

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Táscilla Magalhães Loiola

**DIMENSÃO DO DIÂMETRO E DINÂMICA DE ESPÉCIES LATIFOLIADAS NA
FLORESTA OMBRÓFILA MISTA SOB DIFERENTES INTENSIDADES DE
COMPETIÇÃO**

Santa Maria, RS
2022

Táscilla Magalhães Loiola

DIMENSÃO DO DIÂMETRO E DINÂMICA DE ESPÉCIES LATIFOLIADAS NA FLORESTA OMBRÓFILA MISTA SOB DIFERENTES INTENSIDADES DE COMPETIÇÃO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de concentração em Manejo Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Guimarães Finger

Santa Maria, RS

2022

Loiola, Tászcilla Magalhães
DIMENSÃO DO DIÂMETRO E DINÂMICA DE ESPÉCIES
LATIFOLIADAS NA FLORESTA OMBRÓFILA MISTA SOB DIFERENTES
INTENSIDADES DE COMPETIÇÃO / Tászcilla Magalhães Loiola.-
2022.
146 p.; 30 cm

Orientador: César Augusto Guimarães Finger
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2022

1. Manejo Florestal Sustentável 2. Araucaria
angustifolia 3. Modelagem do diâmetro 4. Valor de
Importância I. Finger, César Augusto Guimarães II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, TÁSCILLA MAGALHÃES LOIOLA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Táscilla Magalhães Loiola

DIMENSÃO DO DIÂMETRO E DINÂMICA DE ESPÉCIES LATIFOLIADAS NA FLORESTA OMBRÓFILA MISTA SOB DIFERENTES INTENSIDADES DE COMPETIÇÃO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de concentração em Manejo Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora em Engenharia Florestal**.

Aprovada em 22 de julho de 2022:

**César Augusto Guimarães Finger, Dr.
(Presidente/Orientador)**

Bruna Denardin da Silveira, Dr. (UNIPAMPA)

Emanuel Arnoni Costa, Dr. (UFU)

Gabriel Paes Marangon, Dr. (UNIPAMPA)

Maria Cristina Coelho, Dr. (UFT)

Santa Maria, RS

2022

Aos meus pais, irmão
e avós, meu porto seguro
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A minha família, meu pai Joel, minha mãe Albina e meu Irmão Estéfano, minha avó Alzira, tios Juarez e Dada, por todo o suporte e amor incondicional, por serem o farol que orienta o meu caminho, pra onde sempre posso voltar, por jamais deixarem de acreditar.

Aos meus avós Alda Loiola, Sabino Loiola e Alcides Magalhães, *In memorian*, também formadores da minha personalidade.

Ao meu orientador Prof. Dr. César Finger, por todo o ensinamento e pelo grande aprendizado proporcionado, pela segurança que me passou e pelo incentivo durante todas as etapas de desenvolvimento desse trabalho, sendo primordial para meu crescimento profissional.

A todos os professores que fizeram parte da minha trajetória até hoje, das escolas e universidade das quais fiz parte, sem vocês jamais chegaria até aqui.

A minha amiga Roberta pelas conversas, pelas trocas, e principalmente pelos maravilhosos momentos de amizade, descontração e parceria, és o melhor presente do doutorado.

Ao meu amigo Roraí por nunca perdermos o contato, a amizade e as conversas, mesmo que distantes fisicamente, também pela ajuda primordial durante os processamentos.

Aos meus guias por nunca largarem da minha mão e não me deixarem entregar os pontos.

Aos meus colegas de laboratório e de PPGEF pelos momentos que passamos juntos, em especial ao Pábulo pelas conversas e palavras sempre acalentadoras e à Cris também pelas conversas, desabafos e pela companhia na “nossa” sala 12.

As pessoas que foram fundamentais para que esse trabalho se realizasse, por terem ajudado durante a coleta de dados, minha “Equipe Tiriva”: Varlen Nassinhack e Roberta Fantinel, parceiros incansáveis sempre encarando tudo com bom humor e amizade, jamais esquecerei de todos os perrengues, geadas, chuvas e principalmente os excelente momentos na FLONA, do quais já sinto saudades, à Camila Andrzejewski por ter encarado de forma generosa os primeiros campos junto comigo, ao meu irmão Estéfano Loiola por mais uma vez estar comigo nas empreitadas da

vida, até mesmo nas coletas de dados da minha tese, e à Gisa pela ajuda nas coletas de dados.

Ao companheiro “Cabo” e a dona Beloni pela disposição, preocupação e ajuda durante nossos dias na FLONA.

À todas as pessoas que encontrei em Santa Maria e na UFSM e que passaram pela minha vida durante esse período do doutorado e que, de uma forma ou outra, contribuíram para minha evolução como pessoa.

À Floresta Nacional de São Francisco de Paula e ao ICMBio por autorizarem o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao CNPq pela disponibilidade da bolsa de estudos.

Minha sincera gratidão!

RESUMO

DIMENSÃO DO DIÂMETRO E DINÂMICA DE ESPÉCIES LATIFOLIADAS NA FLORESTA OMBRÓFILA MISTA SOB DIFERENTES INTENSIDADES DE COMPETIÇÃO

AUTORA: Tássilla Magalhães Loiola
ORIENTADOR: Prof. Dr. César Augusto Guimarães Finger

Este trabalho foi construído sob o objetivo principal de analisar e fornecer informações a respeito da dinâmica e relações existentes entre espécies latifoliadas com maior importância ecológica e a *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, frente as condições do ambiente de três fragmentos de Floresta Ombrófila Mista e, assim, sugerir modelos para o diâmetro em nível de árvores, crescendo sob competição, a partir do uso de diferentes técnicas de modelagem. A pesquisa desenvolveu-se na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, tomando como base inicial dados do projeto PELD. Foram descritas as características fitossociológicas das áreas de estudo, e com isso foi possível definir as espécies com maior valor de importância, entendidas como espécies de maior valor ecológico para os locais, a partir disso as espécies objetivo desse estudo foram selecionadas e caracterizadas. Em seguida descreveu-se os atributos do ambiente de cada parcela com técnicas de geoestatística, possibilitando visualizar a distribuição espacial e preferências ambientais das espécies a partir da krigagem ordinária e confecção de mapas interpolados. A análise da mortalidade e sobrevivência das árvores, permitiu inferir que o alto estresse competitivo imposto pelas árvores dominantes do dossel gerou a morte das árvores dos estratos inferiores, até mesmo de árvores jovens, além disso, ficou evidente que a senilidade também contribuiu para a mortalidade das árvores, bem como, a ação de eventos climáticos constitui-se como um fator que colabora para o aumento das taxas de mortalidade. Os índices morfométricos permitiram explicar a vitalidade e estabilidade das árvores das 13 espécies, mostrando que diferenças na morfometria da copa estão refletidas na variação dos dados, pois essas características se modificam conforme o cenário ambiental. As árvores de maior diâmetro estão sob menor nível de competição em comparação às árvores menores. Entre as variáveis consideradas para a modelagem do diâmetro, a altura possui associação significativa com o diâmetro das árvores de 10 espécies e não significativa para três. As variáveis descritoras da copa apresentam alta heterogeneidade, porém para algumas das espécies a variável dc apresentou correlação significativa. O índice de competição selecionado como variável explicativa da competição foi o Índice de Corona e Ferrara. Não houve regressão para os dados dos modelos ajustados para o diâmetro, mesmo com a aplicação das diferentes técnicas. Por outro lado, resultados promissores foram alcançados com o uso das técnicas de inteligência artificial, considerando a complexidade dos dados. Os modelos gerados para o índice de competição não apresentaram regressão devido a elevada heterogeneidade dos dados. Assim, recomenda-se a continuidade de pesquisas que incluam as premissas do manejo florestal sustentável na FOM, abrangendo as espécies latifoliadas e análises mais robustas com o avanço dos métodos de IA, a fim de garantir a perpetuidade desses ecossistemas nas gerações futuras.

Palavras-chave: Manejo Florestal Sustentável. *Araucaria angustifolia*. Modelagem do diâmetro. Valor de Importância.

ABSTRACT

AUTHOR: Tássilla Magalhães Loiola
ADVISOR: Prof. Dr. César Augusto Guimarães Finger

DIMENSION OF DIAMETER AND DYNAMICS OF LATIFOLIATED SPECIES IN MIXED OMBROPHILOUS FOREST UNDER DIFFERENT COMPETITION INTENSITIES

This work was built with the main objective of analyzing and providing information about the dynamics and relationships between broadleaf species with greater ecological importance and *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, in face of the environmental conditions of three fragments of Mixed Ombrophilous Forest and , thus , suggest models for the diameter at the level of trees, growing under competition, using different modeling techniques. The research was carried out in the National Forest of São Francisco de Paula, RS, based on data from the PELD project. Initially, the phytosociological characteristics of the study areas were described, and with this it was possible to define the species with the highest value of importance, understood as the species of greater ecological value for the places, from which the target species of this study were selected and characterized. Then, the environmental attributes of each plot were described using geostatistical techniques, making it possible to visualize the spatial distribution and environmental preferences of the species from ordinary kriging and interpolated maps. The analysis of the mortality and survival of the trees allowed us to infer that the high competitive stress imposed by the dominant trees caused the death of trees in the lower strata, even young trees, in addition, it was evident that senility also contributed to mortality, as well as the action of climatic events, the factor that contributes to the increase in mortality rates. The morphometric indices made it possible to explain the vitality and stability of the trees of the 13 species, showing that differences in crown morphometrics are reflected in the variation of the data, as these characteristics change according to the environmental scenario. Larger diameter trees are under a lower level of competition compared to smaller trees. Among the variables considered for the diameter modeling, height has a significant association with the diameter of trees for 10 species and not significant for three. The canopy descriptor variables present high heterogeneity, however for some of the species the dc variable presented a significant correlation. The competition index selected as the explanatory variable of competition was the Corona and Ferrara Index. There was no regression for the data of the models adjusted for diameter, even with the application of the different techniques. On the other hand, promising results were achieved with the use of artificial intelligence techniques, considering the complexity of the data. The models generated for the competition index did not show regression due to the high heterogeneity of the data. Thus, it is recommended to continue researches the premises of sustainable management in the FOM, covering more robust management with the advancement of IA in order to guarantee the perpetuity of these ecosystems in future generations.

Keywords: Sustainable Forest Management. *Araucaria angustifolia*. Diameter modeling. Importance Value.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização geográfica da Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, e das três parcelas onde se desenvolveu a pesquisa	32
Figura 2 - - Representação da amostragem das características do solo em fragmento de Floresta Ombrófila Mista, na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil.....	35
Figura 3 - Obtenção dos atributos do solo com trado holandês na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil	36
Figura 4 - Utilização do densiômetro na quantificação da abertura do dossel nas parcelas estudadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paulo, RS, Brasil	37
Figura 5 - Obtenção dos parâmetros da copa das árvores amostradas, São Francisco de Paula, RS, Brasil	38
Figura 6 - Semivariogramas isotrópicos e mapas interpolados para a) pedregosidade; b) profundidade; c) umidade e d) abertura de dossel no Parcela 1, FLONA – SFP, São Francisco de Paula, RS, Brasil	51
Figura 7 - Semivariogramas isotrópicos e mapas interpolados para a) pedregosidade; b) profundidade; c) umidade e d) abertura de dossel no Parcela 1	56
Figura 8 - Semivariogramas isotrópicos e mapas interpolados para a) pedregosidade; b) profundidade; c) umidade e d) abertura de dossel no Parcela 2, FLONA – SFP, São Francisco de Paula, RS, Brasil	58
Figura 9 - Semivariogramas isotrópicos e mapas interpolados para a) pedregosidade; b) profundidade; c) umidade e d) abertura de dossel no Parcela 3, FLONA – SFP, São Francisco de Paula, RS, Brasil	59
Figura 10 - Vinte espécies com os maiores Valores de Importância, identificadas na área denominada Parcela 1, em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista, São Francisco de Paula, RS, Brasil	63
Figura 11 - Vinte espécies com os maiores Valores de Importância, identificadas na área de nominada Parcela 2, em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista, São Francisco de Paula, RS, Brasil	64
Figura 12 - Vinte espécies com os maiores Valores de Importância, identificadas na área de nominada Parcela 3 em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista, São Francisco de Paula, RS, Brasil	65

Figura 13 – Distribuição de frequência nas classes de diâmetro para as árvores de <i>Araucária angustifolia</i> e para as espécies de interesse na Parcela 1, São Francisco de Paula, RS, Brasil	71
Figura 14 – Distribuição de frequência nas classes de diâmetro para as árvores de <i>Araucária angustifolia</i> e para as espécies de interesse na Parcela 2, São Francisco de Paula, RS, Brasil	71
Figura 15 – Distribuição de frequência nas classes de diâmetro para as árvores de <i>Araucária angustifolia</i> e para as espécies de interesse na Parcela 3, São Francisco de Paula, RS, Brasil	72
Figura 16 – Distribuição espacial das espécies em estudo de acordo com as características do ambiente na Parcela 1, Florestas Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil	73
Figura 17 – Distribuição espacial das espécies em estudo de acordo com as características do ambiente na Parcela 2, Florestas Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil	77
Figura 18 – Distribuição espacial das espécies em estudo de acordo com as características do ambiente na Parcela 3, Florestas Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil	79
Figura 19 - Taxa de mortalidade para as espécies selecionadas com maior VI e interesse econômico na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, a) Parcela1; b) Parcela 2 e c) Parcela 3	80
Figura 20 - Distribuição do número de árvores registradas como mortas por classes de diâmetro considerando todos os levantamentos realizados, para as espécies com maior índice de mortalidade na Parcela 1, São Francisco de Paula, RS, Brasil	83
Figura 21 - Distribuição do número de árvores registradas como mortas por classes de diâmetro considerando todos os levantamentos realizados, para as espécies com maior índice de mortalidade na Parcela 2, São Francisco de Paula, RS, Brasil	84
Figura 22 - Distribuição do número de árvores registradas como mortas por classes de diâmetro considerando todos os levantamentos realizados, para as espécies com maior índice de mortalidade na Parcela 3, São Francisco de Paula, RS, Brasil	

.....	84
Figura 23. Dispersão dos índices de competição calculados para as 13 espécies em relação ao diâmetro a altura do peito das árvores na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil	91
Figura 24 - Correlação de Pearson e dispersão de d em função das variáveis consideradas inicialmente preditoras para cada espécie em estudo na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil	98
Figura 25 - Equivalência de regressões do Grupo 1, contendo as espécies estudadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil	111
Figura 26 - Equivalência de regressões do Grupo 2, contendo as espécies estudadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil	111
Figura 27 - Resíduos gerados pelo ajuste dos MLGs para o diâmetro a altura do peito para as respectivas espécies estudadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil	115
Figura 28 - Dispersão das estimativas dos modelos obtidos pelas redes selecionadas para cada arquitetura testada: a) arquitetura 5; b) arquitetura 6; c) arquitetura 7; d) arquitetura 8; e) arquitetura 9; d) arquitetura 10; e) arquitetura 11	118
Figura 29 - Importância relativa de cada variável do modelo RNA arquitetura 8, contendo os dados levantados na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil	120
Figura 30 - Dispersão do modelo obtido pela RNA contendo as variáveis de maior relevância para as árvores observadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil	121
Figura 31 - Importância relativa (%) das quinze variáveis independentes utilizadas no treinamento do RF, para os dados de 13 espécies da Floresta Ombrófila Mista	123
Figura 32 - Dispersão do modelo inicial obtido pelo RF para espécies da Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil	123
Figura 33 - Dispersão dos dados para os ajustes de RF com as variáveis de maior importância relativa, para as espécies estudadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil	124
Figura 34 - Dados observados e ajustados para as alturas máximas de todas as árvores mensuradas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, e distribuição dos resíduos do modelo	128
Figura 35 - Distribuição dos resíduos para os modelos do índice de competição IC2	

para as 13 espécies estudadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula – RS	128
Figura 36 – Distribuição gráfica do índice de competição calculado para cada árvore objetivo do estudo, em relação ao diâmetro a altura do peito e a altura total, São Francisco de Paula, RS, Brasil	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Índices de Competição testados para espécies arbóreas em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil	43
Tabela 2 - Informações de predominância e estatística descritiva das características ambientais das três parcelas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS.....	49
Tabela 3. Ajuste dos semivariogramas teóricos para as variáveis do ambiente nas três parcelas em fragmento de Floresta Ombrófila Mista, São Francisco de Paula, RS, Brasil	54
Tabela 4 - Parâmetros estruturais de 20 espécies amostradas na Parcela 1 em fragmento de Floresta Ombrófila Mista, São Francisco de Paula, RS, Brasil	67
Tabela 5 - Parâmetros estruturais de 20 espécies amostradas na Parcela 2 em fragmento de Floresta Ombrófila Mista, São Francisco de Paula, RS, Brasil	68
Tabela 6 - Parâmetros estruturais de 20 espécies amostradas na Parcela 3 em fragmento de Floresta Ombrófila Mista, São Francisco de Paula, RS, Brasil	68
Tabela 7 - Espécies selecionadas para a modelagem do incremento na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS	72
Tabela 8 – Valores de amplitude e média dos parâmetros morfométricos por espécie nas três parcelas alocadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil.....	87
Tabela 9 - Tabela 9 - Descrição dos Índices de Competição calculados para as espécies selecionadas nas parcelas alocadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil	91
Tabela 10 - Resumo estatístico da seleção Stepwise para as treze espécies selecionadas em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista, São Francisco de Paula, RS, Brasil	103
Tabela 11 - Análise de variância e estimativa dos parâmetros gerados para o modelo logarítmico do diâmetro a altura do peito – $\ln(d)$ para as 13 espécies estudadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula – RS	105

Tabela 12 - Parâmetros e critérios estatísticos dos modelos testados para o diâmetro das 13 espécies estudadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula – RS..	112
Tabela 13. Estatísticas das RNA selecionadas como mais adequadas para as sete arquiteturas consideradas, para descrição do grupo de espécies da Floresta Ombrófila Mista	118
Tabela 14 - Estatísticas de ajuste da RNA (15-8-1) construída com as variáveis de maior importância relativa, para as árvores observadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil	121
Tabela 15 - Estatísticas geradas pelo treinamento do RF para o conjunto de dados contendo informações das árvores de 13 espécies latifoliadas da FOM	123
Tabelas 16. Estatísticas dos treinamentos (a) com as variáveis de maior importância relativa apontada no treinamento inicial, São Francisco de Paula, RS, Brasil	124
Tabela 17 - Estatísticas do ajuste da hmax em função do diâmetro por regressão quantílica, para as árvores amostradas nas três parcelas da Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil	127
Tabela 18 - Análise de variância e estimativa dos parâmetros gerados para o modelo do índice de competição para as 13 espécies estudadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula – RS	128

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.2 OBJETIVOS	21
1.2.1 Objetivo geral	21
1.2.2 Objetivos específicos	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 FLORESTA OMBRÓFILA MISTA.....	22
2.2 COEXISTÊNCIA DE ESPÉCIES E OS PARÂMETROS FITOSSOCIOLÓGICOS	23
2.3 CRESCIMENTO DAS ÁRVORES	25
2.4 COMPETIÇÃO ENTRE ÁRVORES	26
2.5 MODELAGEM DO CRESCIMENTO.....	28
2.5.1 Modelos de árvores individuais	29
2.6 USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA MENSURAÇÃO FLORESTAL	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 ÁREA DE PESQUISA.....	31
3.2 LEVANTAMENTO DOS DADOS.....	33
3.2.1 Unidades amostrais	33
3.2.2 Identificação e seleção das espécies de maior valor ecológico	34
3.2.3 Obtenção de informações sobre as parcelas	35
3.2.3.1 Coleta de dados sobre o solo	35
3.2.3.2 Determinação da pedregosidade superficial no solo.....	36
3.2.3.3 Levantamento da abertura de dossel	37
3.2.3.4 Atributos do terreno	38
3.2.4 Procedimentos de coleta de dados sobre as árvores	38
3.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS	40
3.3.1 Parâmetros fitossociológicos	40
3.3.2 Modelagem geoespacial para caracterização das parcelas	41
3.3.3 Contabilização da mortalidade e sobrevivência	42
3.5.4 Determinação da competição entre as árvores	43
3.3.5 Modelagem da variável diâmetro	44
3.3.6 Modelagem do Índice de Competição de Corona e Ferrara (1989) – IC2	45
3.3.7 Modelo Geral para o conjunto de espécies latifoliadas a partir de técnicas de Inteligência artificial	47
3.3.7.1 Redes Neurais Artificiais (RNA).....	47
3.3.7.2 Random Forest (RF).....	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS DAS PARCELAS DE ESTUDO	49
4.2 COMPOSIÇÃO FLORÍSTICA, FITOSSOCIOLOGIA E SELEÇÃO DE ESPÉCIES COM MAIOR VALOR ECOLÓGICO	61

4.3 INFLUÊNCIA DE CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE NA SELETIVIDADE AMBIENTAL DE ESPÉCIES ARBÓREAS.....	74
4.4 MORTALIDADE E SOBREVIVÊNCIA DAS ÁRVORES.....	79
4.5 CARACTERIZAÇÃO DA COPA E ÍNDICES MORFOMÉTRICOS	84
4.6 COMPETIÇÃO EXISTENTE ENTRE ÁRVORES	89
4.7 MODELAGEM DO DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO	96
4.7.1 Correlação e determinação das variáveis preditoras.....	96
4.7.2 Modelagem pelo procedimento Stepwise	101
4.7.3 Ajuste de modelos de diâmetros para árvores individuais.....	103
4.7.4 Análise da equivalência de regressões – Análise de covariância.....	109
4.7.5 Análise dos Critérios para ajuste em regressão.....	110
4.7.6 Modelos Lineares Generalizados.....	110
4.7.8 Aprendizado de máquina na predição do diâmetro das árvores.....	116
4.8 MODELAGEM DO ÍNDEICE DE COMPETIÇÃO.....	124
5 CONCLUSÃO.....	136
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	138

1 INTRODUÇÃO

A Floresta Ombrófila Mista (FOM) encontra-se fragmentada, como a maior parte das formações do Bioma Mata Atlântica, segundo dados do SOS Mata Atlântica (2012). Os remanescentes que representam esse tipo de vegetação e que podem permitir sua conservação a longo prazo, são escassos. A redução dessas áreas com florestas naturais aconteceu, principalmente, a partir da exploração de madeiras de alto valor econômico como a *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, *Ocotea porosa* (Nees) Barroso, *Luehea divaricata* Mart. & Zucc. e *Cedrela fissilis* Vell., além das espécies exploradas como produtos secundários *Dicksonia sellowiana* Hook. e *Monteverdia truncata*. ex Reiss. O uso desses recursos, sem considerar a continuidade e sustentabilidade dos ecossistemas, aliado à falta de conhecimento sobre a dinâmica das espécies, colocam os remanescentes da FOM em risco.

Tais formações florestais são de extrema importância devido aos serviços ambientais, sociais e econômicos que prestam para a população, no entanto, não contam com plano de manejo florestal que tenha como preceitos básicos a avaliação correta dos recursos e as previsões de incremento e crescimento, derivadas de modelos para as diferentes espécies que as compõe. Segundo Scolforo (1993), o potencial de produção sob as mais variadas condições do sítio, poderiam fornecer elementos para a otimização do uso desses recursos. Além disso, a continuidade e perpetuidade dos remanescentes florestais deixam de ser favorecidas com a não aplicação de técnicas de manejo sustentável, visto que, o conhecimento dos fatores que exercem influência no crescimento, refletidos na heterogeneidade de formas e dimensões das árvores, formam a base de informações necessárias para intervir e conduzir racionalmente as áreas com florestas nativas.

No momento, o manejo florestal sustentável na FOM é inexistente, em parte pela falta de informações sobre o crescimento, relações e a dinâmica entre as espécies, sendo com isso impossível determinar ações de manejo sustentável e conservação dos componentes. Essa problemática sugere a necessidade de desenvolver modelos matemáticos que possam inferir sobre a resposta da dimensão das árvores frente aos diferentes fatores que sobre ela exercem influência, a fim de contribuir para o manejo florestal sustentável. Mais do que desenvolver modelos matemáticos, é imprescindível entender a relação entre as espécies que possuem

maior valor de importância ecológica, a fim de entender e esclarecer a amplitude dos atributos que influenciam no funcionamento do ecossistema, permitindo que a função desempenhada por estas espécies e sua contribuição dentro da comunidade sejam conhecidas e consideradas no direcionamento da capacidade e adequação ecológica da floresta.

Neste processo de caracterização pode-se fazer uso de técnicas de modelagem matemática das taxas de crescimento e das dimensões das árvores, individualmente ou em grupos, de forma a quantificar onde, quando e como podem ser estabelecidas as ações de manejo. Por outro lado, uma descrição de variáveis representativas das características dendrométricas, morfométricas, competição e características do ambiente, consistem em informações valiosas passíveis de compor planos de ações futuras em florestas naturais.

No Brasil, os métodos mais empregados para prognose da produção em florestas naturais se limitam ao nível de classes de diâmetro ou povoamento (TEIXEIRA et al., 2007; STEPKA et al., 2010), porém, o detalhamento das informações acerca do crescimento e dinâmica das florestas nativas em nível de árvore individual é cada vez mais essencial, devido a elevada importância ecológica dos fragmentos e das espécies. Os métodos de descrição em nível de povoamento não oferecem detalhamento suficiente; assim, uma alternativa são os modelos em nível de árvore individual, geralmente compostos por um conjunto de submodelos que permitem o conhecimento sobre o processo de crescimento das árvores sob diferentes condições de densidade, competição e demais recursos disponíveis ou ausentes (VANCLAY, 1994).

Os modelos de árvores individuais caracterizam-se por sua complexidade, pois aliam submodelos que estimam a mortalidade e o crescimento de variáveis dendrométricas, além disso, as informações sobre dimensões das copas, são muito apreciadas na composição desses modelos quando explicativas. Com as referidas informações é possível prever de forma simulada a produção em nível de árvores individuais, podendo ainda ser extrapolado para a floresta como um todo. Por outro lado, dada a complexidade do sistema floresta nativa, em algumas ocasiões as técnicas tradicionais não permitem construir modelos gerais capazes de predição para um conjunto de espécies, assim como, por vezes, não é possível incluir descritores do ambiente nos modelos ajustados. Em contrapartida, busca-se métodos mais

eficientes que possam descrever melhor essa complexidade na projeção da dimensão do diâmetro, assim, considera-se a utilização de técnicas de inteligência artificial (IA) como uma solução aos casos em que não se alcança sucesso com os métodos tradicionais de modelagem, conforme descrito pelos trabalhos de Schikowski et al. (2015) e Mendonça et al. (2015).

Além disso, ao estudar a dinâmica florestal da FOM é imprescindível avaliar as relações da *Araucaria angustifolia* com as demais espécies, pelo fato de que essa espécie é a que ocorre em maior abundância e domina o estrato superior do dossel. Todos esses fatores e relações estão ligados às condições do sítio (solo, relevo, pedregosidade, entre outros) que, por sua vez, é determinante para o crescimento e dinâmica das árvores na floresta.

No entanto, estudos que abordam a composição e a estrutura de florestas heterogêneas e inequidâneas ainda são um desafio por sua complexidade, uma vez que as interações intra e interespecíficas são muitas, diferente de povoamentos homogêneos em que as condições de sítio e a resposta no crescimento são mais bem controlados. Frente a complexidade do sistema natural, tem-se necessidade de conhecer a diversidade, estrutura, dominância, grau de competição, mortalidade, regeneração e fatores do sítio que influem sobre a dinâmica e crescimento dos remanescentes, os quais oferecem subsídios para estabelecer estratégias adequadas de manejo, visando a conservação e o uso múltiplo sustentado dos recursos florestais.

A partir disso é possível obter florestas estruturadas, contribuindo para a perpetuação das espécies, a manutenção dos benefícios ecológicos e o bem-estar econômico e social das comunidades, justificando a importância deste estudo. Para tanto, os ecossistemas naturais presentes nas unidades de conservação como a Floresta Nacional de São Francisco de Paula, possibilitam estudos das relações entre as espécies em seus habitats originais e, com isso, subsidiam futuras intervenções que possam ocorrer em outras áreas.

Diferentes trabalhos estão em desenvolvimento no país buscando descrever a dinâmica florestal entre espécies em florestas naturais, considerando as variáveis intrínsecas às condições impostas às árvores (ERDMANN, 2019). Em florestas tropicais as pesquisas desenvolvidas nos últimos tempos mostram o impacto dos fatores ambientais sobre as espécies e/ou toda a estrutura da floresta, seja este efeito de forma substancial ou mesmo de forma mais clara, condicionando o dossel

dominante (NASCIMENTO, 2016; LUSTOSA JUNIOR et al., 2019). Da mesma forma, em Floresta Ombrófila Mista têm-se desenvolvido estudos como os de Téo et al. (2008), Orellana (2014) e Minatti (2019), por meio dos quais os autores inferem sobre a densidade das florestas, sucessão florestal de grupos ecológicos, a competição existente entre grupos de espécies e sobre modelos de árvore individual para descrever a dinâmica de crescimento das espécies.

