Considerando o sortimento "real", há tendência de reduzir o volume das classes de sortimento de maior qualidade, havendo migração de sortimento para as classes subsequentes (S. IV e Resíduo), elevando o percentual de volume destas.

Por fim, sugere-se uma análise hierárquica (AHP) através de cenários que poderão testar o peso de contribuição de cada uma das variáveis analisadas sobre o desempenho de plantas clonais e seminais no que diz respeito aos atributos químicos e físicos do solo, em cada um dos espaçamentos de plantio em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, A. V. de; SOUSA, V. A. de; FRITZSONS, E.; JUNIOR, J. E. P. **Programa de melhoramento de Pinus da Embrapa Florestas**. Embrapa Florestas, Documentos 233, 81 p., Colombo, PR, 2011.
- ARCE, J. E. **Um sistema de análise, simulação e otimização do sortimento florestal em função da demanda por multiprodutos e dos custos de transporte**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2000.
- BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A.; M. T. FILHO. **Influência dos nutrientes minerais e do solo sobre a produtividade, a estrutura anatômica e a densidade da madeira de *Pinus taeda***. Documentos 58, Embrapa, Colombo, PR, 2005.
- BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A. **Atributos físicos e químicos do solo e suas relações com o crescimento e a produtividade *Pinus taeda***. Boletim de Pesquisa Florestal, Embrapa Florestas, Colombo, n. 53, p. 21, 2006. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/203>. Acesso em: 10 out. 2021.
- COSTA, E. A.; MARTINS, M. T.; SEQUEIRA, M. C.; MARANGON, G. P.; SOUSA, A. C. N.; SCHONS, C. T. **Modelos polinomiais para descrever a forma do tronco de *Pinus taeda* L.** Revista Tree Dimensional, Pro Floresta, v.4, n. 8, p. 13, Goiânia, GO, 2019.
- COUTO, H. T. Z. do. **Sistemas de Informações Geográficas: aplicações florestais**. Instituto de Pesquisas Florestais, IPEF Série Técnica, Piracicaba, SP, 1993.
- DRESCHER, R.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. **Sortimentos de *Pinus elliottii* Engelm para a região da serra do sudeste do estado do Rio Grande do Sul – Brasil**. Revista Ciência Florestal, v. 9, n. 2, p. 55 – 73, Santa Maria, RS, 1999.
- DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. V. M. **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004.
- ERNANI, P.R.; FIGUEIREDO, O.R.A.; BECEGATO, V.; ALMEIDA, J.A. **Decréscimo da retenção de P pelo aumento do pH**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.20, p.159-162, 1996.
- FERREIRA, N. C. **Apostila de sistema de informações geográficas**. Curso Superior de Tecnologia em Geoprocessamento, Centro Federal de Educação Tecnológica do Estado de Goiás, Goiânia, GO, 2006. Disponível em: http://www.faed.udesc.br/arquivos/id_submenu/1414/apostila_sig.pdf.
- GONÇALVES, L. U. **Influência do espaçamento e do sítio na produção de povoamentos clonais de *Eucalyptus saligna* Smith no município de Ortigueira – PR**. Trabalho de Conclusão de Curso II, Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Dois Vizinhos – PR, 2016.

INTERNETIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE. **Manual internacional de fertilidade do solo**. Tradução e adaptação de Alfredo Scheid Lopes, 2ª Edição, revisada e ampliada, 177 p., Piracicaba, SP, 1998.

KOHLER, S. V.; KOHLER, H. S.; FILHO, A. F.; ARCE, J. E.; MACHADO, S. A. **Evolução do sortimento em povoamentos de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina**. Revista Floresta, v. 45, n. 3, p. 545 – 554, Curitiba, PR, 2015.

KOHLER, S. V. **Evolução do afilamento do tronco e do sortimento em plantios de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina**. Dissertação (Manejo Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2013.

LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R. **Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos**. Geomatemática, Texto Didático 6, UNESP, Rio Claro, 2002.

LIMA, R.; INOUE, M. T.; FILHO, A. F.; ARAUJO, A. J. de; MACHADO, S. do A. **Efeito do espaçamento no desenvolvimento volumétrico de *Pinus taeda* L.** Revista Floresta e Ambiente, 20(2): p. 223 – 230, 2013.

MEDEIROS, C. B.; PIRES, F. **Banco de dados e sistemas de informações geográficas**. Embrapa, Sistemas de Informações Geográficas, Aplicações na Agricultura, 2ª edição, Cap. 3, p. 31 – 45, 1998.

NIERI, E. M. **Adaptabilidade e seleção em progênies de *Pinus* tropicais aos três anos**. Tese (Doutorado em Silvicultura e Genética Florestal), Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2019.

ORTIZ, J. L. **Emprego do geoprocessamento no estudo da relação entre potencial produtivo de um povoamento de Eucalipto e atributos do solo e do relevo**. Dissertação (Recursos Florestais), Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2003.