Contudo, inferir sobre as relações entre espécies e as respostas da dimensão e forma delas, frente as condições encontradas na floresta, bem como, a modelagem desses fatores, constitui-se em uma ferramenta básica para a predição do crescimento, do planejamento e condução racional de florestas, proporcionando a conservação e a sustentabilidade do uso desses valiosos recursos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa se propôs a analisar e fornecer informações a respeito da dinâmica e relações existentes entre espécies latifoliadas com maior importância ecológica e a *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, frente as condições do ambiente de três fragmentos de Floresta Ombrófila Mista e, assim, sugerir modelos para o diâmetro em nível de árvores, crescendo sob competição, a partir do uso de diferentes técnicas de modelagem.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar a composição florística, a diversidade e riqueza das espécies que ocorrem em três fragmentos, os quais apresentam densidades distintas de *Araucaria angustifolia* no dossel de Floresta Ombrófila Mista, para assim selecionar espécies de maior valor de importância e inferir sobre a dinâmica dessas espécies, a partir de dados sobre mortalidade, sobrevivência, bem como os fatores do ambiente;
2. Descrever a ocorrência e distribuição espacial das árvores, a partir do posicionamento no terreno, observando as características do ambiente, para assim averiguar o efeito desses fatores sobre a distribuição das espécies, especialmente frente a predominância de *Araucaria angustifolia*;

3. Caracterizar a forma e dimensão das copas das árvores das diferentes espécies, a fim de inferir sobre a vitalidade, estabilidade e produtividade das mesmas e do ecossistema em que estão inseridas;
4. Descrever o grau de competição imposta às árvores das diferentes espécies pela *Araucaria angustifolia*;
5. Modelar o diâmetro a altura do peito e o índice de competição das espécies selecionadas;
6. Avaliar o potencial de métodos de Inteligência Artificial em prever o diâmetro de árvores de um conjunto de espécies da FOM.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FLORESTA OMBRÓFILA MISTA

No Brasil Meridional ocorre a formação Floresta Ombrófila Mista (FOM), conhecida popularmente como Floresta com Araucária. Este é um ecossistema do Bioma Mata Atlântica que se distribui, além dos Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, nas áreas de maiores altitudes dos Estados de São Paulo, Rio de Janeiro e na Serra da Mantiqueira, bem como, na região de Misiones, na Argentina e Paraguai (KLEIN, 1990; IRIARTE; BEHLING, 2007).

A presença da FOM está condicionada às altitudes acima de 500 metros do nível do mar. Inicialmente ocupava no Brasil uma área de, aproximadamente, 200.000 km² 40% encontravam-se no território paranaense, 25% no Rio Grande do Sul, 32% em Santa Catarina, e o restante em áreas da região Sudeste (HUECK, 1953; KOCH; CORRÊA, 2002; ANSELMINI, 2005). Restaram, de acordo com Guerra et al. (2002), cerca de 2 a 4% das formações originais nos estados do sul. Essa drástica diminuição se deve à intensa e errônea exploração das Florestas de Araucária no primeiro ciclo econômico do sul do país. Nos ecossistemas de ocorrência, a precipitação distribui-se durante o ano todo, com médias anuais em torno de 1700 e 1800 mm. Os solos são diversos, destacando-se principalmente Latossolos e Cambissolos, e a temperatura média anual varia entre 16 a 18°C (IBGE, 1992).

A *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze é a principal componente da FOM, ocorrendo com significativa abundância, assim formou uma cobertura muito característica, por vezes contínua, imprimindo a ideia de uma formação uni-

estratificada (LINDMAN, 1906; KLEIN, 1960). No entanto, o termo Floresta Ombrófila Mista, de acordo com Leite (1995), refere-se à mistura de floras de diferentes origens presentes nesse tipo de formação, contendo espécies da flora tropical e temperada, com uma estrutura de elementos Coniferales e Laurales causando padrões fitofisionômicos típicos (VELOSO et al., 1991). A vegetação que compõe as regiões com *Araucaria angustifolia*, segundo Klein (1960), não constituem uma formação homogênea e contínua, mas sim agrupamentos e múltiplas associações representando diversos estágios de sucessão e espécies típicas de cada um desses estágios pois, sob a cobertura das copas das araucárias, existem outras espécies de árvores, arbustos, ervas, epífitas e lianas, que se diferem em abundância e porte de acordo com o sítio e nível de desenvolvimento da floresta.

Assim, a FOM abriga diversas espécies que formam comunidades diferenciadas em florística e na estrutura ecológica. Há uma alta riqueza na floresta de araucária, seus componentes arbóreos representam elevado nível de biodiversidade, mesmo com sua aparente simplicidade (SANQUETTA, 2005).

Por outro lado, na Floresta Ombrófila Mista identifica-se quatro tipos distintos de formação: a formação aluvial presente em terraços antigos associadas à redes hidrográficas; a formação Submontana encontrada em altitudes próximas à 400 metros, a formação Montana situada em altitudes entre 400 e 1000 metros; e a formação Alto-montana compreendendo altitudes superiores a 1000 metros. As espécies que fazem associações com a *Araucaria angustifolia* podem variar de acordo com a altitude e a situação geográfica (QUINTSLR et al., 2012).

As florestas de araucária já tiveram considerável importância para a economia florestal dos estados do sul do Brasil, tendo em vista que a madeira de *Araucaria angustifolia* chegou a representar 90% da exportação de madeira da região, (Hueck, 1972). Atualmente os poucos remanescentes, em parte alterados, estão em áreas particulares ou em poucas Unidades de Conservação sendo que a perpetuidade desses fragmentos constitui um desafio para os programas de conservação.

2.2 COEXISTÊNCIA DE ESPÉCIES E OS PARÂMETROS FITOSSOCIOLÓGICOS

A distribuição de algumas espécies e suas sobreposições espaço temporal consistem na coexistência das mesmas, para tanto, este conceito considera que as espécies de interesse devam estar limitadas a uma determinada área, sem ocorrer a influência de migrações no sistema a ser estudado (GIACOMINI, 2007). Nesse

sentido, as florestas tropicais caracterizam-se pela grande diversidade de espécies que determinam complexas relações ecológicas, fato este que dificulta as avaliações a respeito desses sistemas. A ecologia tem muito potencial para gerar amplos e fundamentais conhecimentos a respeito dos fenômenos naturais complexos, no entanto alega que o maior desafio é integrar todos os conhecimentos disponíveis no ambiente, a fim de considerar as relações e processos entre as diferentes espécies existentes, vislumbrando um amplo e dinâmico campo de pesquisas, (LIKENS, 1995).

Tratando-se de populações florestais, se faz necessário estudos direcionados aos processos ecológicos que determinam a organização das espécies em comunidades arbóreas (WEBB et al., 2002; VIOLLE et al., 2007), avaliando não só a sua composição, estrutura e diversidade mas, também, em conjunto a isso, o funcionamento dos ecossistemas florestais, por meio das respostas das plantas quanto as variáveis ambientais e as diferentes estratégias das espécies em adquirir os recursos disponíveis no meio ambiente e, com isso, obter sucesso quanto ao estabelecimento, crescimento e reprodução (GUITAY; NOBLE, 1997; DÍAZ; CABIDO, 2001). Por isso, a diversidade dos fatores existentes no ambiente, bem como a disponibilidade de recursos, pode prever o crescimento e sobrevivência das espécies em dado ambiente, além disso, as mudanças na variação de espécies podem também estar relacionadas ao processo de desenvolvimento das plantas (BEGON et al., 2006).

Nesse sentido, além da determinação da estrutura vertical da floresta que consiste em descrever a ocupação das espécies nos diferentes estratos, cuja interpretação se dá com a classificação das alturas para toda a comunidade (LONGHI et al., 2000), é necessário inferir sobre a estrutura horizontal. Esta, de acordo com Schneider e Finger (2000), pode ser descrita pela distribuição das espécies a partir dos parâmetros de densidade, frequência, dominância e valor de importância. A densidade trata do número de plantas amostradas para cada espécie por unidade de área em ha; a frequência relaciona a distribuição espacial das espécies de acordo com a proporção de unidades amostrais onde foi registrada a presença de árvores; dominância é a área ocupada pelas árvores dada pela soma das áreas basais de todas as árvores de uma mesma espécie; valor de importância se refere a média do somatório das variáveis densidade relativa, frequência relativa e dominância relativa e diferencia as espécies mais importantes na comunidade (MORO; MARTINS, 2013). No âmbito da fitossociologia, que descreve a associação existente entre as espécies

vegetais na comunidade, ainda é possível calcular os índices de diversidade da população florestal, assim como, determinar a diversidade de espécies e avaliar a uniformidade quanto a abundância das espécies. Todos esses fatores são de grande relevância para o planejamento e monitoramento dos ecossistemas florestais.

Os resultados obtidos a partir das avaliações a respeito das relações entre espécies em uma comunidade arbórea e sobre diversidade e composições de espécies, são aplicados no planejamento das ações de gestão ambiental como no manejo florestal de florestas nativas, onde é importante manter um alto grau de coevolução de relações ecológicas entre as espécies, o que é considerado fundamental no contexto de manejo florestal sustentável (RANKIN, 1979; CHAVES et al., 2013).

2.3 CRESCIMENTO DAS ÁRVORES

O crescimento das árvores está condicionado aos fatores do meio, e a forma como esses atuam sobre seu desenvolvimento possui certa complexidade, sendo que, o meio consiste na soma de todas as forças externas influenciando no crescimento, estruturação e reprodução das árvores, nesse caso, os efeitos do meio sobre o crescimento constituem a variável sítio (SPURR, 1952). A carga genética de cada espécie interage com o meio integrado pelo clima (radiação, temperatura, água e vento), fatores edáficos (propriedades físicas, químicas e bióticas do solo), fatores fisiográficos (condições topográficas e geográficas) e de competição por meio da influência de aspectos bióticos como outras árvores, vegetação rasteira e animais (FINGER, 2006).

A competição entre as árvores no interior da floresta está entre os principais limitadores do crescimento e pode ser entendida como o uso de um recurso por uma planta que ao mesmo tempo limita este mesmo recurso às demais, causando reflexos no crescimento e desenvolvimento delas. Esta pode ocorrer entre árvores da mesma espécie, competição intraespecífica, assim como entre árvores de diferentes espécies, competição interespecífica (RICKLEFS, 1996). O grau de competição existente pode ser descrito pelas características da copa, e pelo desenvolvimento de índices de competição, sejam eles dependentes ou independentes da distância entre árvores (DURLO, 1996; SCHNEIDER; SCHNEIDER, 2008).

A mensuração do crescimento se dá principalmente pelos dados de diâmetro ou

incremento da circunferência à altura do peito, sendo essencial para silvicultura e manejo florestal (GOMIDE, 1997). Contudo, de acordo com Hess e Schneider (2010), em florestas nativas, a dinâmica da sucessão faz com que as condições ecológicas sejam diferenciadas para cada árvore ao longo do tempo, pois as taxas de crescimento são distintas entre espécies, e até mesmo entre árvores da mesma espécie, com diferentes dimensões, constituição genética, ou ainda estabelecida em diferentes habitats. A heterogeneidade na composição das espécies florestais, idades e tamanhos tornam os estudos sobre crescimento de florestas nativas algo complexo (SANQUETTA et al., 1995), existindo uma deficiência nas informações sobre o crescimento das espécies e árvores em florestas nativas, sejam em áreas intactas, em áreas exploradas ou em áreas sujeitas a algum tipo de regime de manejo (SCOLFORO et al., 1996).

Além disso, conhecer os fatores que influem e como ocorre a dinâmica de crescimento das espécies é essencial para sua preservação e continuidade nas gerações futuras, e quando for o caso, para a aplicação de um manejo mais criterioso e responsável (DAVIS; JOHNSON, 1987). Com base nessas premissas, diversos trabalhos têm sido realizados com o objetivo de gerar informações sobre esse assunto na esfera da Floresta Ombrófila Mista, com enfoque principalmente na *Araucária angustifolia*, existindo poucas informações a respeito do crescimento das demais espécies dessa tipologia.

2.4 COMPETIÇÃO ENTRE ÁRVORES

A interação entre as árvores de uma floresta estimulada pela constante busca por recursos, dá origem à concorrência entre elas, principalmente quando esses elementos são escassos, acarretando em diminuição do crescimento, nas taxas de metabolismo, bem como, o aumento nas taxas de mortalidade (BEGON et al, 2007). Esta contínua competição por espaço, luz e recursos oriundos do solo, de acordo com Keddy (2001), constituem a competição como um processo ecológico fundamental com importante papel na dinâmica e estruturação da floresta, influenciando não somente na sobrevivência e crescimento, mas principalmente na substituição de espécies e, conseqüentemente, no desaparecimento delas, além de ser um agente de pressão para adaptações das espécies que coexistem.

A partir desse entendimento, de que a competição é parte importante do sistema da floresta, foram definidos diferentes tipos e formas de competição, Zhao et al (2004)

distinguem o modo de competição como unilateral e bilateral, em que no primeiro caso ocorre a competição entre as árvores por luz onde as árvores maiores não são afetadas pelas vizinhas menores, já na competição bilateral existe a concorrência por água e nutrientes, requisitados por todas as árvores e proporcional ao tamanho delas, dessa forma atingindo a todas as árvores da comunidade. Além disso, a competição pode ser distinguida como intraespecífica, quando ocorre entre árvores da mesma espécie, e interespecífica, quando existe a competição entre árvores de espécies diferentes, sendo esta considerada menos intensa pelo fato da demanda por nutrientes ser diferente para cada espécie, por outro lado possui maior incidência em fragmentos nativos quando há concorrência entre as plantas coespecíficas, com demanda de nutrientes paralelas, a competição é mais intensa e os efeitos são dependentes da densidade e, por isso, maiores quando comparados às interações interespecíficas (TILMAN, 1984; WEISKITTEL et al., 2011).

No entanto, inicialmente as investigações sobre a competição entre árvores restringiram-se a florestas plantadas de uma única espécie, onde encontra-se uma estrutura homogênea com árvores distribuídas regularmente em idade e dimensões, situação completamente oposta a complexidade das florestas naturais (PRETZSCH, 2009). Para D'Amato e Puettman (2004) a existência dessa complexidade nas florestas naturais faz com que a mensuração da competição se torne uma tarefa árdua, principalmente nas investigações em florestas tropicais, onde existe uma mistura extremamente heterogênea de espécies; são florestas de estrutura complexa tornando as evidências da competição entre árvores um processo explícito. Assim, de acordo com Berger et al (2008), essas evidências encontradas nos sistemas ecológicos são suscetíveis às condições ambientais, por isso se faz necessário um entendimento mais abrangente sobre a competição entre árvores.

Nesse sentido, os índices de competição são valores que expressam o nível de competição em que cada árvore está submetida dentro da floresta. Além disso são passíveis de compor modelos de crescimento de árvore individual, servindo como estimadores do crescimento, bem como, da mortalidade em cenários simulados (TÉO et al., 2015). De acordo com Ledermann (2010) os índices podem ser classificados em dois grupos: independentes de distância, não se fazendo necessária a localização das árvores no terreno; e dependentes de distância, quando é aferida as coordenadas de localização das árvores para computação, ou mensuração da distância entre competidoras.

Alguns progressos foram alcançados a respeito do estudo da competição em florestas naturais no Brasil a partir de índices de competição. Particularmente para a Floresta Ombrófila Mista pode-se destacar alguns estudos como o de Hess et al (2014) quando usaram alguns índices de competição para avaliar a necessidade de intervenção em áreas de *Araucaria angustifolia* no planalto serrano de Santa Catarina. Os índices foram considerados bons descritores do grau de competição das árvores, bem como, da proximidade das mesmas. Barbosa (2018) fez uso de índices de competição para caracterizar o grau de competição e determinar sua correlação com o incremento periódico anual em área transversal da *A. angustifolia* nas Florestas Nacionais de Irati – PR e São Francisco de Paula – RS. Na mesma linha Orso (2020) observou o comportamento de índices de competição na estimativa do incremento periódico anual em diâmetro de um fragmento de Floresta Ombrófila Mista na cidade de Curitiba, PR e constatou que os índices dependentes de distância atingiram valores de correlação similares aos índices independentes de distância comumente utilizados na literatura florestal.

Entretanto, ainda se faz necessário melhorar a compreensão a respeito do comportamento da competição nesses ambientes naturais, especialmente no tocante às demais espécies de alto valor ecológico da FOM, e de como ela condiciona o estabelecimento, crescimento individual das árvores e a perpetuidade das espécies, visando projetar o futuro dos remanescentes da Floresta Ombrófila Mista. Além disso, a superioridade de algum índice de competição para esses cenários ainda não é conhecida, devido a variabilidade das condições das florestas que influencia na capacidade preditiva destes, não há, portanto, um consenso.

2.5 MODELAGEM DO CRESCIMENTO

O aumento das dimensões de uma árvore ao longo do tempo é condição essencial para o desenvolvimento de qualquer atividade florestal, seja ela de exploração ou conservação. De acordo com Zeide (1993), a modelagem do crescimento das variáveis dendrométricas constitui um método eficaz amplamente difundido no meio florestal.

Ao construir um modelo de crescimento, almeja-se descrever a dinâmica de características como o diâmetro a altura do peito, altura e volume, sendo que o crescimento em diâmetro de árvores individuais pode ser expresso como incremento

em diâmetro ou incremento em área basal, pois a precisão da estimativa do diâmetro futuro é a mesma tanto para equações de crescimento em diâmetro quanto para área basal (VANCLAY, 1994; WEST, 1980), podendo ser descrito por uma série de modelos matemáticos, tanto lineares como não lineares (SOUZA; SOARES, 2013).

Assim, a análise de regressão é aplicada para obter estimativas sobre o crescimento, bem como, de diversos parâmetros da floresta, utilizando-se de relações matemáticas que oferecem estimativas de forma indireta por meio de equações de regressão. A aplicação mais comum dos métodos de regressão busca determinar uma função matemática que consiga descrever a relação entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes (SCHNEIDER, 1998).

Diversos modelos são capazes de descrever o crescimento, como por exemplo, Backman, Chapman-Richards, Prodan, Weibull, Exponencial, Schumacher (KIVISTE et al., 2002; CAMPOS; LEITE, 2009). No entanto, a grande maioria das espécies florestais nativas do Brasil ainda não possuem modelos de crescimento testados, devido a grande complexidade existente na correlação entre as variáveis de árvores em florestas naturais. Diferentes técnicas de regressão podem ser empregadas a fim de encontrar um melhor método de manipulação desses dados, para atingir um nível de ajuste aceitável dos modelos, permitindo estimativas pouco sensíveis aos desvios.

Os estudos das florestas nativas têm grande relevância para a Ciência Florestal, pois conhecer o padrão de crescimento de uma espécie resulta em benefícios ambientais, sociais e econômicos refletindo a capacidade de administrar florestas em benefício do homem (HESS, 2006).

2.5.1 Modelos de árvores individuais

Nos modelos em nível de árvore individual a unidade básica da modelagem é a árvore, assim, as informações de entrada do modelo são referentes a cada uma das árvores amostradas, tornado esses modelos mais complexos quanto às informações requeridas por considerar variáveis próprias das árvores, constituem-se em alternativas para avaliar o comportamento e controle do crescimento, não somente das árvores alvo, mas também das demais árvores que coexistem, a partir da inclusão de índices de competição. Além disso, permitem a avaliação da floresta como um todo ao considerar os fatores do sítio, possibilitando a compreensão do crescimento das árvores como resultado da dinâmica e processos ecológicos presentes na floresta

(WEISKITTEL et al., 2011; BURKHART e TOMÉ, 2012).

De acordo com Peng (2000) os modelos de povoamentos são inadequados para as florestas mistas e inequiduais, pois não é possível incluir informações inerentes a cada espécie especificamente quando a floresta é tratada como um todo. Por outro lado, a aplicação desses modelos demanda dados detalhados, o que reflete em maiores custos e onera sua construção.

Por isso, os modelos de árvore individual são opções viáveis para tratar a diversidade de formações florestais presentes no Brasil. O uso desses modelos em pesquisas na Floresta Ombrófila Mista vem consolidando essa temática, como os trabalhos desenvolvidos por Chassot et al (2011), Téo et al (2015), Canetti et al (2016), Klein (2017), Costa e Finger (2017), Orellana et al (2017), Chassot e Fleig (2018), Ricken et al (2018), Weber et al. (2018), Lambrecht et al (2019), Minatti, (2019) e Orso (2020).

2.6 USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA MENSURAÇÃO FLORESTAL

O avanço das pesquisas e investigações que envolvem mensuração florestal acompanha a constante evolução da computação e da eletrônica, possibilitando melhorias na aquisição, processamento e armazenamento de dados mais complexos, melhorando a análise por parte de pesquisadores e analistas, tanto em termos de otimização de tempo, quanto em custos e quantidade de dados. Dessa forma, a inteligência artificial (IA) abriu um leque de possibilidades de estudo e aplicações no ramo da mensuração florestal (RUSSELL e NORVIG, 2010; MONTAÑO, 2016) .

Com isso, as diferentes linhas de aplicação da IA buscam formas de constituir procedimentos inteligentes nas máquinas, na tentativa de fazer com que elas adquiram informações, sendo este o principal desafio das pesquisas em IA (MINSKY, 1968). Assim, os sistemas de IA possuem a habilidade de armazenar e manipular dados, mas principalmente a capacidade de deduzir, inferir e apresentar respostas, a partir de relações entre fatos e concepções (SCHUTZER, 1987).

Já a construção de sistemas capazes de adquirir conhecimento fica a cargo da área de IA denominada aprendizado de máquina (AM) que, de acordo com Faceli et al. (2011), é a área responsável pelo desenvolvimento de teorias computacionais com foco no aprendizado automatizado. Os algoritmos que compõem os sistemas de aprendizado de máquina podem ser subdivididos em dois tipos de aprendizado,

supervisionado e não supervisionado, o primeiro tipo é empregado na resolução de problemas de classificação e de regressão, já o segundo realiza agrupamentos e associações (REZENDE, 2003).

Na mensuração florestal a aplicação de metodologias de AM está ocorrendo com frequência principalmente em tarefas de regressão, bem como no tratamento de dados imperfeitos, reduzindo o impacto de *outliers*. Boa parte dos estudos realizados recentemente na área florestal apontam boa performance das redes neurais artificiais (RNA) com resultados precisos e acurados na predição de variáveis biométricas florestais, como no estudo de Valente e Valente (2021) no qual os autores usaram técnicas de inteligência artificial para estimação do volume de madeira em uma floresta usando somente informações a respeito do diâmetro das árvores, concluindo ao final da investigação que a RNA é uma ferramenta de AM muito útil para o inventário florestal na determinação do volume de madeira a partir do *d*, principalmente quando já se tem banco de dados.

Em alguns casos as técnicas de AM são superiores ou equivalentes aos modelos de regressão tradicionais, como no trabalho de Lopes et al. (2021), que ao comparar o desempenho da regressão linear múltipla, RNA e a Random Forest (RF) na predição da altura total de árvores de *Eucalyptus* spp, constataram que RF destacou-se frente à RNA, juntamente com a regressão múltipla, como técnicas mais eficientes. Santos et al. (2018) também compararam equações de regressão e RNA para estimar volume de madeira da espécie *Couratari stellata*, relatando uma superioridade da RNA pela habilidade de aprender e generalizar o conhecimento adquirido recomendando-a para tal finalidade. Além da aplicação na predição de variáveis biométricas, as técnicas de IA vêm sendo utilizadas como alternativas para outras variáveis da ciência florestal, como a classificação do estágio secessional da floresta, como demonstrado por Sothe et al. (2017) em Floresta Ombrófila Mista; na estimativa da mortalidade e da sobrevivência de árvores individuais na amazônia (REIS, 2017), entre outros usos, comprovando ser uma potente ferramenta para manipulação de dados mais complexos na mensuração florestal.

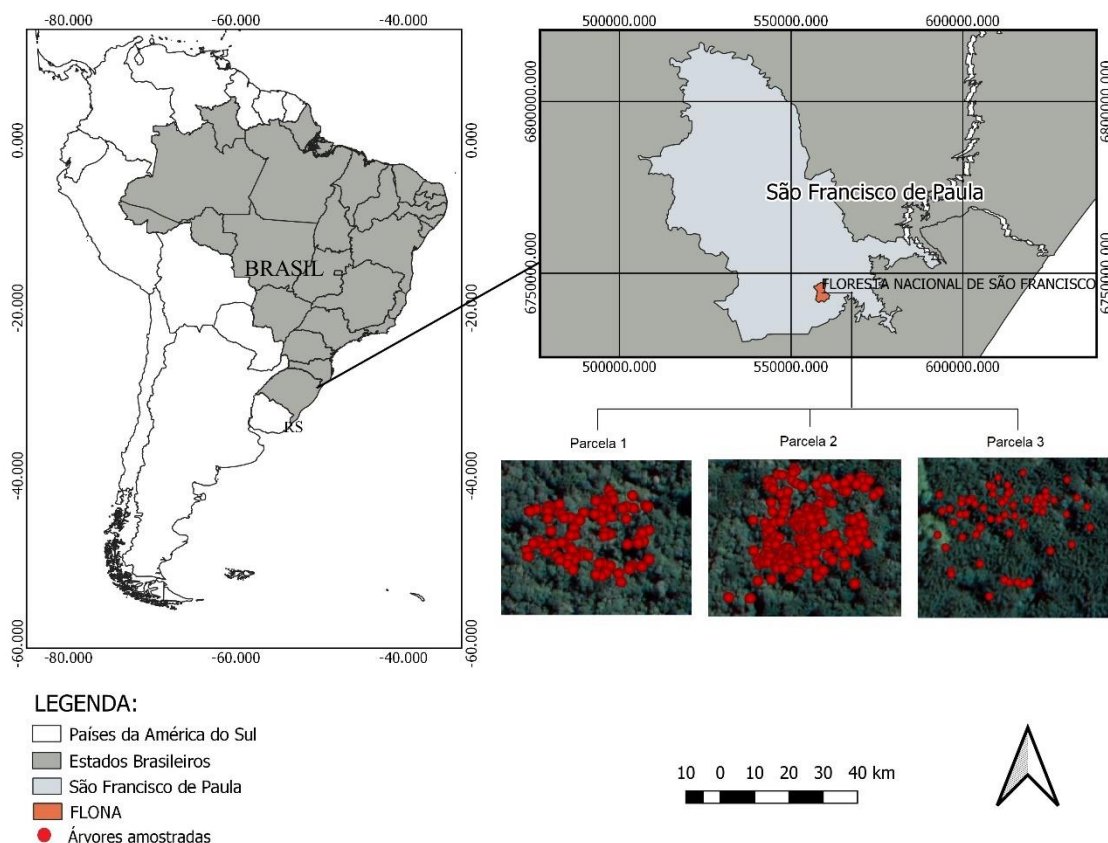
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE PESQUISA

O estudo desenvolveu-se na Floresta Nacional (FLONA) de São Francisco de

Paula, cuja área de 1.606 ha está introduzida como Área Núcleo na Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, e é considerada uma região de “alta” a “altíssima prioridade” para a conservação pelo *Workshop* de Áreas Prioritárias para a Conservação da Mata Atlântica (MMA, 2001). A FLONA-SFP é parte importante do Corredor Ecológico do Rio dos Sinos, e foi estrategicamente disposta entre os Corredores Ecológicos dos rios Caí e Tainhas (Patrimônio Natural da Região das Hortênsias, Projeto Hortênsia, METROPLAN e CPRM, 1995). Localiza-se no município de São Francisco de Paula, no estado do Rio Grande do Sul, nas coordenadas 29°24' e 29°22' Sul e 50°22' e 50°25' Oeste. Nesse local a vegetação florestal predominante é Floresta Ombrófila Mista, com base na classificação fitogeográfica do IBGE (2012) (Figura 1).

Figura 1- Localização geográfica da Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, e das três parcelas onde se desenvolveu a pesquisa



Fonte: A autora (2022).

De acordo com a classificação de Köppen, a região apresenta clima Cfb, caracterizado por ser constantemente úmido e sem estação seca definida (ALVARES et al., 2013). O nordeste do Rio Grande do Sul, compreende a região dos Campos de

Cima da Serra, na Serra Gaúcha, onde há o predomínio da Floresta Ombrófila Mista e Densa. A região é uma das mais úmidas do estado, com pluviosidade superior a 2.000mm e temperatura média anual de, aproximadamente, 14,5° C. Os solos são dos tipos Cambissolo Húmico Alumínico, Chernossolo Argilúvico Férrico e Neossolo Litólico Eutrófico (EMBRAPA, 2012). Segundo Ribeiro et al. (2007) o relevo é ondulado a fortemente ondulado e, em alguns casos, acidentado.

3.2 LEVANTAMENTO DOS DADOS

3.2.1 Parcelas amostrais

Esse estudo fundamentou-se inicialmente em uma base de dados oriunda do Projeto Ecológico de Longa Duração (PELD) da FLONA - SFP, que foi instalado no ano de 2000 e inventariado anualmente até 2009, perfazendo 10 mensurações. A área experimental do PELD consiste em 10 hectares, dividida em 10 parcelas contendo cada uma 1 ha, sendo que cada uma das u.a. foi subdividida em 100 subunidades de dimensão 10x10m.

Nessas áreas, ao longo de dez anos, foram mensurados a circunferência a altura do peito (cap), altura total (h), altura de inserção da copa (hic), e adquiridas informações a respeito da qualidade dos atributos do tronco, incluindo somente árvores com cap superior ou igual a 30,0 cm. As árvores foram numeradas, identificadas em nível de família, gênero e espécie e foram tomadas suas coordenadas geográficas para posicionamento no terreno, por meio do GPS Garmin 78s.

Contudo, para a realização da presente pesquisa foram selecionadas três parcelas, totalizando 3 ha de área amostrada, seguindo como principal critério a predominância da espécie *Araucária angustifolia* em cada parcela, em número de árvores (densidade), a fim de averiguar distinções quanto a composição de espécies, grau de competição e dimensão das árvores frente a presença da araucária em diferentes níveis (menor presença, presença em número intermediário de araucárias e maior presença) tais critérios foram aplicados na fase de projeto da pesquisa, antes de qualquer aquisição dos dados. Além disso, também foi considerado como critério a distância entre as parcelas, dando preferência a parcelas que estivessem em porções diferentes da FLONA-SFP, com o objetivo de identificar características ambientais distintas entre elas, bem como, observar a dinâmica florestal em diferentes

condições.

Inicialmente, no ano de 2018, as parcelas selecionadas foram revitalizadas, pois encontravam-se sem manutenção desde 2009, mas ainda permitindo a identificação dos limites das parcelas e das árvores numeradas. Assim, além da base de dados citada, foram realizadas novas mensurações para a atualização dos dados, permitindo assim o estudo da dinâmica das espécies. A revitalização das parcelas consistiu em conferir seus limites e marcações, realizando a substituição dos materiais de identificação, como estacas e placas numeradas das árvores, sempre que necessário.

É válido ressaltar a importância da retomada dessas mensurações e da aquisição periódica de dados quantitativos e qualitativos nas áreas do PELD-SFP, pois permite acompanhar o comportamento das espécies, a dinâmica e composição da floresta, crescimento, ingresso de novas plantas e mortalidade, como forma de embasar a previsão da produção em possíveis projetos de manejo florestal sustentável, e principalmente monitorar e conservar essas áreas que compõem a Unidade de Conservação Federal.

3.2.2 Identificação e seleção das espécies de maior valor ecológico

Informações sobre os parâmetros fitossociológicos subsidiam as decisões e ações de manejo para fins de conservação, dentre muitas outras finalidades, também permite evidenciar a importância de cada espécie na comunidade florestal (sob a perspectiva horizontal). Com base nesses preceitos, as espécies foram selecionadas considerando o Valor de Importância (VI) que caracteriza a importância de cada espécie, pois reúne os critérios de análise de três parâmetros: DR; FR; DoR.

Assim, as espécies com maior VI presentes na área de estudo foram consideradas de interesse para o desenvolvimento da pesquisa, além disso, levou-se em consideração a presença das espécies em mais de uma parcela, com o intuito de observar comportamentos distintos por parte das árvores frente a diferentes condições do sítio. Ainda para a escolha das espécies foi considerada também a presença de alguma potencialidade econômica nas características. Dessa forma, definiu-se a lista de espécies que compõe o estudo.

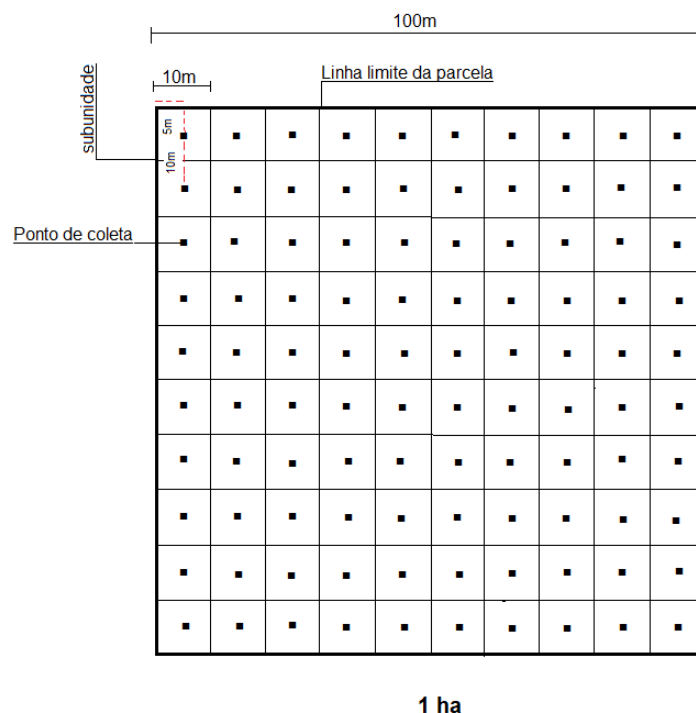
3.2.3 Obtenção de informações sobre o ambiente

Para caracterizar as três diferentes parcelas de pesquisa e explicar como ocorre a distribuição das espécies, levantou-se informações a respeito de características físicas do solo, especificamente sobre profundidade, umidade e cor, bem como, a caracterização da pedregosidade superficial do terreno. Além disso, foi determinada a porcentagem da abertura de dossel em cada subparcela.

3.2.3.1 Coleta de dados de solo

O registro de informações sobre profundidade, umidade e cor do solo se deu em toda a proporção de cada parcela (1 ha). Com o auxílio de uma trena, a partir do início da parcela foi alocado o primeiro ponto de coleta, partindo-se do canto superior da primeira subparcela foram medidos 5 m na linha limítrofe e em seguida mais 5m até o interior dela, coincidindo com o centro da subparcela, dessa forma, prosseguiu-se com a demarcação de pontos e com a coleta a cada dez metros, seguindo a linha de amostragem, perfazendo um ponto em cada subparcela, conforme o croqui apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Representação da amostragem das características do solo em fragmento de Floresta Ombrófila Mista, na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil



Com o auxílio de um trado do tipo holandês, em cada ponto de coleta foi realizada uma rápida checagem de limites de classes de solos e de algumas características específicas como umidade, cor e textura, com a retirada de uma amostra do solo até uma profundidade em que se conseguisse observar a presença de umidade. A seguir a profundidade foi medida com régua milimetrada, bem como, foi determinada a coloração do material em campo por comparação visual com os padrões da Carta de Munsell (Figura 3). Além disso, foram atribuídas a campo categorias de umidade à porção de solo analisada no momento da coleta, sendo: Solo seco: categoria 1; Umidade moderada: categoria 2; Solo úmido: categoria 3.

Figura 3 - Obtenção dos atributos do solo com trado holandês na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil



Fonte: A autora (2022)

A cor é uma propriedade física que expressa respostas sobre mudanças de relevo, vegetação, profundidade, clima, aeração, material de origem, mineralogia e concentração de matéria orgânica, dessa forma, a análise da cor permitiu obter informações sobre as propriedades do solo e do ambiente. Além disso, foram tomadas as coordenadas geográficas do ponto central das subparcelas.

3.2.3.2 Determinação da pedregosidade superficial no solo

A pedregosidade é fator importante que regula a capacidade de uso do solo

pelas espécies vegetais, por isso, essa variável foi abordada em cada subparcela, em que se observou o nível de pedregosidade superficial do terreno em porcentagem. O método consistiu em estender uma trena até 10m para observar a presença de afloramentos rochosos, e então procedeu-se com a mensuração da extensão da presença de rochas na superfície, permitindo calcular a porcentagem de pedregosidade atribuída a cada subparcela. Assim foram definidas classes de pedregosidade, seguindo metodologia adaptada de Santos et al. (2013), sendo cada subparcela avaliada de acordo com a porcentagem de pedras, atribuindo-se notas de 0 a 75% para cada classe, sendo a classe 1- 0% da superfície do terreno não possui pedras; classe 2- 25% da superfície do terreno é ligeiramente pedregosa; classe 3 – 50% de pedra na superfície; classe 4- 75% da superfície do terreno pedregosa.

3.2.3.3 Levantamento da abertura de dossel

A cobertura de dossel foi avaliada com o uso do densiômetro esférico côncavo - Modelo A, que reflete a copa das árvores permitindo quantificar a densidade do dossel e obter de forma indireta a incidência da luminosidade no interior da floresta. A superfície do densiômetro consiste em um espelho côncavo dividido em 24 quadrados, por meio do qual em cada quadrante é possível observar quantos quartos dele é refletida a luz do dossel. Após, soma-se a quantidade de quartos de cada quadrante que refletiu e multiplica-se por 1,04 para obter a porcentagem de área não ocupada pela copa das árvores. Para tanto, foram tomadas quatro leituras no sentido norte, sul, leste e oeste no centro de cada subparcela, a uma distância de 1 m da superfície do solo (Figura 4).

Figura 4 - Utilização do densiômetro na quantificação da abertura do dossel nas parcelas estudadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paulo, RS, Brasil



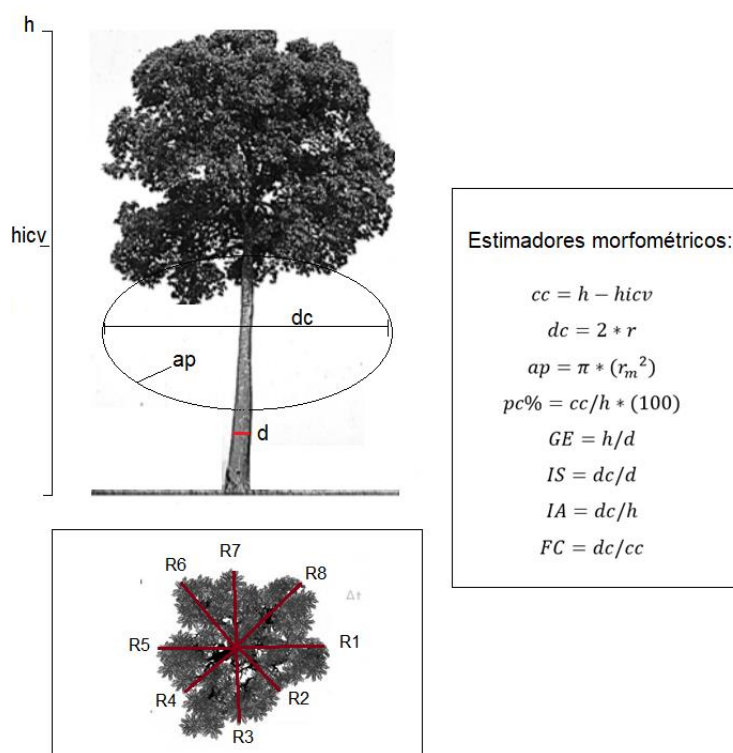
3.2.3.4 Atributos do terreno

A inclinação e os ângulos do terreno foram avaliados com o uso da função “*Angle*” do hipisometro Vertex III, assim como a exposição solar e posição no terreno com a bússola que compõe o GPS Garmin.

3.2.4 Procedimentos de coleta de dados sobre as árvores

Todas as árvores pertencentes às espécies previamente selecionadas (árvores objetivo) foram localizadas, remarcadas quando necessário, e tiveram suas dimensões aferidas. De cada árvore foram tomadas as medidas do diâmetro a altura do peito (d), altura total (h), altura de inserção da copa (hic) e altura de inserção da copa viva (hicv). Além disso foram medidos os raios de copa das árvores em direções distintas pois, devido às irregularidades das copas, não foi possível a orientação dos pontos cardeais. Em algumas situações a determinação dos raios da copa não foi realizada devido à dificuldade de identificar, com certeza, a posição que a extremidade do galho se encontrava. Por isso, algumas árvores foram excluídas das análises sobre as características da copa. As formas de obtenção das medidas da copa encontram-se na Figura 5.

Figura 5 - Obtenção dos parâmetros da copa das árvores amostradas, São Francisco de Paula, RS, Brasil



Em que: d: diâmetro a altura do peito; h: altura total; hicv: altura de inserção da copa viva; cc: comprimento de copa; dc diâmetro de copa; ap: área de projeção da copa; R_n: raio de copa; r_m: raio médio; pc%: porcentagem de copa; GE: grau de esbeltez; IS: índice de saliência; IA: índice de abrangência; FC: formal de copa.

Fonte: Adaptado de Dionisio et al. (2017).

Para cada árvore objetivo foram definidas suas competidoras. A definição de árvore competidora tomou como base a dimensão da copa e altura das árvores, assim como, foi julgada sua capacidade de competir por luz e espaço de crescimento, visualizando o cenário em que a árvore se encontrava. As árvores vizinhas presentes em um giro de 360° da árvore objetivo, com contato entre as copas, e que exerciam algum tipo de impedimento físico ao desenvolvimento da árvore foram consideradas competidoras, desde que possuía cap maior ou igual a 30 centímetros.

Após a identificação das árvores objetivo e competidoras, as distâncias entre elas foram mensuradas, bem como, a circunferência à altura do peito (cap) e a altura total (h) e das competidoras. É importante ressaltar que se tomou a decisão de levantar os dados de todas as espécies de interesse em todas as parcelas quando ocorriam, mesmo que ela não estivesse na lista de espécies alvos de determinada parcela, a fim de comparar o desenvolvimento das árvores em ambientes com características distintas.

3.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS

3.3.1 Parâmetros fitossociológicos

Para expressar a estrutura horizontal das áreas de estudo foram calculados os descritores fitossociológicos por meio do *software* estatístico *Rstudio*, de acordo com Müller-Dombois e Ellenberg (1974), os quais foram:

a) Densidade Absoluta (DA) e Relativa (DR)

$$DA = \frac{n}{A} \quad ; \quad DR = \left(\frac{n}{N} \right) * 100 \quad (1)$$

Em que: n; número de indivíduos de uma determinada espécie; N: número total de indivíduos; A: unidade de área (ha).

b) Dominância Absoluta (DoA) e Relativa (DoR)

$$DoA = \frac{g^i}{A} \quad ; \quad DoR = \left(\frac{g^i}{G} \right) * 100 \quad (2)$$

Em que: gi: área basal da espécie; A: unidade de área (ha); G: área basal de todas as espécies.

c) Frequência Absoluta (FA) e Relativa (FR) (3)

$$FA = \left(\frac{p^i}{P} \right) * 100 \quad ; \quad FR = \left(\frac{FA_i}{\sum FA} \right) * 100 \quad (4)$$

Em que: pi: número de unidades amostrais com ocorrência da espécie i; P = número total de unidades amostrais na amostra; Fai: Frequência absoluta de uma determinada espécie; $\sum FA$: somatório das frequências absolutas de todas as espécies amostradas.

d) Valor de Importância (VI)

$$VI = DR + FR + DoR \quad (5)$$

Em que: DR: densidade relativa; FR: frequência relativa; DoR: dominância relativa.

A fim de esclarecer as diferenças existentes em relação à composição de espécies em cada parcela, foram calculados o Índice de Shannon-Wiener e a Equabilidade J de Pielou, como segue nas fórmulas a seguir.

a) Índice de Diversidade de Shannon-Wiener

$$H' = \frac{[N \cdot \ln(N) - \sum_{i=1}^S ni \cdot \ln(ni)]}{N} \quad (6)$$

Em que: ni: número de árvores amostradas da i-ésima espécie; N: número total de árvores amostrados; S: número total de espécies amostradas; ln; logaritmo de base neperiana.

b) Equabilidade J de Pielou

$$J = \frac{H'}{H_{max}} \quad (7)$$

$$H_{max} = \ln(S) \quad (8)$$

Em que: H': Índice de diversidade de Shannon-Wiener; S: número de espécies amostradas, Hmax: diversidade máxima.

3.3.2 Modelagem geoespacial para caracterização das parcelas

Para tratar a complexidade inerente aos fatores ecológicos e a elevada heterogeneidade dos fatores ambientais nas diferentes parcelas, e que determinam a distribuição das espécies, se fez uso da geoestatística para, através da técnica de interpolação por krigagem, avaliar a variabilidade espacial dos atributos ambientais levantados em cada parcela e a distribuição das espécies em função dessas características, bem como, em relação à densidade de *A. angustifolia*.

Os dados que representaram as características ambientais foram tratados a partir do sistema de informação geográfica QGIS 3.20.2 e suas ferramentas de análise geoestatística. Inicialmente foi analisado o grau de dependência espacial entre as variáveis pelo Índice de Moran, que mede a autocorrelação espacial a partir do produto dos desvios em relação a média, sendo então uma média global da autocorrelação espacial, pois indica o grau de associação espacial presente no conjunto de dados.

Logo procedeu-se com o ajuste dos semivariogramas para todas as variáveis ambientais nas três parcelas, procedimento realizado de forma interativa, diferente dos ajustes comuns de uma regressão. Neste caso o operador verifica a adequação do modelo teórico até gerar um modelo satisfatório, baseando-se sempre na metodologia adotada para a aquisição das informações. Assim, foi realizado um ajuste dos valores dos *Lags* e das direções, para encontrar a melhor estrutura espacial dos

dados. Os modelos teóricos de semivariograma testados foram os modelos esférico, exponencial, gaussiano, e linear conforme as seguintes expressões:

a) Esférico:

$$\gamma(h)=Co+C[1,5(h/a) - 5(h/a)^3] \quad (9)$$

b) Exponencial:

$$\gamma(h)=Co+C[1-\exp(-h/a)] \quad (10)$$

c) Gaussiano:

$$\gamma(h) = Co + C [1 - \exp(- h/a)^2] \quad (11)$$

d) Linear:

$$\gamma(h) = Co[h(C/a)] \quad (12)$$

Em que: $\gamma(h)$: Co : efeito pepita; C : patamar; h : distância (m); a : alcance; exp: exponencial.

Na avaliação do melhor modelo consideram-se os menores valores para Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR) e maiores valores para o Coeficiente de Determinação (R^2).

3.3.3 Contabilização da mortalidade e sobrevivência

A mensuração e comparação das taxas de mortalidade foram realizadas a partir de contagens. De uma forma simples, foi feita a contagem da mortalidade no intervalo de tempo entre as medições nas parcelas, como proposto por Sheil et al., (1995). A taxa de mortalidade foi verificada para todos os anos de medições do projeto PELD realizada nas unidades amostrais permanentes no período entre 2000 e 2009 nas três parcelas, bem como, para a medição de 2018 /2019. Para tanto, a taxa anual de mortalidade foi calculada a partir da seguinte equação:

$$\%m = \left(1 - \frac{\left(\frac{N_0 - m}{N_0}\right)^t}{t}\right) * 100 \quad (13)$$

Em que: %m: é a taxa de mortalidade anual; m: é o número de árvores mortas no período; N_0 : é o número de árvores da população no início do período; e t: é o tempo em anos (intervalo entre medições).

3.5.4 Determinação da competição entre as árvores

O grau de competição entre as árvores, intra e interespecífica, foi quantificado a partir de índices de competição dependentes e independentes da distância entre árvores, considerando as variáveis DAP, altura e distâncias horizontais entre a árvore objetivo e suas competidoras (Tabela 1).

Tabela 1 - Índices de Competição testados para espécies arbóreas em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil.

(continua)

IC	Equação	Autores
IC1	$= d_i^2 \cdot n / (\sum_{j=1}^n d_j^2)$	Daniels et al. (1986)
IC2	$= \sum_{j=1}^n (d_j^2 / d_i^2)$	Corona e Ferrara (1989)
IC3	$= \left(\sum_{j=1}^n d_j \right) / d_i$	Lorimer (1983)
IC4	$= \left(\frac{\sum_{j=1}^n d_j}{d_i} \right) / n$	Mugasha (1989)
IC5	$= \sum_{j=1}^n [d_j / (d_i \cdot dist_{ij})]$	Hegyi (1974)
IC6	$= \sum_{j=1}^n [d_j / (d_i \cdot dist_{ij}^{0.5})]$	Hegyi (1974) – modificado
IC7	$= \sum_{j=1}^n [(d_j - d_i)^2 / dist_{ij}]$	Rouvinen e Kuuluvainem (1997)
IC8	$= \sum_{j=1}^n \left(\frac{d_j}{dist_{ij}} \right)$	Rouvinen e Kuuluvainem (1997)

IC9	$= \sum_{j=1}^n g_j$	BAL – modificado
IC10	$= \sum_{j=1}^n \left(\frac{h_i}{h_j} \right)$	Glover e Hool (1979)
IC11	$= \sum_{j=1}^n (d_i^2 h_i / d_j^2 h_j)$	Glover e Hool (1979)
IC12	$= \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{h_j}{h_i} \right) \arctang \left(\frac{h_j}{dist_{ij}} \right) \right]$	Rouvinen e Kuuluvainem (1997) – modificado
IC13	$= \sum_{j=1}^n \arctang \left[\left(\frac{h_j}{h_i} \right) / dist_{ij} \right]$	Pukkala e Kolstrom (1987)

Em que: d = Diâmetro à altura do peito, em cm; dist_{ij} = Distância horizontal, em m; i-ésima árvore objetivo; j-ésima árvore competidora; h= altura, em m.

Fonte: A autora (2022).

O cálculo dos índices de competição possibilitou inferir sobre o grau de competição em que as árvores se encontravam. Em seguida foi realizada a avaliação dos índices de competição por meio da análise gráfica da relação entre os índices e o diâmetro das árvores, bem como a capacidade preditiva de cada índice visando sua inclusão na modelagem do diâmetro.

3.3.5 Modelagem da variável diâmetro

Inicialmente foram analisadas as relações entre a variável resposta (dimensão do diâmetro a altura do peito) e as variáveis consideradas preditoras a partir da matriz de correlações de Pearson, que foi composta por todas as variáveis dendrométricas, morfométricas, índices de competição, posição sociológica e variáveis do ambiente levantadas na pesquisa, na expectativa de explicar as relações existentes por meio dos coeficientes gerados. Para o teste foi considerado o nível de 95% de probabilidade. Esses processamentos, bem como os demais procedimentos de modelagem do diâmetro, ocorreram por meio do *Software* estatístico *Statistical Analysis System* (SAS) Versão 9.1 (SAS INSTITUTE, 2004).

A seguir, para estabelecer as funções de diâmetro, se fez uso do procedimento de modelagem *stepwise* do conjunto estatístico SAS V. 9.1, incluindo-se inicialmente

a variável dimensão, posteriormente testando-se cada uma das variáveis de competição, dimensões da copa e, por fim, as variáveis contínuas e discretas referentes ao ambiente. Para tanto, foram incluídas as variáveis que apresentaram valores do coeficiente de Pearson significativos, selecionando então as funções de diâmetro referentes a cada uma das espécies individualmente.

A adequação dos dados aos critérios de regressão foi verificada, sendo eles a heterogeneidade da variância, normalidade e independência do erro. Uma análise minuciosa dessas características foi realizada, com ênfase à dispersão das variáveis e dos resíduos gerados pelos modelos testados, bem como, a presença de valores discrepantes para então conduzir seu tratamento. Quando tais condições não foram atendidas, procedeu-se com a transformação da variável resposta, e persistindo a não conformidade, se utilizou dos Modelos Lineares Generalizados (MLG) nos campos aleatórios, *Normal* e *Gamma*, e função de ligação identidade (μ) e logarítmica $\ln(\mu)$, estabelecendo o modelo definido por:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 \quad (14)$$

Em que: y : diâmetro a altura do peito; x_1 : variável de tamanho; x_2 : variável de dimensão da copa; x_3 : variável de competição; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$: coeficientes estimados.

A escolha do modelo mais apropriado se deu pela análise das estatísticas: Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), Erro Padrão da Estimativa (S_{yx}), Critério de Akaike (AIC), Critério Bayesiano (BIC), e Exame da distribuição dos Resíduos.

A fim de agrupar as espécies de acordo com as variáveis explicativas que compunham o modelo específico, foi analisada a possibilidade de agrupamento de espécies em uma mesma equação de regressão. Para cada grupo, com o uso da Análise de Covariância (ANACOVA), foi testada a hipótese de diferença significativa de nível e inclinação das regressões ajustadas, a fim de avaliar a possibilidade de existir um modelo único para expressar o diâmetro de árvores de espécies diferentes.

3.3.6 Modelagem do Índice de Competição

Com o conhecimento a respeito do grau de correlação entre as variáveis em

estudo, se iniciou o processo de ajuste de uma equação contendo o Índice de competição selecionado que melhor descreveu a competição entre árvores como variável resposta e diâmetro a altura do peito e altura total das árvores objetivo como variáveis preditoras. Assim, para descrever a relação da competição com as variáveis biométricas das árvores por meio de regressão, para cada uma das espécies selecionadas, foram testados modelos de regressão conforme expressão 15:

$$ICi = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 h \quad (15)$$

Em que: ICi: Índice de competição selecionado; d: diâmetro a altura do peito (cm); h: altura total (m); $\beta_0, \beta_1, \beta_2$: coeficientes estimados.

Com a intenção de definir diferentes níveis de competição conforme a variação da altura da árvore objetivo em relação à sua dominante, a variável h foi substituída pela variável altura relativa (hrel) que por sua vez foi calculada pela razão entre altura (h) e altura máxima (hmax) que se refere as maiores alturas das árvores mensuradas na floresta.

A importante influência da competição, densidade e idade na relação entre altura das árvores e diâmetro a altura do peito, principalmente em florestas inequidistantes, foi considerada para o cálculo de hmax. Por isso, a hmax foi definida como $h = f(d)$ utilizando técnicas de regressão quantílica definindo um quantil de 90% da variável dependente. A regressão quantílica gera estimativas aproximadas para quaisquer quantis da variável resposta, baseando-se no método dos erros absolutos, tornando possível avaliar a influência de uma covariável em toda a distribuição da variável resposta, e não apenas na sua média (KOENKER e BASSET, 1978). Os procedimentos com regressão quantílica foram conduzidos no pacote *quantreg* do sistema *Rstudio* 4.1.1.

Dessa forma, para descrever a relação do ICi com o d e hrel, foram testados modelos de regressão para todas as espécies conforme equação 16, já os critérios para decisão das equações mais adequadas foram as estatísticas: Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), Erro Padrão da Estimativa (Syx) e distribuição dos resíduos.

$$ICi = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 hrel \quad (16)$$

Em que: ICi: Índice de competição selecionado; d: diâmetro a altura do peito (cm); hrel: altura relativa (m); $\beta_0, \beta_1, \beta_2$: coeficientes estimados.

Além disso, também foram testados modelos lineares generalizados (MLG) nos campos aleatórios *Gamma* e *Identidade* com funções de ligação normal e logarítmica, a fim de encontrar a equação que melhor representa a relação entre o índice de competição e as variáveis biométricas. Os modelos gerados foram avaliados quanto ao Critério de Akaike (AIC), Critério Bayesiano (BIC), e Exame da distribuição dos Resíduos.

3.3.7 Modelo Geral para o conjunto de espécies latifoliadas a partir de técnicas de Inteligência artificial

A partir da Rede Neural Artificial (RNA) e da *Random Forest* (RF), foram elaborados modelos para prever o diâmetro a altura do peito (d) e o grau de competição.

Os modelos para expressão do d possui variáveis preditoras referentes à dimensão das árvores, morfometria da copa e variáveis descritoras do terreno e ambiente no qual elas se encontravam, conforme segue: h: altura total; ps: posição sociológica; dc: diâmetro de copa; ap: área de projeção da copa; cc: comprimento de copa; pc: porcentagem de copa; IS: índice de saliência; IA: índice de abrangência; GE: Grau de esbeltez; FC: Formal de copa; ICi: índice de competição selecionado; solo: Tipo de solo de acordo com o padrão de cor; prf: profundidade do solo; pdr: pedregosidade; abd: abertura de dossel. Nos modelos em que o ICi é a variável de interesse além das preditoras já citadas, o diâmetro também foi incluído. Dessa forma foram construídos modelos de RNA e Random Forest para diâmetro a altura do peito, a fim de identificar qual das técnicas de aprendizado de máquina é capaz de expressar com maior precisão essas variáveis. Todos os processamentos das técnicas de Inteligência Artificial foram realizados com os pacotes do software Rstudio.