PELISSARI, A. L. **Silvicultura de precisão aplicada ao desenvolvimento de *Tectona grandis* L.f. na região sul do estado de Mato Grosso**. Dissertação (Ciências Florestais e Ambientais), Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, 2012.

PEREIRA, G.; BREUNIG, F. M. **Resposta espectral de alvos**, Geotecnologias e suas aplicações, Universidade Federal do Pará, AEDI – UFPA, 2012.

PIRES, C. A. da F.; STRIEDER, A. J.; DAL'ASTA, A. P. **Geoestatística - caderno técnico**. Série naturais e exatas, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011.

POTRICH, D. C. **Variabilidade espacial de atributos do solo e correlação com a produtividade da cultura da soja**. Dissertação (Mestrado em agronomia), Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, Mato Grosso do Sul, 2012.

Relatório Anual IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores, Brasília, 2020.

Relatório Anual IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores, Brasília, 2021.

RIBEIRO, M. dos S. **Geoestatística utilizada no planejamento estratégico de florestas de produção de *Pinus taeda* L.** Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Florestal, Área de concentração em Manejo Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2014.

RIGATTO, P. A. **Influência dos atributos do solo sobre a produtividade e a qualidade da madeira de *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft.** Dissertação (Mestrado em agronomia), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2002.

RIGATTO, P. A.; DEDECEK, R. A.; MATTOS, J. L. M. de. **Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda*.** Revista Árvore, v. 29, n. 5, p. 701 – 709, Viçosa, MG, 2005.

RUFINO, T. M. C.; THIERSCH, C. R.; FERREIRA, S. O.; JUNIOR, H. K.; FAIS, D. **Uso da geoestatística no estudo da relação entre variáveis dendrométricas de povoamentos de *Eucalyptus sp.* e atributos do solo.** Revista Ambiente, v. 2, p. 83 – 93, Guarapuava, PR, 2006.

RUIZ, J. G. C. L.; ZANATA, M.; PISSARA, T. C. T. **Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas de *Pinus* do instituto florestal de batatais – SP.** Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science, v. 9, n. 2, p. 87 – 97, Guarapuava, PR, 2016.

SANQUETTA, C. R.; MORA, A. L.; BORSATO, R.; VIDAL, M. A. S.; PEIXOTO, A. M.; CHIARANDA, R. **Efeito de espaçamento de plantio em reflorestamentos II *Pinus taeda* L. em Jaguariaíva – PR.** Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais, v.1, p. 55 – 61, Curitiba, PR, 2003.

SHIMIZU, J. Y.; SEBBENN, A. M. **Pínus na silvicultura brasileira.** 223 p. Embrapa Florestas, Colombo, PR, 2008.

SHIMIZU, J. Y. **Pinus na silvicultura brasileira.** 223 p. Embrapa Florestas, Colombo, PR, 2008.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO – NÚCLEO REGIONAL SUL. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.** Comissão de Química e Fertilidade do Solo. 11ª Edição, 376 p., RS/SC, 2016.

SOUZA, C. A. M. **Modelos de afilamento para *Pinus taeda* L. ajustados segundo a forma do tronco e métodos de estratificação.** Tese (Manejo Florestal), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.

SOUZA, C. A. M.; CHASSOT, T.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; FLEIG, F. D. **Modelos de afilamento para o sortimento do fuste de *Pinus taeda* L.** Revista Ciência Rural, v. 38, n. 9, p. 2506 – 2511, Santa Maria, RS, 2008.

SOUZA, R. R. **Estudo da forma do fuste de árvores de eucalipto em diferentes espaçamentos.** Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal e Silvicultura), Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, MG, 2013.

VIEIRA, S. R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo.** In: **NOVAIS, R. F et al.** Tópicos em Ciências do Solo, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000.

SOUZA, I. C. G. de. **Seleção e melhoramento em populações clonais de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden.** Tese (Doutorado em Ciências Biológicas-Genética). Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016.

VETORAZZI, C. A.; FERRAZ, S. F. B. **Silvicultura de precisão: uma nova perspectiva para o gerenciamento de atividades florestais.** In: BORÉM, A.; GIÚDICE, M. P.; QUEIROZ, D. M. Agricultura de precisão. Viçosa, MG: Editora UFV, 2000. p. 65-75.

WREGE, S. M.; STEIMETZ, S.; JÚNIOR, C. R.; ALMEIDA, I. R. de; GARRASTAZU, M. C.; HERTER, F. G.; CARAMORI, P. H.; MATZENAUER, R.; RADIN, B.; BRAGA, H. J.; PANDOLFO, C.; PRESTES, S. D.; CUNHA, G. R. da; MALUF, J. R. T. **Atlas climático da região sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.** 2ª edição, Embrapa, Brasília, DF, 2012.