3.3.7.1 Redes Neurais Artificiais (RNA)

Na construção da RNA os pares de dados foram divididos em dois conjuntos, um conjunto para treinamento da rede com 70% dos dados e outro conjunto de validação do modelo com 30% dos dados, tomando-se o cuidado para que todas as espécies e classes de diâmetro fossem contempladas. Os dados foram padronizados em escala para um melhor desempenho da rede. Foram treinadas redes do tipo *Multilayer Perceptron*, que consistem em camadas de neurônios artificiais, camada intermediária e camada de saída, que processam os dados, e uma camada de entrada com neurônios artificiais que apenas recebem os dados e os ordena à camada intermediária, dessa forma aplicou-se a seguinte arquitetura: 15-n-1, em que o n representa o número de neurônios na camada oculta.

O número de neurônios na camada oculta é de definição mais complexa e ainda abstrata, pois usando poucos neurônios pode haver o sub ajuste (“*under fitting*”) e uma baixa adaptação ao detectar adequadamente os sinais presentes nos dados; por outro lado, usar muitos neurônios nas camadas ocultas pode resultar em sobreajuste. Por isso, o método básico de Fletcher-Gloss (expressão 17) foi empregado para determinar o número correto de neurônios a serem usados nas camadas ocultas.

$$2.k0,5 + N2 \leq N1 \leq 2.k + 1 \quad (17)$$

Em que: k : número de entradas de rede; N1 : o número de neurônios na camada oculta e N2: o número de neurônios na camada de saída.

Já o número de neurônios na camada de entrada é equivalente ao número de variáveis consideradas no ajuste. Um total de 100 RNA foram treinadas para cada arquitetura, e a escolha da arquitetura mais adequada se deu com a avaliação das estatísticas geradas pelos modelos.

A camada de saída contém um neurônio que consiste no diâmetro das árvores a 1,30m. Como função de ativação da camada oculta e de saída, se fez uso da função logística, usada por padrão. O algoritmo de treinamento testado foi o *Backpropagation* com taxa de aprendizado padrão de 0,01. O nível de ajuste das redes foi avaliado a partir das estatísticas geradas como o coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrada do erro médio (RQEM) e análise gráfica dos resíduos.

3.3.7.2 Random Forest (RF)

A modelagem do diâmetro a altura do peito foi realizada por meio do *Random Forest* (RF) em função de todas as variáveis preditoras (dendrométricas, morfométricas e do ambiente). No treinamento foram criadas várias árvores de regressão por meio do algoritmo CART. Essas árvores foram geradas a partir do método *bootstrap* a fim de estabilizar o modelo, tendo sido treinadas a partir da seleção aleatória de 70% dados, enquanto o restante (30%) foi empregado na validação cruzada da árvore gerada.

Além do número de árvores, as diferentes configurações de RF treinadas foram determinadas a partir do número de variáveis preditoras consideradas. Com base nos valores de importância calculados na modelagem, as variáveis preditoras do diâmetro foram ordenadas de maneira decrescente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS DAS PARCELAS A PARTIR DA MODELAGEM GEOESPACIAL

As informações a respeito da pedregosidade, profundidade de solo, umidade, abertura de dossel e cor de solo predominantes nas três parcelas da pesquisa, tiveram uma primeira abordagem a partir da caracterização dos fatores categóricos no local e por meio da estatística descritiva das demais variáveis levantadas conforme Tabela 2, a fim de demonstrar como características ocorrem em cada parcela.

Tabela 2 - Informações de predominância e estatística descritiva das características ambientais das três parcelas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS

Parcela 1			
Cor do solo predominante: Cinzento avermelhado escuro			
Categoria de Umidade predominante: 3 - Solo úmido			
	Pedregosidade (%)	Profundidade (m)	Abertura de dossel (%)
Máximo	13	1,6	91
Mínimo	0	0,35	10
Média	2,86	0,97	34,97
Desvio padrão	3,97	0,26	18,05

Assimetria	1,29	-0,93	1,51
Curtose	0,46	0,14	2,78
Parcela 2			
Cor do solo predominante: Bruno avermelhado escuro			
Categoria de Umidade predominante: 1- solo seco e 2- umidade moderada			
	Pedregosidade (%)	Profundidade (m)	Abertura de dossel (%)
Máximo	38,60	1,30	46,20
Mínimo	0,00	0,26	7,00
Média	9,41	0,72	22,87
Desvio padrão	11,53	0,30	12,73
Assimetria	1,09	0,23	0,53
Curtose	0,18	-1,10	-1,15
Parcela 3			
Cor do solo predominante: Bruno avermelhado escuro			
Categoria de Umidade predominante: 2 – Umidade moderada			
	Pedregosidade (%)	Profundidade (m)	Abertura de dossel (%)
Máximo	90,00	1,40	50,00
Mínimo	0,00	0,10	5,60
Média	26,88	0,89	22,65
Desvio padrão	32,95	0,42	12,39
Assimetria	1,11	-0,83	0,47
Curtose	-0,40	-0,68	-0,80

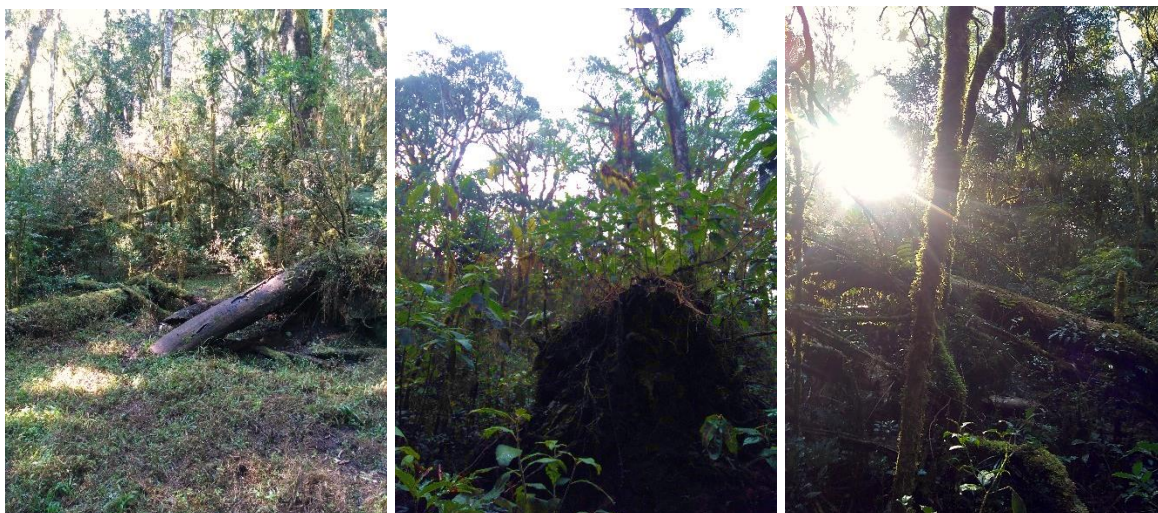
Fonte: A autora (2022).

Existe uma predominância do solo Cinzento avermelhado escuro na Parcela 1, cores acinzentadas indicam solos mais hidromórficos que, de acordo com Teixeira et al. (2009), são comuns em áreas próximas a cursos d'água e podem apresentar deficiências de estabilidade da estrutura do solo, por outro lado, a característica escura presente nessa classificação, demonstra elevada presença de matéria orgânica no solo, oriunda da adição de resíduos vegetais e decomposição da serrapilheira e raízes. A classificação da cor do solo predominante nesse local corrobora com as informações referentes ao nível de umidade encontrado, pois detectou-se solo úmido em toda a extensão da parcela, no entanto não há curso d'água próximo a esta área.

A pedregosidade superficial do terreno foi considerada baixa na Parcela 1, pois

apresentou nível máximo de 13% da extensão de uma única subparcela com pedras aparentes e superficiais, a baixa presença de rochas incide em uma maior profundidade do terreno em diversos pontos da parcela com média de 0,97 m, chegando a uma profundidade máxima de 1,6 m perfurada com o trado no momento das observações. Quanto a abertura do dossel encontrou-se valores maiores na Parcela 1 quando comparada com as demais áreas, isso se deve pela ocorrência de grandes clareiras no interior da parcela em decorrência de eventos naturais, como vendavais, que causaram a queda de árvores de dimensões maiores, provocando também a queda de árvores menores, conforme demonstrado na Figura 6.

Figura 6 - Clareiras e árvores tombadas devido à eventos climáticos na Parcela 1 localizada na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil



Fonte: A autora, 2022.

As atuais condições ambientais dessa área mostram-se propícias ao crescimento da *A. angustifolia*, pois contém algumas das preferências da espécie, como solo úmido, orgânico e iluminação favorável, visto que se trata de espécie heliófita desenvolvendo-se melhor sob o sol. De acordo com Keil (1989), a profundidade é um dos fatores mais importantes para o bom desenvolvimento da araucária, por apresentar raiz pivotante e baixa tolerância a solos rasos, por isso solos mais profundos, como o da Parcela 1, beneficiam seu desenvolvimento.

No entanto, esta é a área com menor ocorrência de araucárias, as poucas árvores dessa espécie na Parcela 1 tem em sua maioria grandes dimensões biométricas, além disso, não foi detectada a presença de araucárias com características que indicassem ser jovens e produtivas, bem como, observou-se

visualmente a ausência de regeneração natural sobrevivente dessa espécie.

Lassere et al. (1972) explicam que a *A. angustifolia* não tolera solos hidromórficos, indicando resultados reduzidos de crescimento. Além disso, as áreas de maior iluminação dentro da parcela formaram-se em um período recente, momento em que já não havia grande possibilidade de regeneração da araucária neste local específico, demonstrando que a espécie pode sucumbir, mesmo com condições favoráveis. Ações adequadas de manejo poderiam ter favorecido o desenvolvimento dela em tempo hábil, pois, por muito tempo, acreditou-se que a araucária seria uma espécie totalmente pioneira e heliófita, por outro lado, algumas pesquisas mais recentes, demonstram que a espécie tem tolerância à sombra em ambiente natural na fase de germinação, podendo se estabelecer em condições de sub-bosque (GUERRA et al., 2008).

Nas parcelas 2 e 3, existe a predominância da classe de solo Bruno avermelhado escuro, que ocorre principalmente nas áreas elevadas dos planaltos do Sul do Brasil e é caracterizado por ser profundo e poroso, dessa forma não impõe limitações físicas ao desenvolvimento radicular em profundidade.

No tocante a umidade do solo, na Parcela 2, o solo é mais seco na maior porção, onde existe também uma maior elevação do terreno, conseqüentemente na área mais baixa da parcela foi observada umidade moderada. Nos locais de transição entre maior e menor elevação do terreno estão as áreas onde foram detectadas maior porcentagem de pedregosidade superficial aparente, chegando a um valor máximo de 38,6% de rochas cobrindo determinada subparcela. Trata-se de uma área com maior inclinação do terreno, e por isso existe maior diferença nos valores de profundidade de solo entre as subparcelas da porção mais elevada e as subparcelas da parte baixa, variando entre 1,3 e 0,26 m. Não existem clareiras nessa área, onde a média para abertura de dossel é de 22,87%. As árvores da espécie *A. angustifolia* ocorrem em quantidade considerada moderada e encontram-se, em maioria, na porção mais baixa da parcela.

As condições de umidade do solo na Parcela 3 refletem a categoria de umidade moderada em quase toda sua extensão, porém, existe elevada heterogeneidade na ocorrência de rochas aparentes e níveis de pedregosidade, chegando ao valor próximo de 90% de pedras cobrindo algumas subparcelas que coincidem com um pequeno curso de água. Por outro lado, a parcela possui locais sem a presença de pedras e, por isso, maior profundidade do solo. Essa heterogeneidade de

características está refletida nos valores de desvio padrão da pedregosidade (32,95%) e da profundidade do solo (0,42m). Os valores da abertura de dossel não estão distantes aos encontrados na Parcela 2, porém nesse caso, as áreas com maior abertura são os locais onde estão as araucárias dominando o dossel superior e limitando a presença do sub-bosque, sendo a Parcela 3 a área com maior número de árvores da espécie *A. angustifolia*.

O coeficiente de assimetria demonstra o quanto os valores da variável estão distantes da média, tornando a distribuição de frequência assimétrica, não atendendo a condição de simetria, em que 50% dos valores estão acima da observação central e 50% abaixo. Para os dados referentes às variáveis levantadas nas três parcelas, somente a variável profundidade demonstrou assimetria negativa, ou seja, uma maior concentração dos dados nos valores mais altos. As demais variáveis possuem distribuição assimétrica positiva com maior concentração de dados nos valores mais baixos, e a ocorrência de valores altos com baixa frequência.

Já o coeficiente de curtose indica como a distribuição difere da distribuição normal, analisa-se a proximidade do coeficiente com o termo médio de comparação que é $C=3$ (distribuição normal). Os coeficientes de curtose calculados para as variáveis ambientais citados anteriormente na Tabela 1, possuem valores menores que 3, dessa forma, trata-se de distribuição platicúrtica, demonstrando que a distribuição é mais "achatada" que a distribuição normal.

No tocante à geoestatística, a normalidade dos dados não é uma exigência, no entanto, deve-se tomar cuidado para que eles não apresentem uma distribuição com caudas muito longas, com o intuito de não afetar a interpretação dos dados. Em contrapartida, a variabilidade dos dados deve ser necessariamente constante em um mesmo local, tornando possível o uso da geoestatística (CRESSIE, 1991).

Na Tabela 3 foram reunidos os modelos com melhor ajuste aos semivariogramas experimentais, bem como, o Índice de Moran, os valores de R^2 e RMSE considerados na seleção dos modelos.

Tabela 3 - Ajuste dos semivariogramas teóricos para as variáveis do ambiente nas três parcelas em fragmento de Floresta Ombrófila Mista, São Francisco de Paula, RS, Brasil

Parcela 1							
Pedregosidade	Modelo	C_0	C_0+C	A_0	IM	RMSE	R^2

	Linear	7,86	18,17	71,17	0,48	4,51	0,71
Profundidade	Modelo	C ₀	C ₀ +C	A ₀	IM	RMSE	R ²
	Linear	0,04	0,07	63,67	0,31	0,003	0,48
Umidade	Modelo	C ₀	C ₀ +C	A ₀	IM	RMSE	R ²
	Gaussiano	0,67	1,25	95,22	0,44	0,06	0,86
Abertura de Dossel	Modelo	C ₀	C ₀ +C	A ₀	IM	RMSE	R ²
	Linear	469,59	359,23	25,36	0,25	18,99	0,17
Parcela 2							
Pedregosidade	Modelo	C ₀	C ₀ +C	A ₀	IM	RMSE	R ²
	Linear	29,29	99,22	44,78	0,51	34,25	0,60
Profundidade	Modelo	C ₀	C ₀ +C	A ₀	IM	RMSE	R ²
	Linear	0,03	0,10	21,02	0,34	0,016	0,31
Umidade	Modelo	C ₀	C ₀ +C	A ₀	IM	RMSE	R ²
	Exponencial	1,93	0,54	33,20	0,25	0,229	0,88
Abertura de Dossel	Modelo	C ₀	C ₀ +C	A ₀	IM	RMSE	R ²
	Exponencial	9,02	163,44	11,02	0,34	12,90	0,63
Parcela 3							
Pedregosidade	Modelo	C ₀	C ₀ +C	A ₀	IM	RMSE	R ²
	Linear	749,59	1404,94	75,06	0,25	29,51	0,61
Profundidade	Modelo	C ₀	C ₀ +C	A ₀	IM	RMSE	R ²
	Linear	0,16	0,20	19,36	0,14	0,001	0,99
Umidade	Modelo	C ₀	C ₀ +C	A ₀	IM	RMSE	R ²
	Gaussiano	0,51	0,83	29,64	0,10	0,09	0,39
Abertura de Dossel	Modelo	C ₀	C ₀ +C	A ₀	IM	RMSE	R ²
	Linear	171,76	153,39	27,20	0,06	17,90	0,71

Em que: C₀: Efeito pepita, C₀+C: Patamar, A₀: alcance, IM: Índice de Moran, R²: coeficiente de determinação e RMSE: raiz quadrada do erro médio.

Fonte: A autora (2022).

O índice de Moran (IM) é um indicador de associação espacial que demonstra o grau de dependência espacial entre os dados, que pode ser associada a um tipo de covariância. Nesse caso, a informação pretendida é o quanto um determinado dado é parecido com o vizinho próximo e quanto é diferente do vizinho distante. A partir disso, observa-se que na Parcela 1 todas as variáveis possuem IM positivos e com

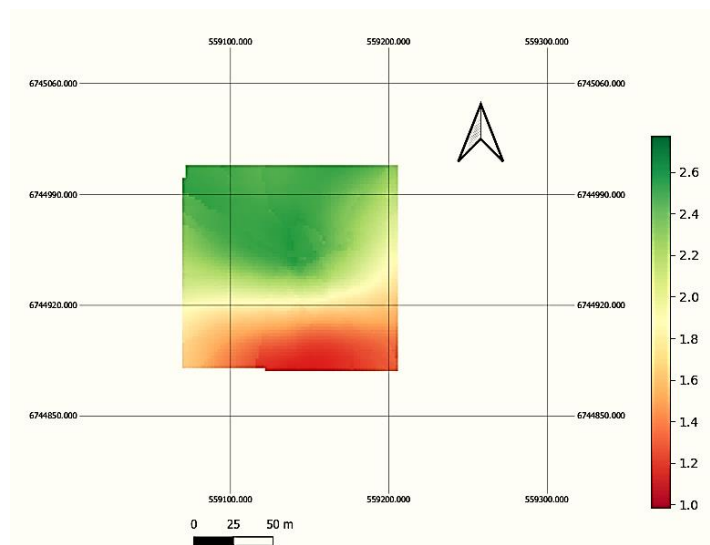
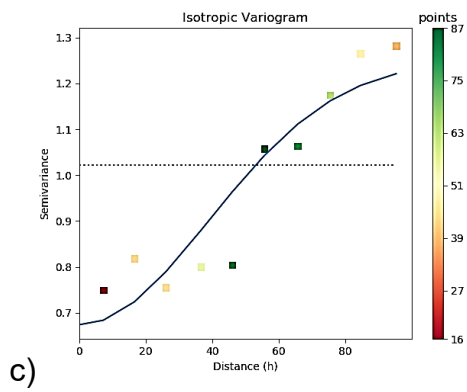
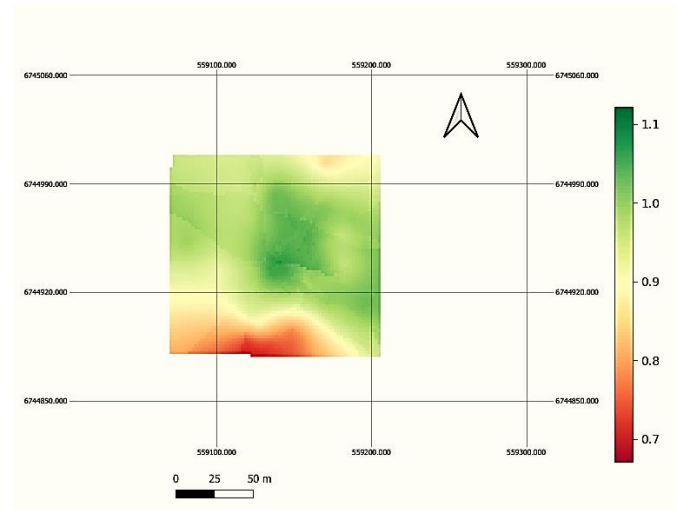
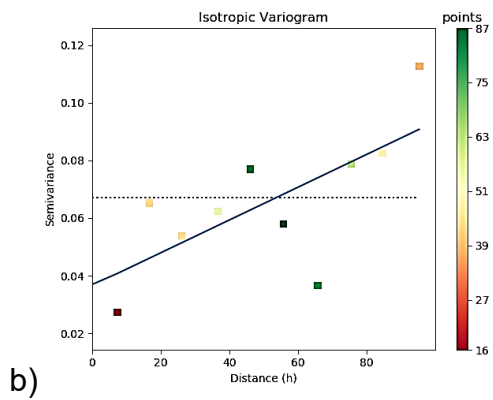
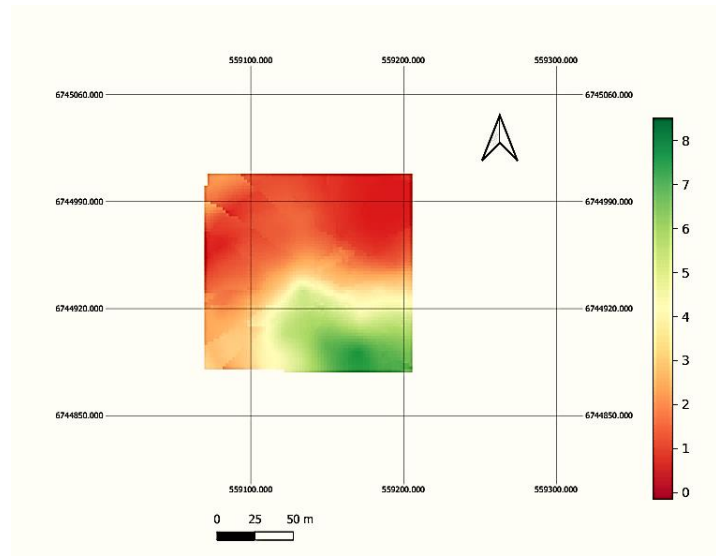
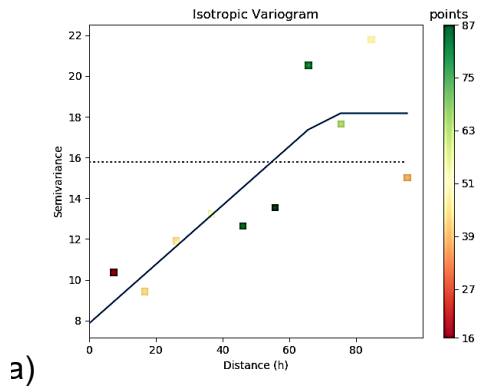
correlação direta moderada, ocorrendo da mesma forma na Parcela 2, de acordo com os valores apresentados. Na Parcela 3 existe uma baixa correlação espacial direta entre os dados de todas as variáveis do ambiente (abertura de dossel, pedregosidade, profundidade e umidade do solo), porém, tanto para a Parcela 3 quanto para as demais, foram registrados valores de coeficiente de determinação ajustado e de RMSE aceitáveis, indicando um ajuste adequado dos modelos, justificando o uso da interpolação adotada.

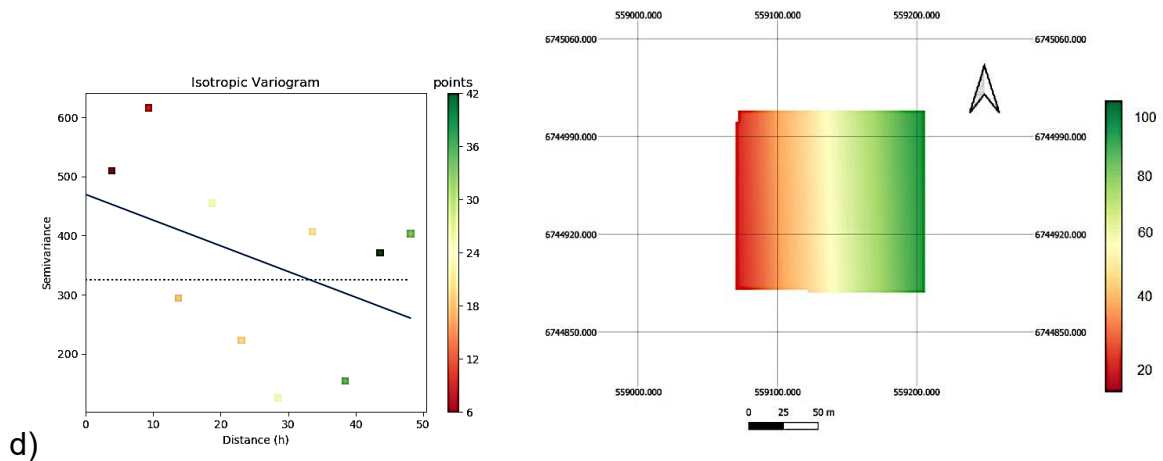
Quando existem variações em pequena escala nos dados, ocorre uma descontinuidade na origem do semivariograma que é representada pelo efeito pepita. Observando os valores de efeito pepita que compõe a tabela anterior, percebe-se que as variáveis pedregosidade e abertura de dossel têm valores de efeito pepita altos em todas as parcelas, demonstrando uma descontinuidade. Para profundidade e umidade os valores foram considerados baixos, ou seja, os semivariogramas foram sensíveis à variação em curtas distâncias.

O parâmetro do semivariograma denominado alcance se refere à distância na qual ele se estabiliza, em que os dados podem ser considerados semelhantes. Na Parcela 1 os dados das variáveis do ambiente tendem a se estabilizar em distâncias maiores quando comparadas às distâncias das demais parcelas, indicando uma maior homogeneidade na distribuição espacial dos dados. Nos demais locais os valores de alcance ficaram entre 10 e 30 metros, com exceção da variável pedregosidade que se diferencia em maiores distâncias. No entanto, em alguns casos o ajuste do semivariograma não mostrou a estabilização da curva, especialmente nos casos em que o modelo linear foi selecionado como o mais adequado. O parâmetro patamar se refere ao ponto a partir do alcance em que não haverá nenhuma contribuição para o procedimento de interpolação.

Todos esses parâmetros que constituem os semivariogramas colaboraram para definir a estrutura espacial e caracterização das parcelas da pesquisa, por isso foram incluídos na interpolação de informações nos locais onde não houve coleta de dados do ambiente dentro da parcela. Considerando que os semivariogramas ajustados tiveram uma precisão estatística aceitável e ausência de anisotropia, procedeu-se com a construção de mapas interpolados através da Krigagem ordinária, gerando a superfície total das variáveis em cada uma das três parcelas. A seguir, na Figura 7, é possível visualizar nos semivariogramas ajustados a variação dos dados em função da distância na Parcela 1.

Figura 7 - Semivariogramas isotrópicos e mapas interpolados para a) pedregosidade; b) profundidade; c) umidade e d) abertura de dossel no Parcela 1, FLONA – SFP, São Francisco de Paula, RS, Brasil

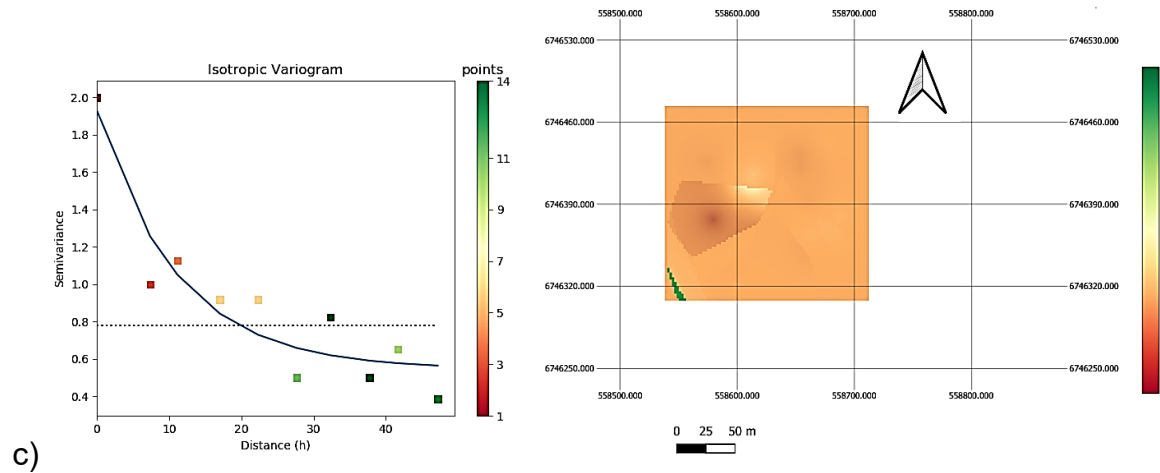
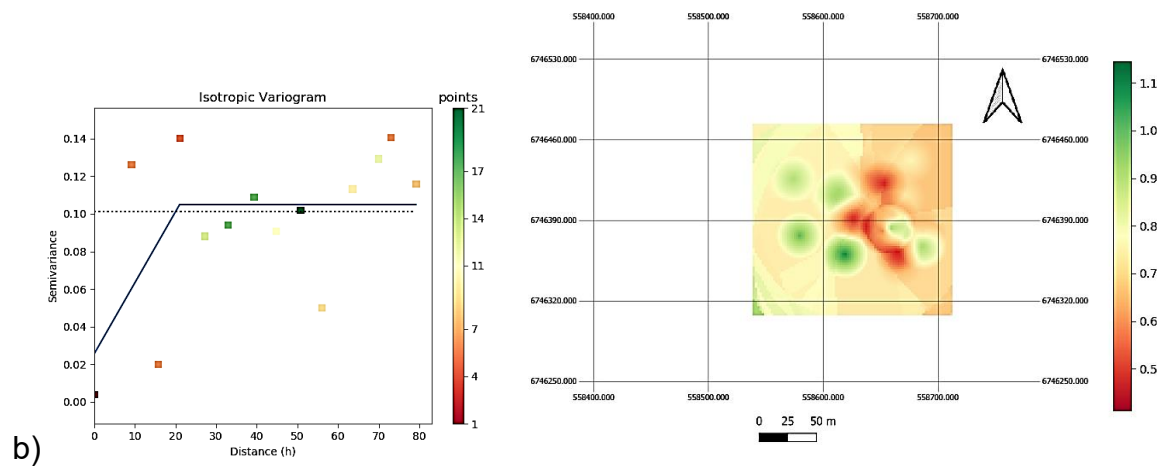
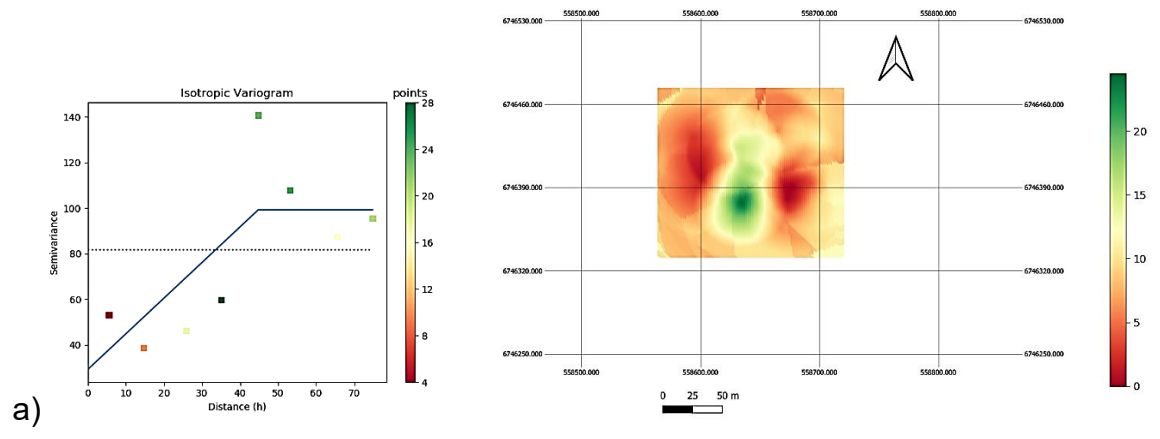


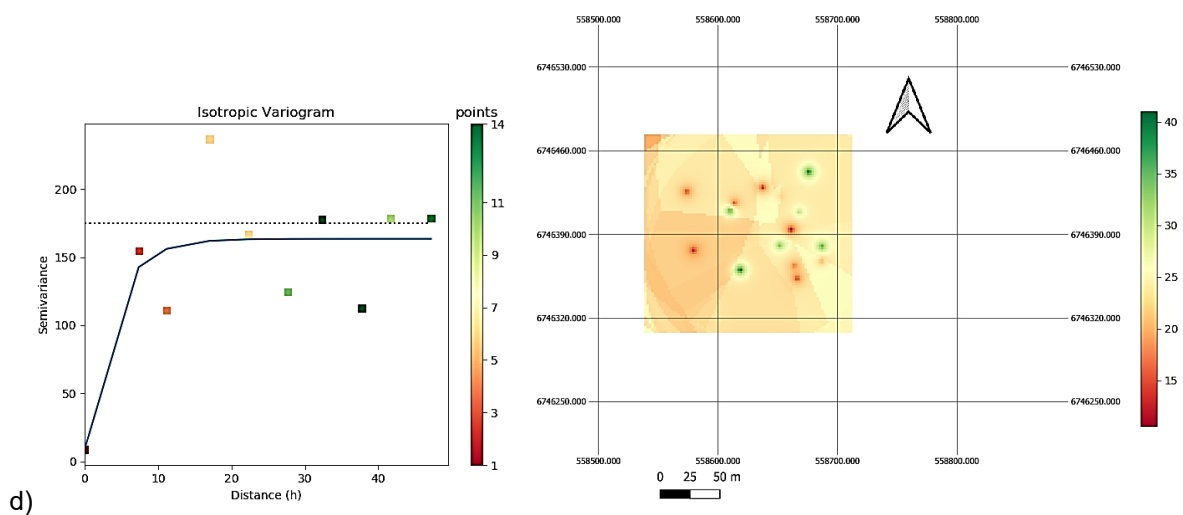


Com os mapas fica visível que nessa parcela existe uma homogeneidade das características em distâncias próximas, havendo uma diferenciação apenas em um local específico da parcela, principalmente quanto a pedregosidade, profundidade e umidade do solo.

Já na Parcela 2 (Figura 8), observou-se maior diferenciação dos fatores concentrada em uma única região, onde o terreno é mais inclinado e pedregoso, formando uma zona de transição entre a porção baixa e a porção mais elevada da parcela, que diferem quanto a profundidade e pedregosidade. O mapa interpolado referente a umidade mostra a predominância de uma cor, indicando o nível de umidade seco como predominante em toda a parcela. Deste modo, ocorreu uma distribuição homogênea dessa característica, não diferindo conforme aumenta a distância.

Figura 8 - Semivariogramas isotrópicos e mapas interpolados para a) pedregosidade; b) profundidade; c) umidade e d) abertura de dossel no Parcela 2, FLONA – SFP, São Francisco de Paula, RS, Brasil

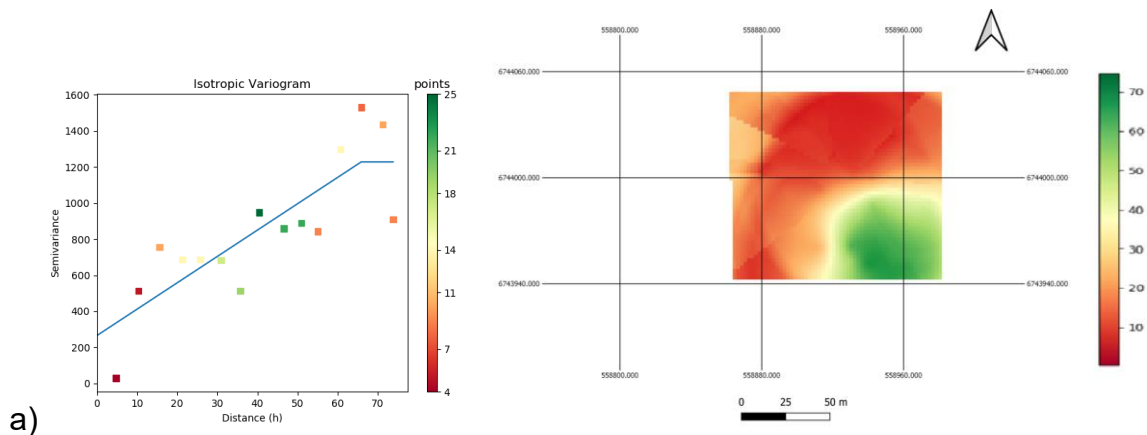


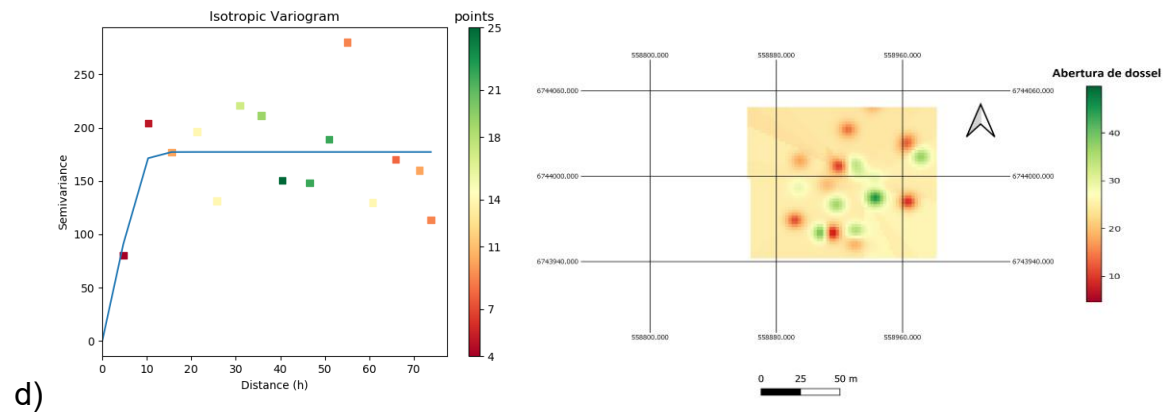
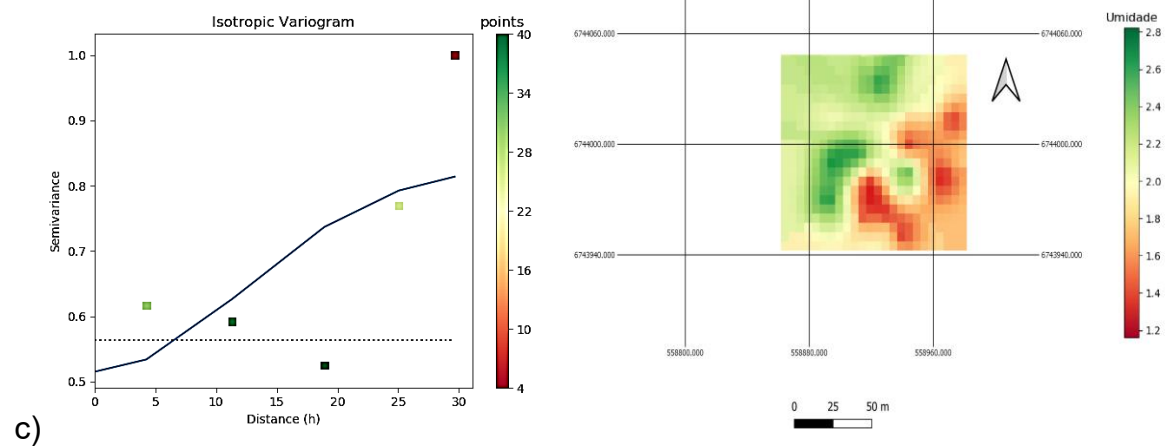
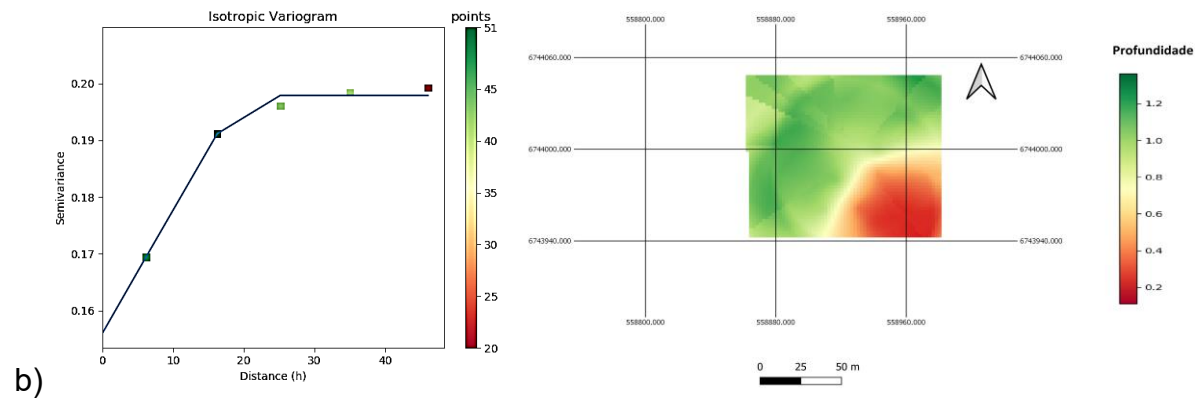


d)
Fonte: A autora (2022).

Os mapas interpolados para as características ambientais da Parcela 3 (Figura 9) evidenciaram uma área localizada ao norte da parcela onde encontram-se condições de menor pedregosidade, solo mais profundo e úmido e ao mesmo tempo com dossel mais fechado, confirmando as observações realizadas visualmente no momento da coleta de dados.

Figura 9 - Semivariogramas isotrópicos e mapas interpolados para a) pedregosidade; b) profundidade; c) umidade e d) abertura de dossel no Parcela 3, FLONA – SFP, São Francisco de Paula, RS, Brasil





Fonte: A autora (2022).

Essa caracterização realizada por meio da geoestatística e da Krigagem ordinária detecta a variabilidade dos elementos e consiste numa ferramenta útil que auxilia na compreensão da dinâmica, ecologia e distribuição das espécies florestais da FOM frente às características descritas. Estudos estão sendo realizados com técnicas de modelagem ambiental por meio da geoestatística, para o desenvolvimento de projetos relacionados a métodos de interpolação de características referentes aos solos, a fim de criar cenários propícios à produção agrícola como o trabalho

desenvolvido por Santos et al. (2020), e para programar indicações de plantio e manejo dos solos como o proposto por Oliveira et al. (2008).

Em florestas naturais desenvolve-se investigações com técnicas de geoestatística especialmente para no processamento de inventários florestais e de levantamentos de solo, como no trabalho realizado por Roveda (2018) em Floresta Ombrófila Mista, na ocasião em que mapeou as variáveis que influenciam na tomada de decisão no manejo florestal. Scolforo et al. (2016) mapearam o estoque de carbono acima do solo de vegetação arbórea nos biomas Cerrado e Mata Atlântica em Minas Gerais, e com isso avaliaram a melhor técnica espacial para o mapeamento, concluindo que a Krigagem ordinária é confiável para o mapeamento e estimativa da distribuição do estoque de carbono.

Barreto (2015) analisou a espacialização de características do solo em fragmentos de FOM e inferiu sobre a influências desses fatores na dinâmica florestal. Assim, como no presente trabalho, as pesquisas citadas mostram a utilidade dessas ferramentas para a caracterização e mapeamento dos fragmentos florestais.

4.2 COMPOSIÇÃO FLORÍSTICA, FITOSSOCIOLOGIA E SELEÇÃO DE ESPÉCIES COM MAIOR VALOR ECOLÓGICO

O número de espécies encontrado na Parcela 1 foi inferior às demais, consistindo em uma menor diversidade de espécies e, ao mesmo tempo, foi a área com menor número de araucárias. Por outro lado, a área com maior número de espécies entre as estudadas (parcela 2), tinha proporcionalmente maior número árvores, e foi o local com número intermediário de araucárias. No entanto, na Parcela 3 o número de espécies apresentou pequena diferença em relação ao número de espécies da Parcela 2, o que não se estendeu ao número de árvores no local. Ao todo, contabilizando as três parcelas, ocorreu o total de 84 espécies que compuseram 34 famílias. Em um estudo anterior nas áreas do PELD, Kanieski (2010), ao analisar seis parcelas de forma conjunta onde foram sorteadas 30 subunidades em cada parcela, encontrou 86 espécies e o mesmo número de famílias. Os valores encontrados foram considerados altos quando comparados a trabalhos anteriores utilizando a mesma área das unidades amostrais na FLONA/ SFP, como os resultados de Sonogo et al. (2007), que encontraram 41 espécies e 18 famílias e Gomes et al. (2008) com 64 espécies de 28 famílias com uma intensidade amostral de 100 subunidades. A

diferença no número de famílias e espécies resultaram do número de unidades amostrais avaliadas, mostrando a influência da área amostral sobre o número de espécies, gêneros e famílias encontrados, pois quanto maior o tamanho da amostra, maior o número de espécies encontradas, por outro lado, há um momento em que se alcança a suficiência amostral, onde o número de espécie se estabiliza com o aumento da área. Além disso, a dinâmica da floresta ao longo do tempo pode influenciar a diversidade de espécies, bem como, deve-se considerar as particularidades do bioma ao qual floresta em observação pertence.

Em relação a riqueza específica destacaram-se as famílias Myrtaceae (19 espécies), Lauraceae (8 espécies), e Fabaceae (5 espécies), ou seja, 38,1% dos registros, evidenciaram a importância dessas famílias na determinação da composição florística das parcelas.

Em diferentes trabalhos realizados em Floresta Ombrófila Mista, como os descritos por Longhi et al. (2006) e Kanieski (2010) nas mesmas áreas, Silva et al. (2012), Higuchi et al. (2013), Souza et al. (2014) e Gomes et al. (2017) em outros fragmentos de FOM, as famílias Myrtaceae e Lauraceae foram as famílias com maior representatividade, sugerindo que este padrão se repete nessa formação florestal. Essa tendência foi observada por Rambo (1951) e Klein (1984) que consideraram a FOM importante para a dispersão da Família Mirtaceae devido a abundante ocorrência de suas espécies.

A diversidade calculada para a parcela 1 foi de 2,92 nats.ind.⁻¹, valor próximo aos encontrados por Nascimento et al. (2001) no RS, e Souza et al. (2014) em SC, e considerada mediana quando comparada com outros fragmentos de Floresta Ombrófila Mista. Na parcela 2 a diversidade foi de 2,84 nats.ind.⁻¹, demonstrando uma diversidade também moderada, e na parcela 3 o valor calculado para a diversidade foi de 3,16 nats.ind.⁻¹, demonstrando ser a área com maior diversidade. A equabilidade encontrada foi de: $J = 0,78$ na parcela 1 indicando baixa dominância ecológica e alta uniformidade na parcela; $J = 0,69$ na parcela 2 apresentando dominância ecológica ainda menor e $J = 0,85$ para a parcela 3, onde houve maior uniformidade da distribuição das plantas entre as espécies existentes.

As espécies com maior número de árvores na parcela 1 foram *Gymnanthes klotzschiana* Müll.Arg, *Eugenia uruguayensis* Cambess, *Casearia decandra* Jacq., *Blepharocalyx salicifolius* (Kunth) O. Berg e *Eugenia subterminalis* DC., demonstrando

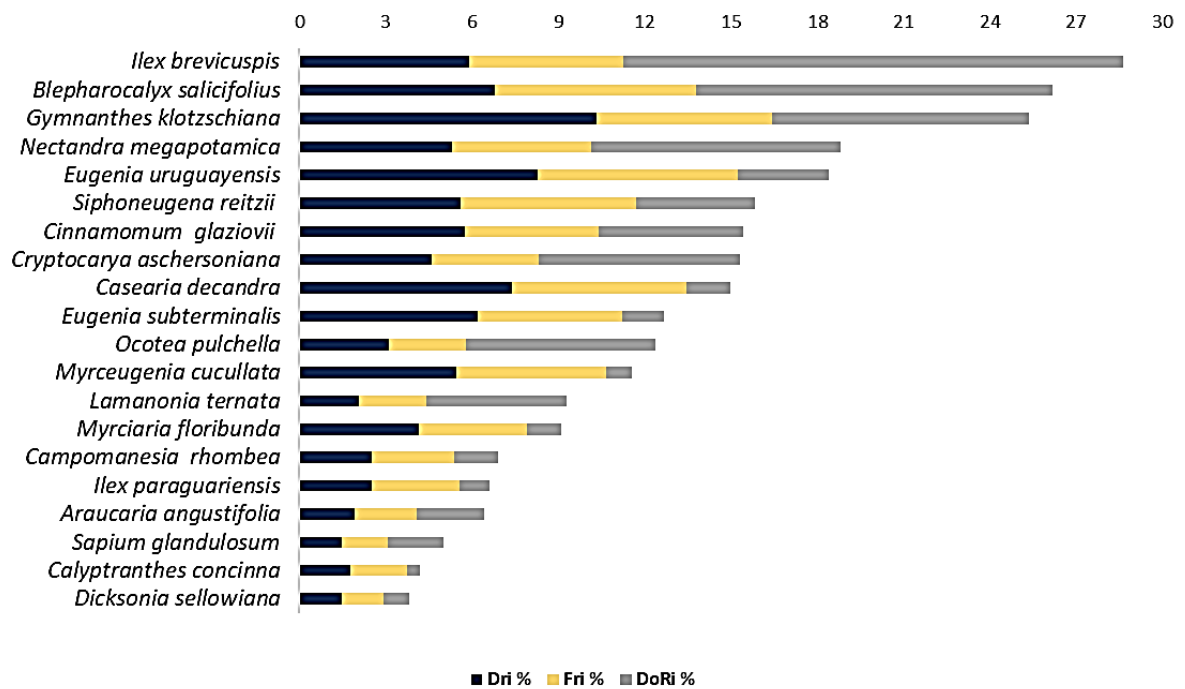
a predominância de espécies secundárias iniciais e tardias, bem como, grande número de árvores de uma espécie climácica (*E. subterminalis*). Importante ressaltar também a alta representatividade das espécies da família Myrtaceae, onde somente três das espécies já citadas representam 20% de todas as árvores amostradas no local. Na parcela 2 as espécies mais abundantes foram *Siphoneugena reitzii*, *Podocarpus lambertii*, *Illex breviscupis*, *Vernonanthura discolor* e *Lamanonia ternata*, dividindo-se, quanto ao grupo ecológico, em secundária inicial, secundária tardia e Pioneira (*V. discolor*). Já as espécies com número de exemplares mais expressivo na parcela 3 foram *Araucaria angustifolia*, *Blepharocalyx salicifolius*, *Gymnanthes klotzschiana*, *Matayba elaeagnoides* e *Cryptocarya aschersoniana*, contendo espécie secundária inicial e tardia, pioneira e climácica.

Das 84 espécies identificadas, 25 pertencem ao grupo ecológico das pioneiras (29,77%), 28 secundárias iniciais (33,33%), 19 secundárias tardias (22,62%) e 12 clímax (14,28%). Apesar dos locais amostrados pertencerem a floresta secundária, com a abundância das Myrtaceae, foi possível inferir que está ocorrendo uma evolução sucessional, ou seja, está ocorrendo substituição por espécies de estágios funcionais mais avançados. No entanto, embora o alto número de árvores registrado para algumas espécies, estas não se distribuíram uniformemente em todas as porções da parcela e nem entre parcelas.

A diferença na distribuição das espécies justifica-se pelas distintas características ambientais, já elucidadas anteriormente, que favorecem algumas espécies e prejudicam outras. Por isso, a densidade de cada espécie foi apenas uma das variáveis utilizadas no cálculo do Índice de Valor de Importância, que considera, além da densidade, também a frequência e dominância. Assim, com a intenção de esclarecer as informações a respeito da estrutura da vegetação arbórea nos três distintos fragmentos de Floresta Ombrófila Mista em estudo, apresenta-se os descritores fitossociológicos clássicos.

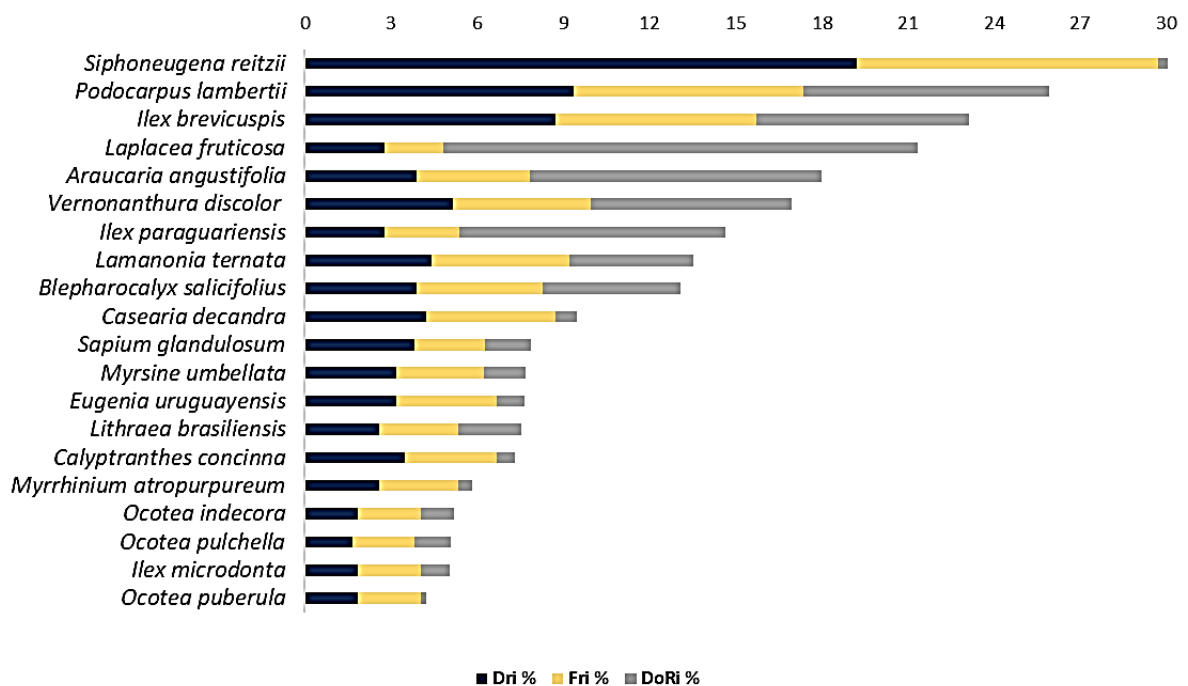
A partir disso, os grupos de espécies com maiores Valor de Importância (VI) foram identificados, tornando possível visualizar as espécies com maior potencial de inserção no trabalho, pois, esse parâmetro fornece uma ideia da densidade, dispersão espacial e a dimensão alcançada por uma espécie, refletindo a importância ecológica desta. As figuras 10, 11 e 12 trazem informações sobre vinte espécies, ordenadas de acordo com maior VI, em cada uma das três parcelas.

Figura 10 - Vinte espécies com os maiores Valores de Importância, identificadas na área denominada Parcela 1, em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista, São Francisco de Paula, RS, Brasil



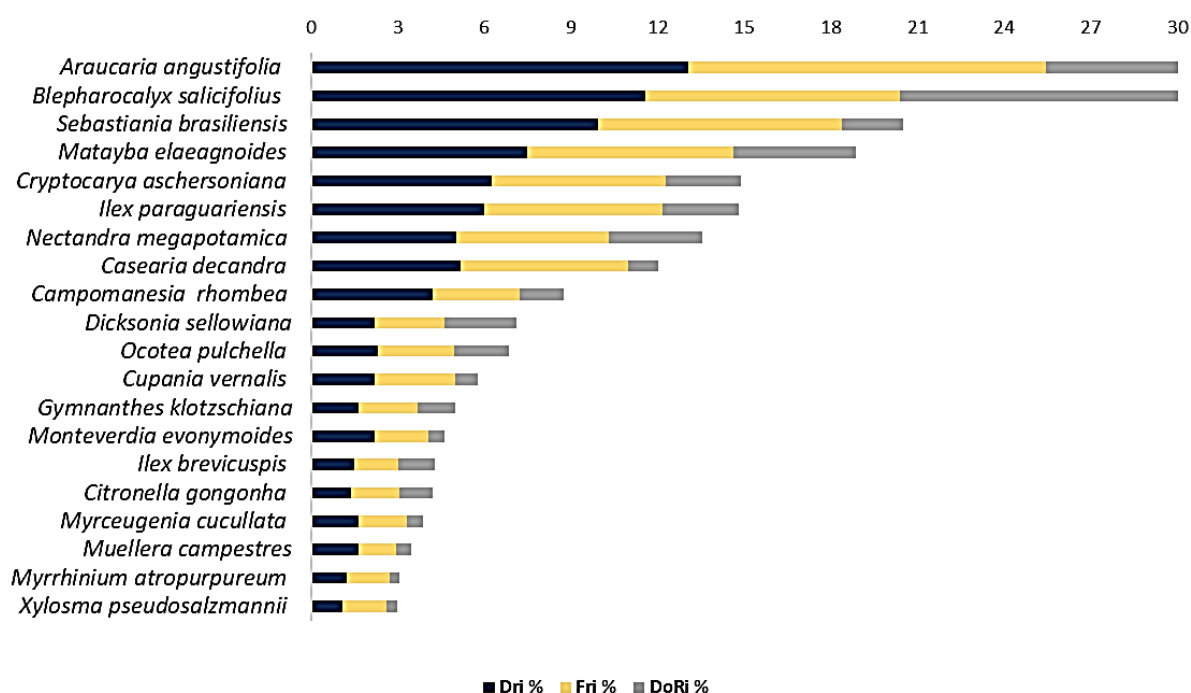
Fonte: A autora (2022).

Figura 11 - Vinte espécies com os maiores Valores de Importância, identificadas na área denominada Parcela 2, em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista, São Francisco de Paula, RS, Brasil



Fonte: A autora (2022).

Figura 12 - Vinte espécies com os maiores Valores de Importância, identificadas na área de nominada Parcela 3, em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista, São Francisco de Paula, RS, Brasil



Fonte: A autora (2022).

Os parâmetros densidade, frequência e dominância quando analisados em cada parcela sob os aspectos estrutural e ecológico, demonstraram que na parcela 1 as espécies que obtiveram os maiores VI caracterizam-se por apresentar os parâmetros de densidade e dominância mais elevados e baixa frequência, indicando a presença de árvores de grande porte, destacando-se especialmente as espécies: *Ilex brevicuspis*, *Blepharocalyx salicifolius*, *Gymnanthes klotzschiana*, *Nectandra megapotamica*, *Eugenia uruguayensis*, *Siphoneugena reitzii*. Para as demais espécies nota-se um padrão contrário, com a diminuição dos parâmetros densidade e dominância e o aumento da Frequência relativa, indicando a presença, na sua grande maioria, de árvores menores com maior distribuição ao longo de toda área. A espécie *Araucaria angustifolia*, nessa parcela, figura entre as espécies de menor VI, ocupando a 17ª posição, com uma uniformidade entre os parâmetros densidade, frequência e dominância, demonstrando uma menor participação da espécie na área.

Os mesmos padrões de estrutura horizontal supracitados foram observados para a parcela 2, com excessão da espécie *Siphoneugena reitzii* que possui o maior VI, como consequência dos elevados valores para os parâmetros densidade e

frequência relativa, no entanto apresenta uma dominância relativa muito baixa, demonstrando que a espécie possui uma baixa taxa de ocupação do ambiente por unidade de área. Além disso, a *Araucaria angustifolia* está entre as cinco espécies de maior VI com valor de dominância relativa elevado, sobressaindo-se aos demais parâmetros, representando uma maior projeção da área basal à superfície do solo, fornecendo deste modo uma medida da biomassa, e não simplesmente o número de árvores.

Um padrão de estrutura horizontal distinto é observado na parcela 3, onde destaca-se a importância da espécie *Araucaria angustifolia* para o local, pois a mesma tem maior valor ecológico, ou seja, maior VI refletindo principalmente uma alta densidade e frequência da espécie ao longo da parcela, o que também é observado nas demais espécies. No entanto, quando comparado aos demais parcelas, as espécies latifoliadas da parcela 3 possuem maiores valores de frequência relativa e menores valores para dominância relativa, por isso, pode-se inferir que as demais espécies distribuem-se de forma uniforme ao longo da área amostrada, atingindo quase todas as porções, porém tratam-se de espécies com menor participação em área basal e biomassa na comunidade, ocupando menores áreas, fato este que pode estar diretamente relacionado com a competição imposta; intra e interespecífica.

Assumindo que os parâmetros de densidade, frequência e dominância expressam a importância ecológica de cada espécie, está descrita nas tabelas 4, 5 e 6 a estrutura horizontal das 20 principais espécies, ordenadas em relação ao maior valor de importância.

Tabela 4 - Parâmetros estruturais de 20 espécies amostradas na Parcela 1 em fragmento de Floresta Ombrófila Mista, São Francisco de Paula, RS, Brasil

Nome da espécie	G	D.abs	Fr.abs	Do.abs	VI %
<i>Ilex brevicuspis</i>	8,0580	40	30	8,06	9,55
<i>Blepharocalyx salicifolius</i>	5,7493	46	39	5,75	8,72
<i>Gymnanthes klotzschiana</i>	4,1420	70	34	4,14	8,45
<i>Nectandra megapotamica</i>	4,0232	36	27	4,02	6,28
<i>Eugenia uruguayensis</i>	1,4663	56	39	1,47	6,14
<i>Siphoneugena reitzii</i>	1,9130	38	34	1,91	5,27
<i>Cinnamomum glaziovii</i>	2,3317	39	26	2,33	5,15
<i>Cryptocarya aschersoniana</i>	3,2294	31	21	3,23	5,10

<i>Casearia decandra</i>	0,6995	50	34	0,70	4,99
<i>Eugenia subterminalis</i>	0,6799	42	28	0,68	4,23
<i>Ocotea pulchella</i>	3,0564	21	15	3,06	4,13
<i>Myrceugenia cucullata</i>	0,4201	37	29	0,42	3,85
<i>Lamanonia ternata</i>	2,2738	14	13	2,27	3,10
<i>Myrciaria floribunda</i>	0,5665	28	21	0,57	3,04
<i>Campomanesia rhombea</i>	0,7063	17	16	0,71	2,30
<i>Ilex paraguariensis</i>	0,4922	17	17	0,49	2,20
<i>Araucaria angustifolia</i>	1,0993	13	12	1,10	2,15
<i>Sapium glandulosum</i>	0,8877	10	9	0,89	1,67
<i>Calyptanthes concinna</i>	0,2008	12	11	0,20	1,39
<i>Dicksonia sellowiana</i>	0,4138	10	8	0,41	1,27

Em que: G = área basal da espécie; D.abs = densidade absoluta; Do.abs = dominância absoluta; F.abs = frequência absoluta; VI% = valor de importância em porcentagem.

Fonte: A autora (2022).

Tabela 5 - Parâmetros estruturais de 20 espécies amostradas na Parcela 2 em fragmento de Floresta Ombrófila Mista, São Francisco de Paula, RS, Brasil.

Nome das espécies	G	D.abs	F.abs	Do.abs	VI%
<i>Siphoneugena reitzii</i>	5,4877	187	72	5,49	12,81
<i>Podocarpus lambertii</i>	5,3919	91	55	5,39	8,65
<i>Ilex brevicuspis</i>	4,6557	85	48	4,66	7,71
<i>Laplacea fruticosa</i>	10,3751	27	14	10,38	7,11
<i>Araucaria angustifolia</i>	6,3837	38	27	6,38	6,00
<i>Vernonanthura discolor</i>	4,4062	50	33	4,41	5,65
<i>Ilex paraguariensis</i>	5,8228	27	18	5,82	4,89
<i>Lamanonia ternata</i>	2,6980	43	33	2,70	4,51
<i>Blepharocalyx salicifolius</i>	3,0167	38	30	3,02	4,36
<i>Casearia decandra</i>	0,4656	41	31	0,47	3,16
<i>Sapium glandulosum</i>	1,0064	37	17	1,01	2,63
<i>Myrsine umbellata</i>	0,9175	31	21	0,92	2,57
<i>Eugenia uruguayensis</i>	0,5999	31	24	0,60	2,54
<i>Lithraea brasiliensis</i>	1,3789	25	19	1,38	2,51
<i>Calyptanthes concinna</i>	0,3801	34	22	0,38	2,43
<i>Myrrhimum atropurpureum</i>	0,3111	25	19	0,31	1,94
<i>Ocotea indecora</i>	0,7246	18	15	0,72	1,73

<i>Ocotea pulchella</i>	0,7891	16	15	0,79	1,69
<i>Ilex microdonta</i>	0,6469	18	15	0,65	1,69
<i>Ocotea puberula</i>	0,1116	18	15	0,11	1,40

Em que: G = área basal da espécie; D.abs = densidade absoluta; Do.abs = dominância absoluta; F.abs = frequência absoluta; VI% = valor de importância em porcentagem.

Fonte: A autora (2022).

Tabela 6 - Parâmetros estruturais de 20 espécies amostradas na Parcela 3 em fragmento de Floresta Ombrófila Mista, São Francisco de Paula, RS, Brasil

Nome da espécie	G	D.abs	F.abs	Do.abs	VI%
<i>Araucaria angustifolia</i>	23,8976	96	66	23,90	27,14
<i>Blepharocalyx salicifolius</i>	4,2829	85	47	4,28	10,14
<i>Sebastiania brasiliensis</i>	0,9000	73	45	0,90	6,83
<i>Matayba elaeagnoides</i>	1,8086	55	38	1,81	6,29
<i>Cryptocarya aschersoniana</i>	1,1130	46	32	1,11	4,96
<i>Ilex paraguariensis</i>	1,1218	44	33	1,12	4,94
<i>Nectandra megapotamica</i>	1,3829	37	28	1,38	4,51
<i>Casearia decandra</i>	0,4400	38	31	0,44	4,01
<i>Campomanesia rhombea</i>	0,6579	31	16	0,66	4,00
<i>Dicksonia sellowiana</i>	1,0634	16	13	1,06	2,37
<i>Ocotea pulchella</i>	0,8147	17	14	0,81	2,28
<i>Cupania vernalis</i>	0,3299	16	15	0,33	1,92
<i>Gymnanthes klotzschiana</i>	0,5535	12	11	0,55	1,66
<i>Monteverdia evonymoides</i>	0,2456	16	10	0,25	1,54
<i>Ilex brevicuspis</i>	0,5483	11	8	0,55	1,43
<i>Citronella gongonha</i>	0,4928	10	9	0,49	1,40
<i>Myrceugenia cucullata</i>	0,2391	12	9	0,24	1,29
<i>Muelleria campestris</i>	0,2280	12	7	0,23	1,16
<i>Myrrhimum atropurpureum</i>	0,1464	9	8	0,15	1,02
<i>Xylosma pseudosalzmannii</i>	0,1619	8	8	0,16	0,99

Em que: G = área basal da espécie; D.abs = densidade absoluta; Do.abs = dominância absoluta; F.abs = frequência absoluta; VI% = valor de importância em porcentagem.

Fonte: A autora (2022).

Na Parcela 1, a espécie *Gymnanthes klotzschiana* apresentou maior densidade no componente arbóreo com uma densidade absoluta de 70 árv.ha⁻¹ e densidade

relativa de 10,34%, no entanto, não foi a espécie com maior frequência dentro da parcela, mas sim as espécies *Blepharocalyx salicifolius* e *Eugenia uruguayensis*. A espécie com maior dominância nessa área foi *Ilex brevicuspis* sendo esta também a espécie com maior VI. Além disso, a medida em que se avança para o estágio climácico, a *Araucaria angustifolia*, tende a ser substituída pelas folhosas. O adensamento do dossel da floresta reduz a luminosidade abaixo deste, o que faz com que a araucária não encontre boas condições para se regenerar e se desenvolver, não alcançam grandes dimensões, e ao longo do tempo tem tendência em desaparecer (LINGNER, et al., 2007), fato que contribui para explicar o menor número de araucárias nesse local.

Entre as vinte espécies listadas na Parcela 2, a *Siphoneugena reitzii* apresentou maior densidade absoluta de 187 árv.ha⁻¹, esta também foi a espécie de maior frequência absoluta, além disso, *S. reitzii* foi a espécie com maior VI, e a espécie de maior dominância foi *Laplacea fruticosa*. Na parcela 3 a espécie de maior densidade absoluta foi *Araucaria angustifolia* com 96 árv.ha⁻¹, esta também foi a espécie mais frequente e de maior dominância na parcela, sendo conseqüentemente a de maior VI, seguida por *Blepharocalyx salicifolius* que teve os segundos maiores valores para os quatro parâmetros. Esses resultados condizem com os encontrados nesta área do PELD por Sonogo et al. (2007) e Kanieski (2010), que enunciaram praticamente as mesmas espécies quanto a importância ecológica, excetuando *Laplacea fruticosa* que apareceu com elevada dominância neste estudo. Esta diferença decorreu do fato da presente pesquisa tratar cada parcela de forma particular e não como um conjunto único de dados.

O resultado mostrou ainda que as espécies não ocorreram uniformemente em todas as parcelas amostradas, algumas de ocorrência exclusiva em parcela específica, dificultando comparações futuras. Desta forma foram eleitas espécies que, além de atender aos critérios de maior VI, mas que também apresentassem potencial econômico, e ocorressem em mais de uma parcela, conforme relacionado na Tabela 7. *A. angustifolia* não foi incluída entre as selecionadas por não pertencer a ordem das latifoliadas, e principalmente por ser considerada, nesse trabalho, um elemento sempre presente independente da sua posição na lista das espécies de maior valor ecológico.

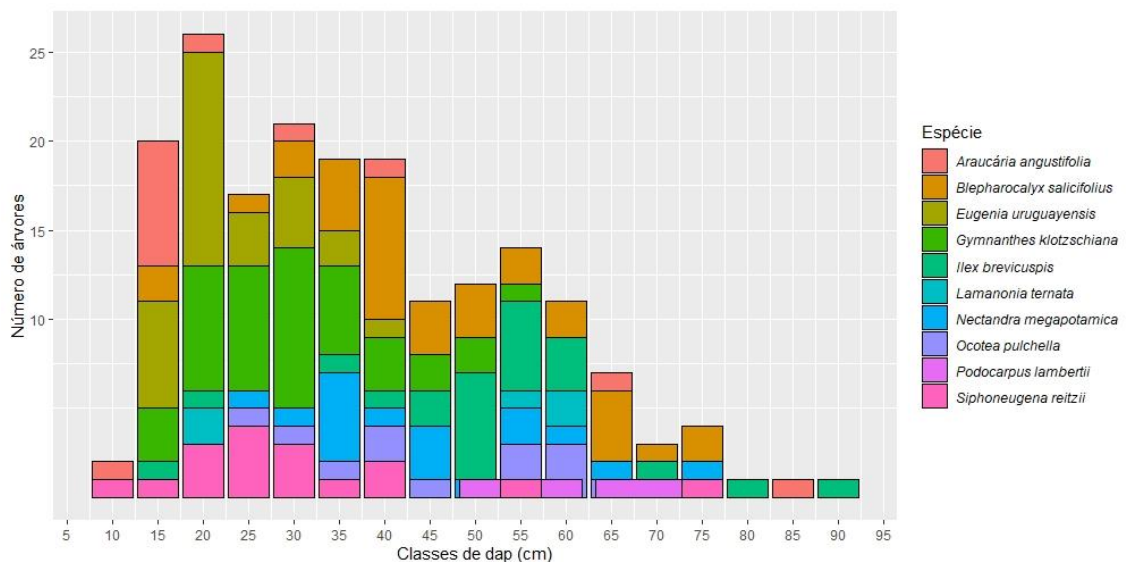
Tabela 7 - Espécies selecionadas para a modelagem do incremento na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS.

Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3
<i>Ilex brevicuspis</i>	<i>Siphoneugena reitzii</i>	<i>Blepharocalyx salicifolius</i>
<i>Blepharocalyx salicifolius</i>	<i>Podocarpus lambertii</i>	<i>Matayba elaeagnoides</i>
<i>Gymnanthes klotzschiana</i>	<i>Vernonanthura discolor</i>	<i>Cryptocaria aschersoniana</i>
<i>Nectandra megapotamica</i>	<i>Lamanonia ternata</i>	<i>Ilex paraguariensis</i>
	<i>Blepharocalyx salicifolius</i>	
<i>Eugenia uruguayensis</i>	<i>Nectandra megapotamica</i>	<i>Nectandra megapotamica</i>
	<i>Ocotea pulchella</i>	

Fonte: A autora (2022).

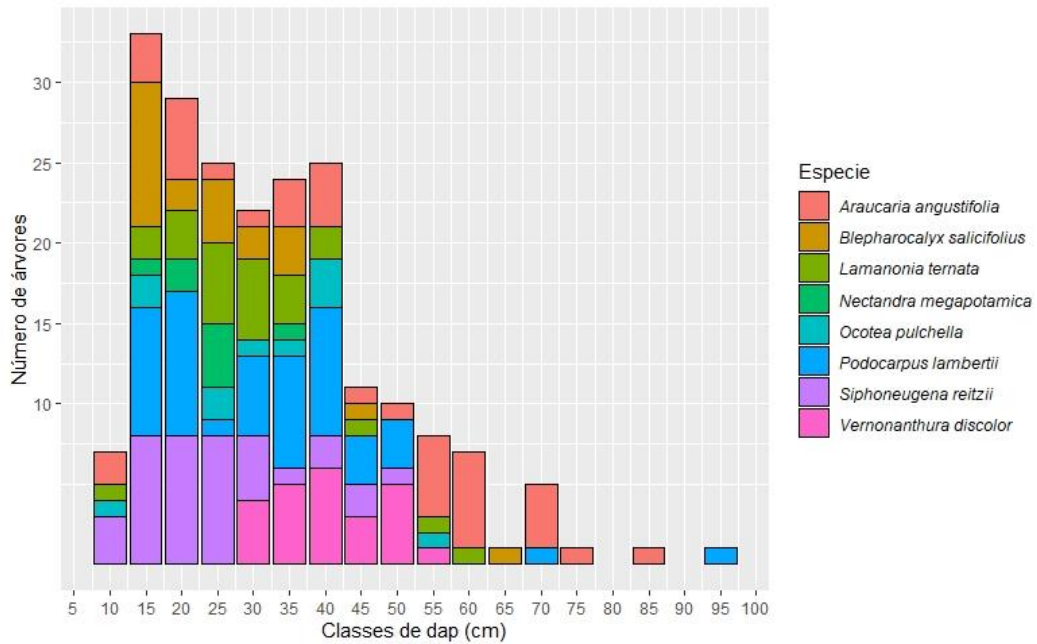
O arranjo das árvores das espécies selecionadas e das árvores de *A. angustifolia* em suas respectivas classes de diâmetro na Parcela 1, 2 e 3 estão descritas nas Figuras 13, 14 e 15 a seguir.

Figura 13 – Distribuição de frequência nas classes de diâmetro para as árvores de *Araucaria angustifolia* e para as espécies de interesse na Parcela 1, São Francisco de Paula, RS, Brasil



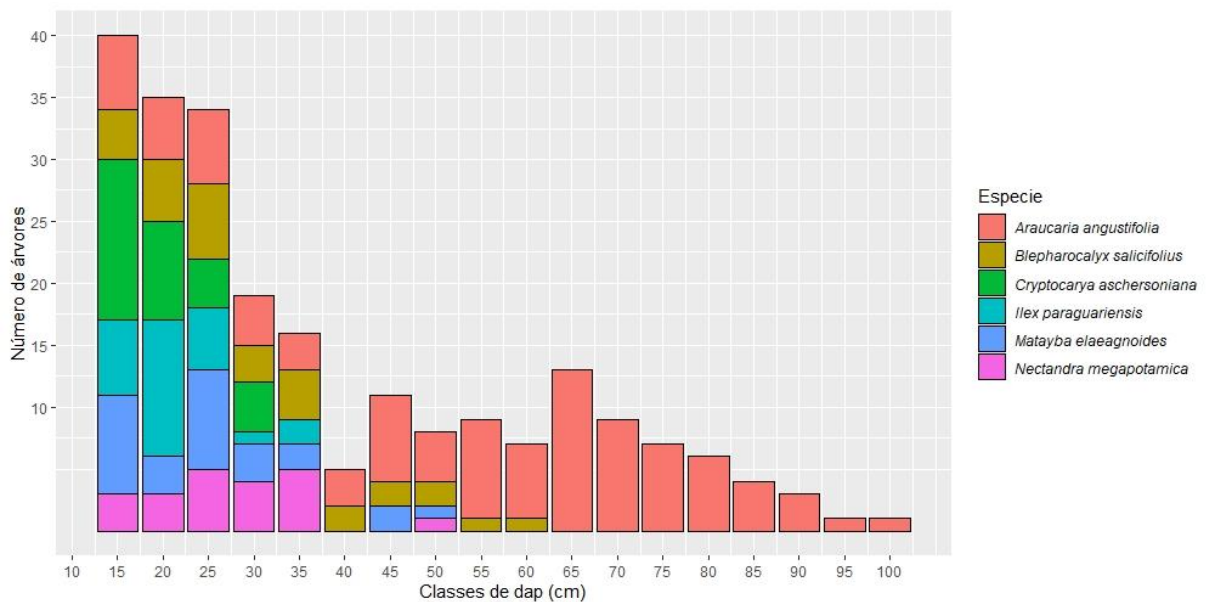
Fonte: A autora (2022).

Figura 14 – Distribuição de frequência nas classes de diâmetro para as árvores de *Araucária angustifolia* e para as espécies de interesse na Parcela 2, São Francisco de Paula, RS, Brasil



Fonte: A autora (2022).

Figura 15 – Distribuição de frequência nas classes de diâmetro para as árvores de *Araucária angustifolia* e para as espécies de interesse na Parcela 3, São Francisco de Paula, RS, Brasil



Fonte: A autora (2022).

Ilex brevicuspis (Caúna-da-Serra) é uma espécie característica dos sub-bosques dos pinhais onde era vastamente difundida, principalmente no estado de Santa Catarina. Possui madeira de fácil trabalhabilidade, empregada para caixotaria, lenha

e carvão, possui aspecto atraente e tem potencial para laminados. *Blepharocalyx salicifolius* (Murta) é caracterizada como secundária tardia ou clímax, exigente em luz, encontrada no interior e na orla de ambientes ripários, prefere solos compactos de aclave suave e drenagem bastante lenta. A madeira da murta pode ser empregada em acabamentos internos e tabuados em geral, é reputada como de excelente qualidade para lenha e carvão (PAULA; ALVES, 1997), sendo recomendada para formação de florestas energéticas (LONGHI, 1995). *Gymnanthes klotzschiana* (Branquilho) é árvore pioneira, quase exclusiva das florestas aluviais e de galeria ao longo de rios, principalmente em regiões de altitude, adaptada a ambientes úmidos (BACKES; NARDINO, 1998). Ocorre em agrupamentos, chegando a formar populações quase puras. É heliófita, portanto é uma planta que se desenvolve em ambientes abertos, é rara no interior da floresta primária densa. A madeira tem uso como lenha e produção de carvão. Indicada para recomposição de áreas ao longo de margens de rio e reservatórios, devido sua preferência por solos úmidos e brejosos.

A espécie *Eugenia uruguayensis*, conhecida popularmente como Guamirim, é espécie secundária inicial, heliófita, que tem preferência por ambientes aluviais, sendo característica e exclusiva dos planaltos catarinense e gaúcho na zona dos pinhais e da mata branca do vale do rio Uruguai. Ocorre principalmente nas submatas de araucária mais evoluídas, preferindo solos profundos e úmidos.

Siphoneugena reitzii, conhecida como Camboim, é espécie heliófila e seletiva higrófila, sendo um dos elementos mais característicos das florestas Nebular e Ombrófila Mista do nordeste gaúcho (MARCHIORI; SOBRAL, 1997). Está incluída no grupo sucessional das espécies secundárias tardias e produz madeira muito dura e pesada, utilizada localmente em moirões de cerca ou como lenha.

Podocarpus lambertii (Pinheiro-bravo) é uma árvore pioneira característica das matas de altitude, heliófita, apresenta dispersão irregular. Em alguns pontos pode ocorrer em agrupamentos quase puros e ser completamente ausente em outros. Encontra-se também em associações secundárias principalmente com *A. angustifolia*. A madeira do pinheiro-bravo é usada na carpintaria, na fabricação de compensados, forros, guarnições, acabamentos internos, entre outros.

Por apresentar excelentes características xilotecnológicas, a *Nectandra megapotamica* (Canela – preta) foi incluída na lista de espécies a serem estudadas nessa pesquisa. Mesmo estando no grupo intermediário com referência ao VI, é uma espécie heliófita que não apresenta preferência definida por tipo de solo, tem

dispersão ampla na floresta ombrófila em geral, sendo menos frequente nas associações pioneiras e secundárias. Nos sub-bosques dos pinhais é considerada muito rara. A madeira tem potencial para ser usada na construção civil, em esquadrias e tabuado em geral, no entanto o cheiro forte limita seu uso.

Da mesma forma, *Ocotea pulchella*, é uma planta seletiva higrófito e heliófito, frequente nas submatas dos pinhais, sua madeira pode ser empregada em tabuado em geral, em estruturas e acabamentos na construção civil. Também é descrita como propícia para plantios mistos em áreas degradadas (LORENZI, 1998; MARCHIORI, 1997; CARVALHO, 2006).

Vernonanthura discolor, conhecida com Vassourão-branco, é exclusiva da submata dos pinhas, pioneira e seletiva higrófito, ocorre exclusivamente em matas que sofreram interferência humana e em formações secundárias, preferencialmente em locais úmidos. Possui madeira com baixa densidade e resistência mecânica, podendo ser empregada principalmente na caixotaria e aglomerados.

A espécie *Lamanonia ternata* (Guaperê) é característica da floresta semidecídua de altitude, ocorre preferencialmente em topos de morros onde o solo é bem drenado, encontrada tanto em floresta primária densa quanto em secundárias. Utiliza-se a madeira principalmente na marcenaria, em obras internas e carpintaria (LORENZI, 1998; MARCHIORI, 1997; CARVALHO, 2006).

O “Camboatá”, *Matayba elaeagnoides*, é uma planta mesófito muito frequente nas submatas de pinhais e matas semidecíduas de altitude localizadas em solos úmidos. É encontrada no interior das matas primárias e nos estágios mais avançados da sucessão secundária. Sua madeira é usada na construção civil, em itens estruturais, para acabamentos em obras internas e para lenha e carvão. Amplamente distribuída na mata pluvial atlântica e nos sub-bosques dos pinhais a *Cryptocaria aschersoniana* (Canela-fogo) é frequente ao longo de rios, em solos úmidos, com dispersão ampla nas regiões de altitude. A madeira é propícia para acabamentos internos, laminados, rodapés, forros, molduras, vigamentos e outros itens da construção civil.

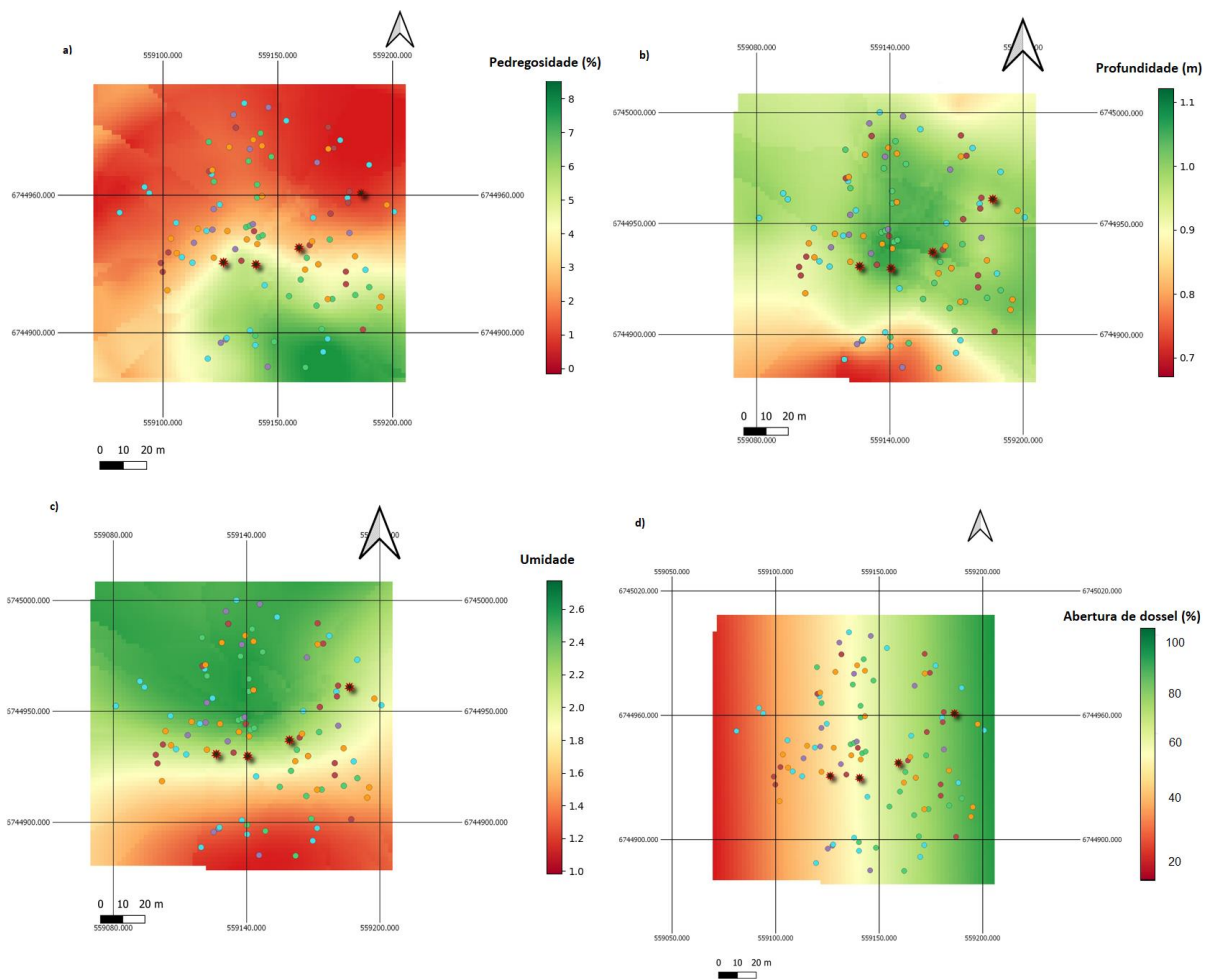
Particularmente a *Ilex paraguariensis* A. St.-Hil. (Erva-mate) representa alta rentabilidade devido a cultura da Erva-mate, é uma espécie clímax tolerante à sombra, cresce nas associações mais evoluídas dos pinhais especialmente com a *Araucaria angustifolia*, regenera-se com facilidade quando o estrato superior e, principalmente, os estratos arbustivos e herbáceos são raleados, assim, tolera sombreamento de

intensidade média, preferindo mais luz na fase adulta, é também tolerante às baixas temperaturas, sendo as folhas o seu principal produto, contudo, existem relatos de que a madeira produz lâmina de excelente qualidade (LORENZI, 1998; MARCHIORI, 1997; CARVALHO, 2006).

4.3 INFLUÊNCIA DE CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE NA SELETIVIDADE AMBIENTAL DE ESPÉCIES ARBÓREAS

A interação das características do ambiente observada em cada uma das três parcelas, permitiu inferir sobre as preferências, adaptações e distribuição das espécies em estudo nessas áreas, demonstrando a influência de fatores como pedregosidade, profundidade, umidade e abertura do dossel na ocorrência das espécies. Na figura 16 foi representada a presença de árvores das cinco espécies alvo do estudo na parcela 1, bem como da araucária, de acordo com as características do ambiente.

Figura 16 – Distribuição espacial das espécies em estudo de acordo com as características do ambiente na Parcela 1, Florestas Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil



Identificação das espécies

● *E. uruguayensis* ● *I. brevicuspis* ● *B. salicifolius* ● *N. megapotamica* ● *G. klotzchiana* ● *A. angustifolia*

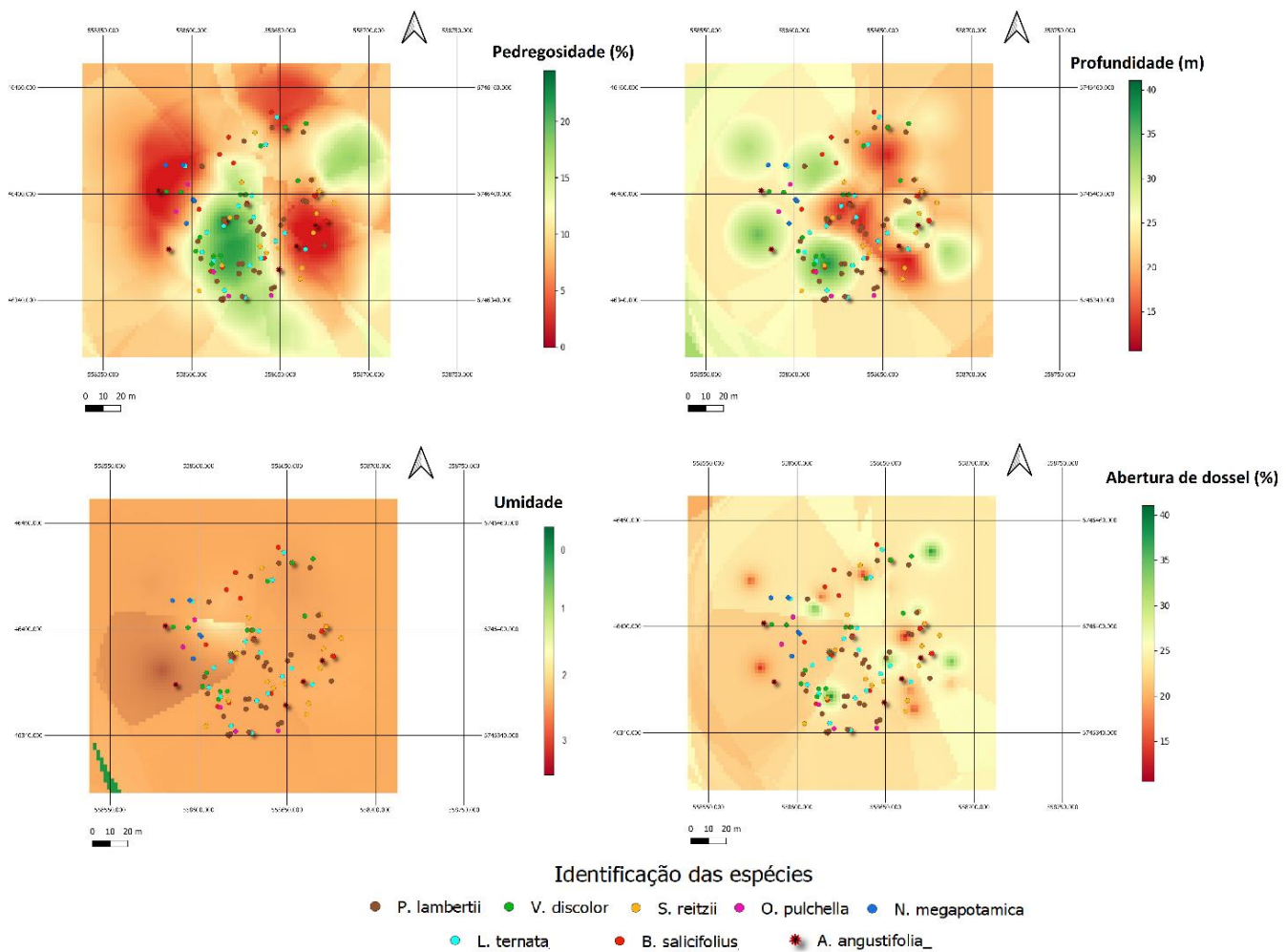
Fonte: A autora (2022).

Entre as demais, a Parcela 1 é a que apresentou menor porcentagem de pedregosidade (rochas aparentes), sendo esta característica registada apenas em uma zona específica, onde foi evidente o menor número de árvores. As poucas árvores presentes nessa porção da parcela eram em maioria das espécies *G. klotzchiana* e *B. salicifolius*, no entanto essas espécies estão presentes também nas distintas porções da parcela. *G. klotzchiana* é descrita na literatura como sendo uma espécie que possui preferências por ambientes brejosos, está presente principalmente em florestais aluviais e em ambientes abertos, sendo comumente indicada para a recomposição de margens de rios (espécie pioneira). Por outro lado, a presença de *G. klotzchiana* também em área com maior ocorrência de pedras e solo menos profundo na Parcela 1, corrobora com a descrição, por parte de alguns autores, de que a espécie apresenta adaptabilidade à distintas condições edáficas, como solos

compactados, úmidos e secos (BACKES e NARDINO, 1998; MARTINS, 2017). Isso demonstra a ampla plasticidade de ocorrência da espécie, podendo ser encontrada em áreas de forte saturação hídrica, assim como, em áreas bem drenadas. De acordo com Barddal (2006), a espécie é bastante rústica, capaz de suportar condições extremas como a exposição das raízes.

Já *B. salicifolius* possui preferência por solos compactados e de lenta drenagem, coincidindo com as condições da zona de maior pedregosidade, menor profundidade e umidade dentro da parcela, onde existem árvores dessa espécie adaptando-se a tais características. As araucárias encontram-se em uma zona de transição entre diferentes níveis de pedregosidade dentro da parcela, estabelecendo-se em uma área com pedregosidade moderada e maior profundidade de solo e umidade. Percebe-se a preferência da espécie *E. uruguayensis* pelas áreas mais profundas, menos pedregosas e mais úmidas, já as demais espécies distribuem-se de maneira mais homogênea nesta área. Na figura 17 pode ser observada a distribuição das espécies alvo do estudo dentro da Parcela 2, onde ficou evidente a ausência de árvores na região representada pela cor verde mais escura no mapa referente à pedregosidade, sendo que este local, além de ser pedregoso possui maior inclinação do terreno impedindo o desenvolvimento e a sobrevivência das plantas.

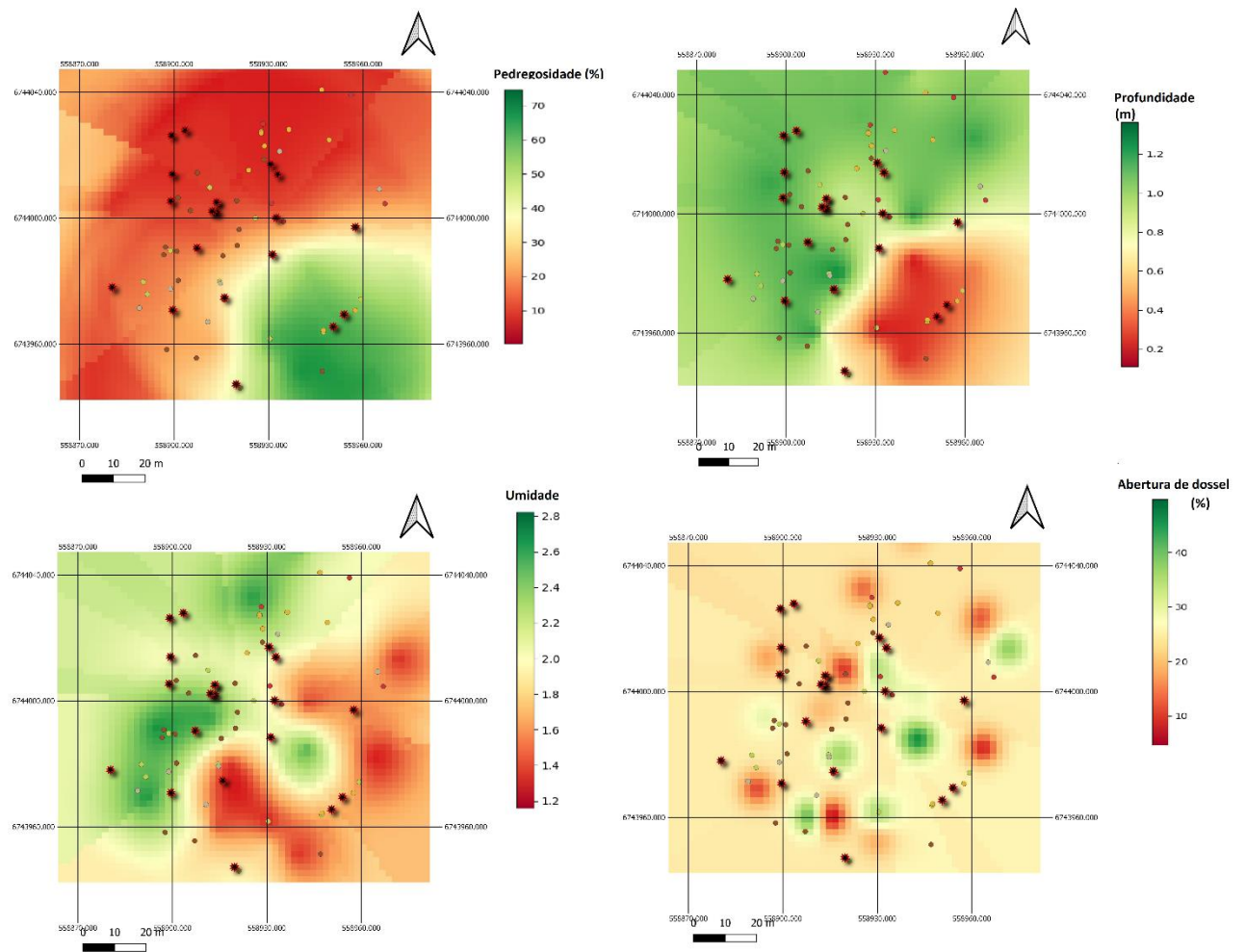
Figura 17 – Distribuição espacial das espécies em estudo de acordo com as características do ambiente na Parcela 2, Florestas Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil



Fonte: A autora (2022).

As árvores das oito espécies demonstradas nos mapas distribuem-se de forma homogênea não havendo formações de grupos específicos associados às características das áreas, com exceção de *P. lambertii* que está presente em maior número nas áreas com maior pedregosidade e solo mais raso de ocorrência na parte mais alta da parcela e, por outro lado, a espécie *N. megapotamica* aparenta ter preferência contrária, estando em solos mais profundos e menos pedregosos. As particularidades das espécies na Parcela 3 podem ser observadas na Figura 18.

Figura 18 – Distribuição espacial das espécies em estudo de acordo com as características do ambiente na Parcela 3, Florestas Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil



Identificação das espécies

* *A. angustifolia*
 ● *B. salicifolius*
 ● *C. aschersoniana*
 ● *I. paraguayensis*
 ● *N. megapotamica*
 ● *M. elaeagnoides*

Fonte: A autora (2022)

A Parcela 3 é a área onde a espécie *A. angustifolia* ocorre em maior número, essas árvores estão concentradas, em maioria, nas áreas com níveis de pedregosidade baixos, bem como, o solo tem maior profundidade e umidade. Ao mesmo tempo a abertura de dossel é menor pelo fato da araucária dominar o espaço do dossel, imprimindo menor área disponível para outras espécies. É visível a preferência da espécie *B. salicifolius* por locais de solo mais profundo, úmido e com menor pedregosidade. Essas árvores conseguem, assim como a araucária, estar em locais com um menor índice de abertura de dossel e, por consequência ter maior dominância no extrato superior do dossel.

Nesta parcela existe maior concentração de árvores das cinco espécies

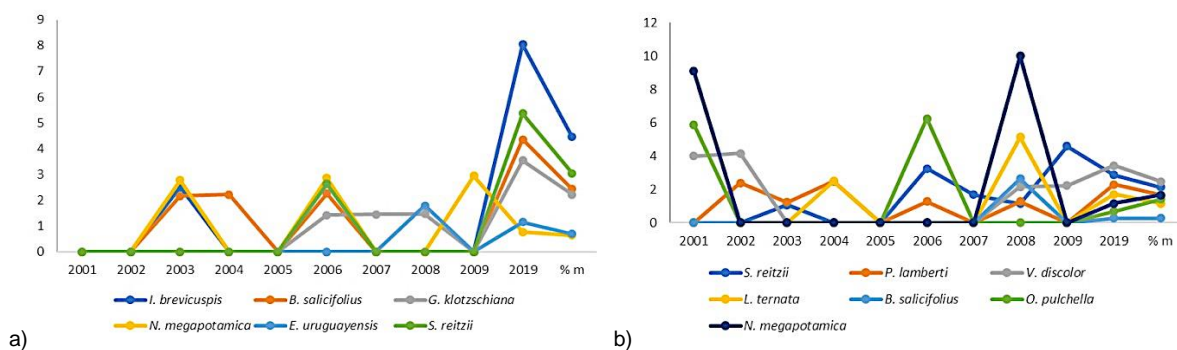
consideradas na porção oeste onde ocorrem condições de solo mais úmido, profundo e com menor pedregosidade, contribuindo para que exista também menor abertura de dossel e maior competição por espaço. Por outro lado, na área leste, as espécies *A. angustifolia*, *B. salicifolius* e *N. megapotamica* conseguem se estabelecer, mesmo que em menor número, em local com condições menos propícia ao seu desenvolvimento.

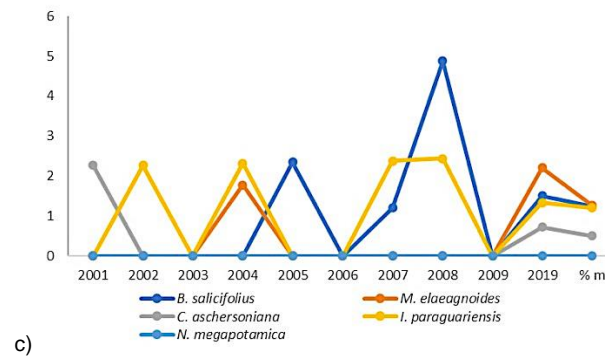
4.4 MORTALIDADE E SOBREVIVÊNCIA DAS ÁRVORES

A. angustifolia é a espécie dominante do dossel nos fragmentos amostrados, ocorre com maior densidade no estrato superior, apresentando a maior área de cobertura de copas da floresta que decrescem nos estratos médio e inferior. Na Parcela 1 as 13 araucárias correspondem a 2,6% da área basal, na Parcela 2 as 38 árvores da espécie constituem 11,5% da área basal da parcela já na Parcela 3, 96 árvores representam 56,1% da área basal. Assim, a araucária constitui-se como a principal competidora das espécies latifoliadas presentes nos estratos inferiores, restringindo o acesso aos recursos disponíveis, principalmente quanto à iluminação da copa e espaço para crescimento.

Os valores das taxas de mortalidade nas três áreas de estudo compreendendo um período de 20 anos, de 2000 a 2019 foram apresentados na Figura 19,

Figura 19 - Taxa de mortalidade para as espécies selecionadas com maior VI e interesse econômico na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, a) Parcela 1; b) Parcela 2 e c) Parcela 3





Em que: m % : representa a média da taxa de mortalidade considerando o período de 20 anos.
 Fonte: A autora (2022).

Desde a instalação do projeto PELD, 84 árvores das espécies em estudo foram registradas como mortas na parcela 1, em sua maioria pertencentes às espécies *Ilex brevicuspis* e *Siphoneugena reitzii*, as quais possuíam árvores em uma região específica da área amostral afetada pela queda de árvores de grande porte, seguida da formação de clareiras. Principalmente as árvores sobreviventes de *Ilex brevicuspis*, apresentavam copas bastante assimétricas, o que favorece a queda de árvores pela ação do vento. A espécie *Ilex brevicuspis* apresentou a maior taxa de mortalidade considerando o período de 2009 a 2019. No entanto, no período anterior (2000 a 2009) essas taxas foram nulas em diversas ocasiões. Nesta parcela a menor incidência de árvores mortas foi registrada para a espécie *Nectandra megapotamica*.

Na parcela 2, considerando apenas as espécies selecionadas para este trabalho, ocorreu a morte de 123 árvores em um hectare, no período de 20 anos. Neste local ocorreu aumento das taxas de mortalidade a partir do ano de 2006 para a maioria das espécies, especialmente para *Siphoneugena reitzii* e *Vernonanthura discolor*. A espécie *Podocarpus lambertii* apresentou regularidade na diminuição do número de árvores ao longo do período. As menores taxas de mortalidade foram encontradas para *Blepharocalyx salicifolius* e *Ocotea pulchella*.

A mortalidade das árvores de espécies heliófilas que estavam sob exposição solar adequada é, possivelmente, consequência da ação do estresse competitivo em que se encontravam no interior da floresta, da mesma forma que as espécies plásticas, como a *N. megapotamica* com taxa de mortalidade elevada, têm como causa da elevada mortalidade a competição imposta, e não o fator iluminação solar.

Analisando os dados obtidos nos inventários realizados nas 10 parcelas do

projeto PELD na FLONA – SFP entre os anos de 2000 e 2009, Ebling et al. (2014) registraram um total de 109 árvores mortas em 10 hectares, valor consideravelmente menor quando comparado as 123 árvores mortas da Parcela 2 (1 ha). A maior taxa de mortalidade encontrada pelos autores (2,6%) ocorreu no ano de 2006, ano em que ocorreram os valores mais elevados no presente trabalho. Taxas de mortalidade média semelhantes foram registradas por Cubas et al. (2016), em 5 anos de observação, de 26 ha, na Floresta Nacional de Três Barras, onde registraram a morte de 60 árvores/ha equivalente à taxa média de mortalidade anual de 2,14%.

Ao longo desses vinte anos considerados para a análise das taxas de mortalidade, na parcela 3 um total de 53 árvores foram registradas como mortas. A maior frequência de mortalidade aconteceu para as espécies *Blepharocalyx salicifolius*, com maior número de árvores mortas (18) e *Ilex paraguayensis* (9). No entanto, *M. elaeagnoides* apresentou maiores valores na taxa de mortalidade no período entre 2009 e 2019 (12 árvores), o que elevou o valor da taxa de mortalidade média.

De maneira geral as taxas aqui registradas aproximam-se das apresentadas por Cubas et al. (2016) em Floresta Ombrófila Mista e das registradas por Figueiredo Filho et al. (2010) em vários estudos sobre mortalidade e dinâmica da Floresta Ombrófila Mista, que registraram, taxas variando entre 1 e 2%. Valores mais elevados podem estar associados à baixa vitalidade e sanidade das árvores no sub-bosque da floresta, incidindo em árvores com copa rala e pouco desenvolvida, o que ao longo do tempo poderá causar a perda natural da posição de importância destas espécies na floresta, como foi frequentemente observado neste levantamento.

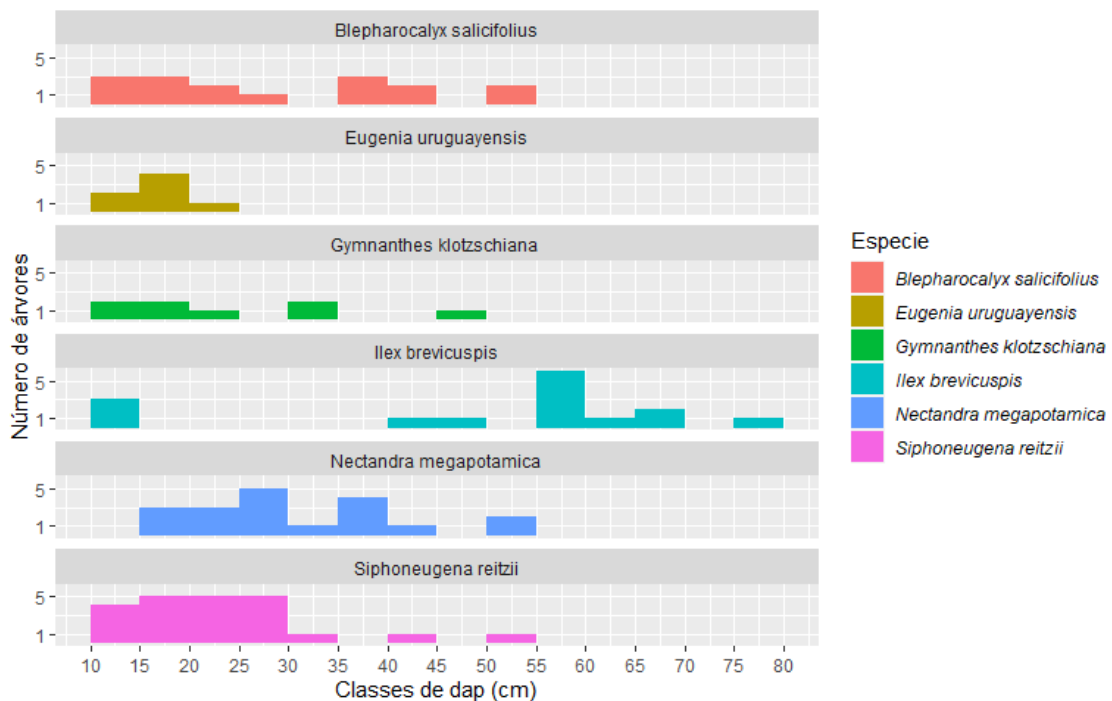
Na Figura 20 está representada a distribuição das árvores mortas nas distintas classes para a Parcela 1, onde a espécie *I. brevicuspis* apresentou maior mortalidade entre as árvores que ocupavam as maiores classes diamétricas. Quando a espécie foi observada na floresta, na maioria das ocasiões, ocupava o estrato superior do dossel onde encontra menor concorrência com outras árvores na disputa para desenvolvimento da copa. Por isso, relaciona-se a morte dessas árvores com a senilidade delas, devido às suas características dimensionais e posição sociológica.

As demais espécies apresentaram um maior número de árvores mortas nas classes menores, em especial a espécie *S. reitzii* cuja maior mortalidade ocorreu nas menores árvores. Esta ocorrência provem do fato do camboim ser espécie heliófila e estar submetida a baixa exposição de radiação, sem conseguir vencer a competição

existente e emergir as copas para uma posição mais favorável ao sua sobrevivência.

Além dessas condições, nesse ecossistema complexo muitos são os fatores que delimitam a estrutura, desenvolvimento e mortalidade das árvores, os quais são resultantes da competição por espaço, nutrientes e água, bem como da influência de insetos e doenças, intempéries, senilidade e outros fatores externos, que atuam simultaneamente sobre as plantas.

Figura 20 - Distribuição do número de árvores registradas como mortas por classes de diâmetro considerando todos os levantamentos realizados, para as espécies com maior índice de mortalidade na Parcela 1, São Francisco de Paula, RS, Brasil

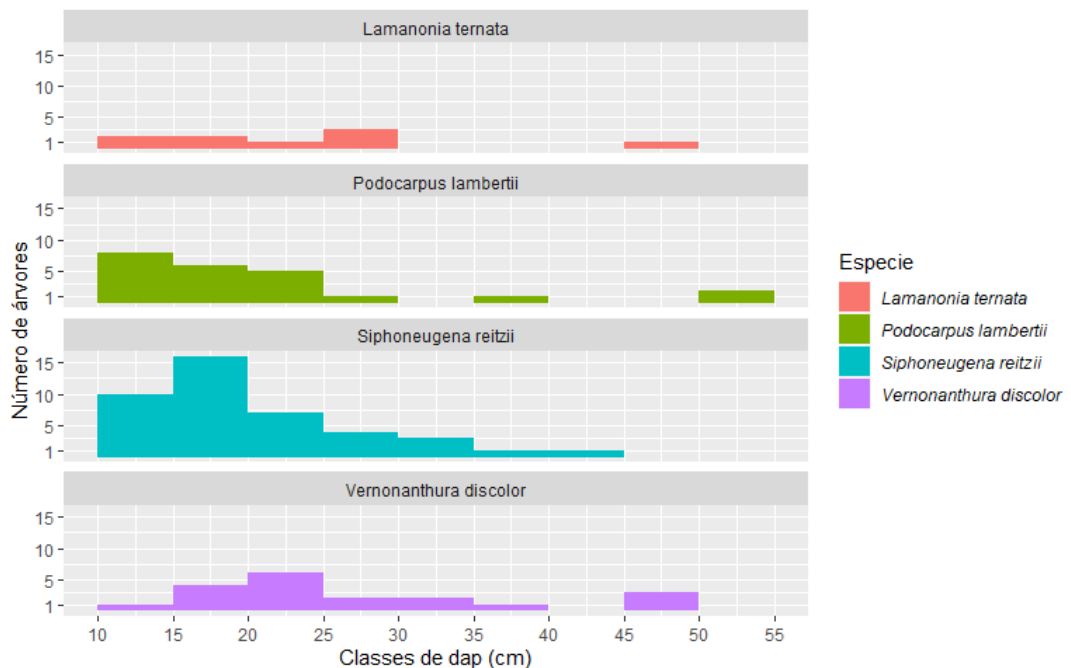


Fonte: A autora (2022).

As espécies *S. reitzii* e *P. lambertii* na Parcela 2, como pode ser observado na Figura 21, apresentaram maior mortalidade nas classes de menor diâmetro. As árvores dessas espécies na floresta eram na maioria de pequenas dimensões ocupando o estrato inferior do dossel sem espaço suficiente para crescer; assim, a capacidade de competir por recursos era menor e, conseqüentemente morrem em virtude da competição com árvores de maior dimensão, associados a outros fatores ambientais. A maior mortalidade nas menores classes de diâmetro também foi registrada por Rossi (2007) na tipologia Floresta Ombrófila Mista descrevendo-a como decorrente da competição. Para as outras espécies, a mortalidade aconteceu de

forma regular com menor variação entre as classes de diâmetro. O número de árvores mortas da espécie *B. salicifolius* em todo período, entre 2000 e 2019, foi de apenas duas árvores. As mesmas pertenciam à classe de diâmetro entre 10,1 e 15 cm. Houve o registro de morte de apenas quatro árvores da espécie *O. pulchella* as quais tinham diâmetros entre 12,5 a 22,0 cm. Da mesma forma, três árvores de *N. megapotamica* tiveram morte registradas em todos os levantamentos, neste caso, pertenciam às maiores classes de diâmetro (40,0 a 45,0 cm).

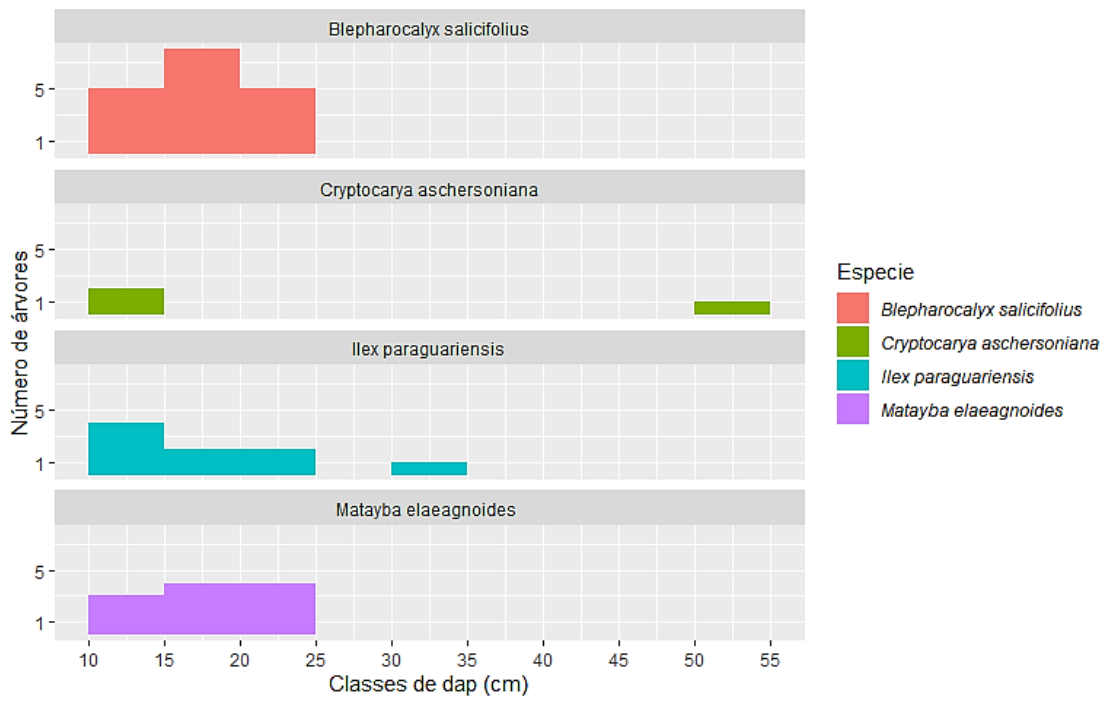
Figura 21 - Distribuição do número de árvores registradas como mortas por classes de diâmetro considerando todos os levantamentos realizados, para as espécies com maior índice de mortalidade na Parcela 2, São Francisco de Paula, RS, Brasil



Fonte: A autora (2022).

As árvores mortas na Parcela 3 em maioria pertenciam às classes de menor diâmetro, quase não ocorrendo morte das árvores de maiores dimensões (Figura 22) Para a espécie *C. aschersoniana* foi registrada a morte de quatro árvores, entre estas, apenas uma apresentava diâmetro maior que 50 cm, e as demais pertenciam a classe entre 10 e 15 cm. Na área não houve registros da morte de árvores de *N. megapotamica*.

Figura 22 - Distribuição do número de árvores registadas como mortas por classes de diâmetro considerando todos os levantamentos realizados, para as espécies com maior índice de mortalidade na Parcela 3, São Francisco de Paula, RS, Brasil



Fonte: A autora (2022).

É importante comentar que nesta parcela encontravam-se o maior número de araucárias cujos d variavam de 15,4 a 98,7 cm, sendo perceptível a dominância dessa espécie, e ao mesmo tempo a ausência de regenerantes tanto de araucária quanto das demais espécies.

Condições mínimas para o suporte da vida variam para os seres vivos as quais são supridas no sítio, como a necessidade por luz, nutrientes e espaço físico, e qualquer redução abaixo das necessidades mínimas pode levar a árvore à morte (VANCLAY, 1983). Assim, a sobrevivência da árvore depende da sua habilidade para competir em seu ambiente com as árvores vizinhas e as numerosas influências presentes, que juntas formam um nicho único para essa árvore.

Para tanto, a dinâmica da mortalidade é essencial por tratar-se da capacidade de sobrevivência das espécies e, conseqüentemente da floresta, além de propiciar melhor compreensão dos processos naturais de sucessão.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DA COPA E ÍNDICES MORFOMÉTRICOS

Ilex brevicuspis e *Matayba elaeagnoides* foram as espécies que apresentaram

as maiores médias para diâmetro de copa (dc), enquanto *Siphoneugena reitzii* e *Podocarpus lambertii* as menores médias (Tabela 8). Os valores de dc indicaram a dimensão do espaço lateral disponível para o crescimento e desenvolvimento das árvores, podendo sugerir a posição das mesmas no dossel da floresta, bem como, permitiram avaliar a capacidade de competir por maior área de iluminação da copa., visto a dimensão e distância das árvores vizinhas terem sido medidas.

Para comprimento de copa (cc), *Siphoneugena reitzii* é a espécie com maior valor médio, desta forma, as árvores dessa espécie possuem copas com diâmetros pequenos, porém com comprimento maior, já *Eugenia uruguayensis* apresentou cc menores, indicando a ocorrência de auto desrama.

Tabela 8 – Valores de amplitude e média dos parâmetros morfométricos por espécie, nas três parcelas alocadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil

<i>Blepharocalyx salicifolius</i> (50 árvores)				<i>Ilex brevicuspis</i> (22 árvores)			
Variáveis	Mínimo	Médio	Máximo	Variáveis	Mínimo	Médio	Máximo
dc (m)	1,45	17,20	51,45	Dc (m)	1,82	20,0	39,10
cc(m)	1,00	4,24	11,0	Cc(m)	1,0	3,78	7,0
pc%	11,11	31,07	72,72	Pc%	6,25	21,05	33,33
ap(m ²)	1,65	80,69	396,72	ap(m ²)	5,73	62,82	122,84
Fc(m)	0,26	3,7	9,62	Fc(m)	0,45	5,64	14,20
GE	0,33	0,72	1,36	GE	0,23	0,41	0,81
IS	0,07	0,70	2,97	IS	0,12	0,40	0,85
IA	0,10	1,01	3,28	IA	0,14	1,09	2,17
<i>Nectandra megapotamica</i> (32 árvores)				<i>Sebastiania commersoniana</i> (39 árvores)			
Variáveis	Mínimo	Médio	Máximo	Variáveis	Mínimo	Médio	Máximo
cc (m)	4,42	12,0	29,97	Dc (m)	1,85	13,90	39,65
cc(m)	1,30	4,45	9,50	Cc(m)	1,10	3,15	6,5
pc%	8,23	27,43	50,27	Pc%	6,83	20,48	39,39
ap(m ²)	13,90	57,39	195,45	ap(m ²)	5,81	43,67	124,56
Fc(m)	0,87	3,14	7,31	Fc(m)	0,69	5,01	35,31
GE	0,24	0,49	0,95	GE	0,26	0,58	1,22
IS	0,11	0,35	0,88	IS	0,08	0,47	0,98
IA	0,26	0,74	1,74	IA	0,17	0,87	2,41
<i>Eugenia uruguayensis</i> (30 árvores)				<i>Siphoneugena reitzii</i> (81 árvores)			
Variáveis	Mínimo	Médio	Máximo	Variáveis	Mínimo	Médio	Máximo

dc (m)	3,02	11,45	27,65	Dc (m)	2,20	4,80	8,25
cc(m)	1,20	2,71	5,00	Cc(m)	1,20	4,98	15,00
pc%	9,09	19,08	30,38	Pc%	14,12	24,47	65,00
ap(m ²)	9,50	35,99	86,86	ap(m ²)	3,80	21,00	53,45
fc(m)	1,74	4,27	8,36	Fc(m)	0,35	1,23	2,62
GE	0,43	0,72	1,03	GE	0,33	0,77	1,48
IS	0,21	0,55	1,27	IS	0,13	0,24	0,47
IA	0,26	0,79	1,58	IA	0,17	0,34	0,62
<i>Podocarpus lambertii</i> (39 árvores)				<i>Vernonia discolor</i> (22 árvores)			
Variáveis	Mínimo	Médio	Máximo	Variáveis	Mínimo	Médio	Máximo
dc (m)	1,50	7,60	21,25	Dc (m)	3,90	9,74	22,30
cc(m)	1,40	4,18	9,30	Cc(m)	0,70	4,71	8,7
pc%	9,86	27,91	65,87	Pc%	4,19	27,48	49,68
ap(m ²)	1,77	65,50	354	ap(m ²)	11,94	93,23	390,57
fc(m)	0,39	2,14	8,70	Fc(m)	0,64	2,65	7,78
GE	0,21	0,60	1,05	GE	0,28	0,45	0,69
IS	0,08	0,26	0,65	IS	0,09	0,25	0,55
IA	0,12	0,51	1,40	IA	0,25	0,57	1,24
<i>Lamanonia ternata</i> (23 árvores)				<i>Ocotea pulchella</i> (10 árvores)			
Variáveis	Mínimo	Médio	Máximo	Variáveis	Mínimo	Médio	Máximo
dc (m)	1,37	7,04	14,22	Dc (m)	2,62	14,62	38,70
cc(m)	1,30	3,76	12,00	Cc(m)	2,20	4,43	11,50
pc%	9,61	25,32	74,53	Pc%	12,79	26,24	59,58
ap(m ²)	1,48	35,10	158,92	ap(m ²)	5,41	69,78	255,88
fc(m)	0,28	2,42	6,18	Fc(m)	0,77	3,70	8,77
GE	0,20	0,60	1,17	GE	0,26	0,19	1,06
IS	0,04	0,25	0,45	IS	0,06	0,36	1,00
IA	0,11	0,48	1,07	IA	0,18	0,83	1,96
<i>Matayba elaeagnoides</i> (29 árvores)				<i>Ilex paraguariensis</i> (28 árvores)			
Variáveis	Mínimo	Médio	Máximo	Variáveis	Mínimo	Médio	Máximo
dc (m)	3,75	17,54	44,32	Dc (m)	2,50	7,69	31,37
cc(m)	2,0	4,56	9,0	Cc(m)	1,5	4,43	9,80
pc%	13,33	30,11	56,25	Pc%	8,24	13,84	58,33
ap(m ²)	11,78	55,12	139,25	ap(m ²)	7,85	24,15	98,56
fc(m)	0,84	4,04	11,89	Fc(m)	0,36	2,10	10,46
GE	0,39	0,74	1,09	GE	0,46	0,82	1,29

IS	0,21	0,77	1,50	IS	0,11	0,42	1,22
IA	0,28	1,11	2,60	IA	0,21	0,51	1,57
<i>Cryptocaria aschersoniana</i> (28 árvores)							
Variáveis	Mínimo	Médio	Máximo				
dc (m)	2,85	7,19	23,25				
cc(m)	1,00	3,96	8,30				
pc%	7,69	27,08	56,08				
ap(m ²)	8,87	22,58	73,04				
fc(m)	0,70	2,08	5,96				
GE	0,48	0,88	1,17				
IS	0,20	0,40	1,10				
IA	0,22	0,47	1,41				

Em que: Dc (m): diâmetro de copa; Cc(m): comprimento de copa; Pc%: porcentagem de copa; Ap(m²): área de projeção da copa; Fc(m): Formal de copa; GE: Grau de esbeltez; IS: índice de saliência; IA: índice de abrangência.

Fonte: A autora (2020).

As porcentagens médias de copa variaram de 13,84 a 31,07 indicando a existência de copas curtas que alcançaram no máximo o equivalente a 1/3 da altura da árvore. O IA, variou entre 0,47 e 1,11, indicando copas com tendência de ocupar mais espaço lateral e invariavelmente apresentavam poucos galhos e folhas, se comparadas a copas com boa iluminação. O Índice de Saliência variou de 0,24 a 0,77 indicando a existência de copas relativamente mais estreitas que o diâmetro alcançado.

A porcentagem de copa é um indicador de vitalidade, e quanto maior a porcentagem, tanto mais produtivo poderá ser a árvore (IVANOV,2011). Entre as espécies estudadas nesse trabalho *Matayba elaeagnoides* possui árvores que, em média, têm maior porcentagem de copa, e as árvores com menor pc foram as da espécie *Lamanonia ternata*. A dinâmica de crescimento está diretamente relacionada ao espaço ocupado pela árvore que é representado pelos valores da área de projeção da copa, nesse sentido, as árvores de *Vernonia discolor* tiveram maiores áreas de projeção da copa e assim ocupam mais espaço dentro da floresta. Por outro lado, *Siphoneugena reitzii* foi a espécie com menor ap e, conseqüentemente com menor espaço de crescimento. Para Silva et al. (2017) valores de formal de copa inferiores a 1 caracterizam copas esbeltas e valores acima de 1 indicam copas

achatadas. Dessa forma as árvores da espécie *Siphoneugena reitzii* tendem a ser mais esbeltas, onde o cc tem maior desenvolvimento do que o dc, e as *Ilex brevicuspis* possuem árvores com maior diâmetro de copa e de formato achatado.

O grau de esbeltez é um indicador de estabilidade das árvores, quanto menores os valores, maiores será a dimensão do diâmetro em relação à altura, sendo este um fator positivo para a estabilidade das mesmas, pois, de acordo com Boschetti et al. (2015), quando o fuste é muito alto e diâmetro pequeno resulta em maior instabilidade. As árvores da espécie *Ocotea pulchella* apresentam maior estabilidade perante as demais, pois possuíam a menor média para h/d, já os maiores valores foram encontrados nas árvores de *Cryptocaria aschersoniana*, representando maior relação entre diâmetro a altura do peito e altura.

O índice de saliência revelou quantas vezes o diâmetro de copa é maior que o diâmetro a altura do peito. O IS permite manejar um povoamento a partir do diâmetro das árvores; além disso, a medida em que as árvores forem crescendo esse índice pode ser usado como indicador de desbaste (DURLO e DENARDI, 1998). Menores valores do índice de saliência indicam que a árvore ocupa mais eficientemente o espaço, considerando para isto uma dada área de projeção de copa (STERBA, 1992). Nas espécies estudadas essa situação é observada principalmente para *Siphoneugena reitzii* que possui menor média de IS. Já o índice de abrangência, dado pela relação entre o diâmetro da copa e altura total das árvores, em plantios florestais, onde o manejo é baseado na h das árvores, o IA é critério para tomada de decisão no plano de desbaste, pois com o aumento da h, surge a necessidade de mais espaço entre árvores para que ocorra o crescimento em diâmetro. Assim, o IA permite inferir sobre o número de árvores que caberiam em determinada área, proporcionando espaço suficiente para o desenvolvimento delas, desde que, haja correlação entre as duas variáveis.

A morfometria da copa se modifica conforme o cenário em que a árvore se encontra, principalmente em relação ao espaço ocupado, por isso, a grande amplitude observada nas populações estudadas está associada às dimensões das árvores e ao grau de competição em que se encontravam. De forma geral, os índices descritores da copa conseguiram descrever a morfometria permitindo avaliar o ambiente ocupado pelas espécies no interior da floresta, as quais, em quase a totalidade, ocupavam a parte inferior do dossel.

Os maiores valores de proporção de copa socorreram para árvores dominantes, enquanto a pc% das codominantes apresentou maior oscilação, estando associada à concorrência e suas respectivas dimensões, esses fatores exercem efeito também no formal de copa, em que árvores dominadas possuem os maiores valores devido os efeitos da competição. As árvores dominantes apresentaram menores valores de graude esbeltez em decorrência das maiores dimensões do diâmetro em relação a altura. Ao avaliar o espaço requerido pelas árvores com o aumento da altura a partir da variável IA, nota-se que as árvores do estrato superior detêm os maiores valores desta variável demonstrando que o crescimento da altura acompanha o diâmetro.

4.6 COMPETIÇÃO EXISTENTE ENTRE ÁRVORES

Todos os índices de competição calculados para cada uma das treze espécies foram caracterizados na Tabela 9.

Tabela 9 - Descrição dos Índices de Competição calculados para as espécies selecionadas nas parcelas alocadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil

Descrição	IC1	IC2	IC3	IC4	IC5	IC6	IC7	IC8	IC9	IC10	IC11	IC12	IC13
<i>B. salicifolius</i>													
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	0,6	8,9	3,1	1,4	1,3	1,9	520,3	41,8	0,3	1,5	1,9	2,6	0,7
Mediana	0,3	4,0	2,4	1,2	0,6	1,5	295,6	21,3	0,3	1,6	0,6	2,5	0,5
Máximo	5,5	67,5	13,6	4,8	8,5	7,6	4843,3	403,4	1,2	4,0	15,3	7,5	2,7
CV%	164,8	137,6	87,5	83,3	151,3	88,1	132,7	158,1	80,3	64,6	166,7	64,4	88,5
<i>N. megapotamica</i>													
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	0,8	10,5	3,7	1,1	0,9	1,9	522,2	36,5	0,4	1,8	3,1	3,0	0,7
Mediana	0,3	5,8	3,1	1,1	0,4	1,7	258,4	20,5	0,3	1,6	1,1	3,3	0,6
Máximo	6,8	85,6	12,9	3,8	6,0	7,4	3920,0	499,7	1,3	4,0	46,8	5,8	2,5
CV%	0,8	10,5	3,7	1,1	0,9	1,9	522,2	36,5	0,4	1,8	3,1	3,0	0,7
<i>S. reitzii</i>													
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	0,5	8,4	3,4	1,5	1,5	2,0	350,8	28,8	0,3	2,0	2,5	3,1	0,8
Mediana	0,3	4,5	3,1	1,4	1,0	1,9	112,0	22,3	0,2	1,9	1,0	3,1	0,8
Máximo	1,8	68,8	13,7	4,6	13,4	12,7	4544,6	133,5	1,0	5,8	18,0	9,5	2,3
CV%	0,9	1,5	0,8	0,7	1,4	0,9	1,9	0,9	0,9	0,7	1,4	0,7	0,7
<i>O. pulchella</i>													
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	0,8	7,8	3,4	1,4	1,6	2,0	775,1	40,7	0,4	2,5	5,9	3,0	0,7

Mediana	0,4	3,3	2,7	1,1	0,8	1,5	233,5	30,2	0,4	1,8	1,0	2,8	0,6
Máximo	3,6	30,5	10,1	3,2	9,1	6,9	5056,7	151,0	1,2	11,5	55,5	7,4	2,1
CV%	1,2	1,3	0,8	0,7	1,4	1,0	1,8	1,0	0,7	1,0	2,2	0,7	0,8
<i>P. lambertii</i>													
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	0,8	5,8	3,2	1,4	1,3	1,7	358,6	30,1	0,3	2,5	6,8	3,6	0,8
Mediana	0,6	3,4	2,8	1,0	0,8	1,5	167,1	19,8	0,2	1,8	1,8	3,1	0,6
Máximo	4,5	23,0	8,9	4,8	17,3	6,8	1854,3	251,6	1,5	9,5	64,6	16,7	3,2
CV%	1,1	1,0	0,7	0,8	2,0	0,8	1,2	1,3	1,0	0,9	1,8	0,8	0,9
<i>L. ternata</i>													
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	0,8	8,0	3,3	1,5	1,1	1,8	312,1	26,2	0,3	2,1	4,5	3,7	0,8
Mediana	0,5	3,6	3,0	1,3	0,7	1,5	163,1	25,0	0,3	2,0	1,1	3,1	0,8
Máximo	4,4	52,7	13,2	3,3	3,4	6,2	1996,4	135,8	0,9	5,6	31,8	16,4	1,9
CV%	1,2	1,4	0,8	0,6	0,9	0,7	1,4	1,0	0,8	0,6	1,8	0,8	0,6
<i>I. brevicuspis</i>													
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	1,7	2,2	1,4	1,0	0,6	0,8	431,8	22,7	0,2	1,4	4,5	1,7	0,4
Mediana	0,9	1,1	1,1	0,9	0,3	0,6	31,2	16,3	0,2	1,0	1,4	1,6	0,3
Máximo	8,7	15,4	4,5	3,9	3,0	3,1	2409,0	106,6	0,7	3,9	42,5	3,3	1,5
CV%	1,3	1,6	0,8	0,9	1,4	0,9	1,7	1,2	0,8	0,6	2,0	0,6	0,9
<i>G. klotzschiana</i>													
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	0,5	5,7	2,3	1,2	0,8	1,3	236,9	17,1	0,2	1,2	1,3	2,0	0,5
Mediana	0,2	1,8	1,6	1,0	0,5	0,8	40,5	9,4	0,2	1,0	0,6	1,9	0,4
Máximo	3,3	54,5	11,5	3,8	4,1	6,3	1603,3	68,2	0,8	2,9	5,8	6,0	1,7
CV%	1,4	1,8	1,1	0,9	1,4	1,2	1,6	1,1	0,9	0,8	1,2	0,8	1,0
<i>E. uruguayensis</i>													
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	0,4	13,3	4,5	2,0	2,6	2,8	684,1	53,8	0,3	1,7	1,4	3,4	1,0
Mediana	0,2	9,4	4,4	2,1	1,8	2,9	606,8	36,2	0,3	1,6	0,5	3,4	1,0
Máximo	3,1	35,0	9,5	3,6	15,3	5,6	2405,0	396,3	0,8	3,9	6,8	6,6	2,6
CV%	1,7	0,9	0,7	0,5	1,3	0,6	0,9	1,5	0,7	0,6	1,2	0,5	0,6
<i>V. discolor</i>													
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	0,7	3,8	2,3	1,3	0,4	0,9	211,0	15,6	0,4	1,9	3,1	2,5	0,4
Mediana	0,6	2,9	2,8	1,1	0,3	0,9	184,4	14,0	0,4	1,9	1,0	2,1	0,3
Máximo	2,0	9,2	3,9	3,0	0,9	1,8	893,4	40,2	0,9	5,2	17,6	11,8	1,5
CV%	0,8	0,8	0,5	0,6	0,6	0,5	1,1	0,6	0,7	0,7	1,4	1,0	0,9
<i>M. elaeagnoides</i>													
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	0,3	13,3	3,7	1,1	1,4	2,3	554,6	39,0	0,3	1,6	1,5	3,2	0,8

Mediana	0,1	6,6	3,9	0,8	0,4	2,0	428,5	27,5	0,3	1,5	0,4	3,6	0,8
Máximo	1,4	62,2	12,9	3,9	11,8	5,9	1726,7	255,6	1,0	4,2	7,8	7,0	2,0
CV%	1,2	1,3	0,8	1,0	2,1	0,7	1,0	1,3	0,8	0,6	1,5	0,5	0,7
<i>C. aschersoniana</i>													
Mínimo	0,0	1,2	1,3	0,2	0,0	0,8	2,8	6,0	0,0	0,6	0,0	1,5	0,2
Média	0,3	22,3	5,7	1,6	0,8	3,3	876,9	38,1	0,4	1,7	1,3	3,9	0,9
Mediana	0,1	14,1	4,8	1,3	0,3	3,3	652,8	30,7	0,4	1,6	0,6	3,8	0,9
Máximo	1,7	76,8	15,5	4,4	6,0	9,2	2968,8	181,5	1,1	3,2	6,4	7,8	2,3
CV%	1,4	0,9	0,6	0,8	1,4	0,6	0,9	0,9	0,6	0,4	1,3	0,4	0,5
<i>I. paraguariensis</i>													
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	0,3	17,5	4,8	1,4	0,7	2,8	892,2	34,0	0,4	1,7	1,3	4,0	0,9
Mediana	0,1	14,7	4,7	0,8	0,5	3,1	579,9	29,5	0,4	1,7	1,0	3,7	0,9
Máximo	1,4	72,2	14,3	5,3	3,2	6,7	3306,4	95,0	1,1	3,5	8,0	8,8	2,3
CV%	1,2	1,0	0,7	1,0	1,0	0,6	0,9	0,6	0,7	0,5	1,5	0,5	0,5

Fonte: A autora (2022).

Os valores calculados e estabelecidos para cada índice de competição demonstram suas respectivas definições e comportamentos frente às características das árvores amostradas, em especial pode-se destacar o índice BAL (IC9) que apresenta uma diminuição no valor do coeficiente de competição conforme a competição imposta à árvore objetivo é menor. Assim, valor de coeficiente próximo ao mínimo indica que as competidoras possuem diâmetro menor que a árvore objetivo. A presença de árvores competidoras de maior diâmetro que a objetivo maior é o índice de competição BAL.

Castro et al. (2014) explicam o comportamento encontrado em IC2, como sendo uma situação relacionada com a própria fórmula dos índices, de forma que árvores com menores diâmetros apresentam maiores valores no referido índice, evidenciando assim que a ocorrência da competição está relacionada, não somente ao número de árvores competidoras, mas também com a dimensão delas, o que consequentemente induz à ação de outros fatores inerentes às florestas naturais, principalmente com relação a coexistência de espécies, condicionando todo o processo de desenvolvimento e crescimento das árvores. Essas relações da competição com as características da árvore competidora também foram relatadas por Schons et al. (2020), onde observaram o mesmo comportamento dos índices citados ao avaliarem a competição entre espécies da FOM na Floresta Nacional de Irati-PR.

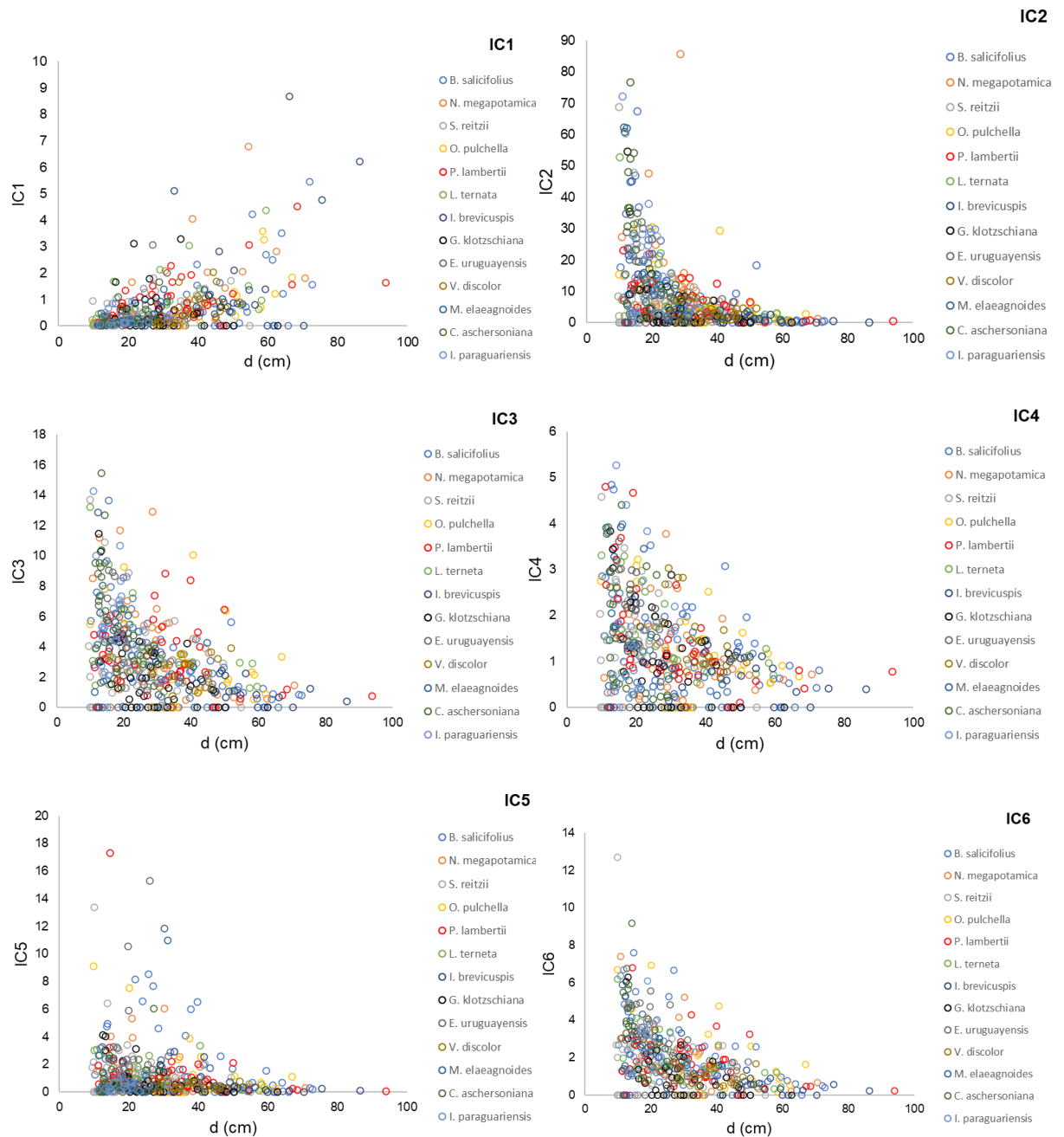
O inverso ocorre com os índices IC1, IC10 e IC11 em sua essência, pois apresentam um comportamento contrário, indicando uma maior competição imposta a árvores que possuem um coeficiente de menor valor, mostrando dessa forma que competidoras de maior dimensão fazem com que os valores desses coeficientes sejam menores. Fato também explicado pela fórmula, em que estes índices são derivados da razão entre uma variável dendrométrica da árvore objetivo em relação à mesma variável das dimensões de suas vizinhas. Isto quer dizer que, árvores objetivo que apresentem suas variáveis dendrométricas inferiores à de suas vizinhas, apresentarão menores índices (VATRAZ, et al, 2018)

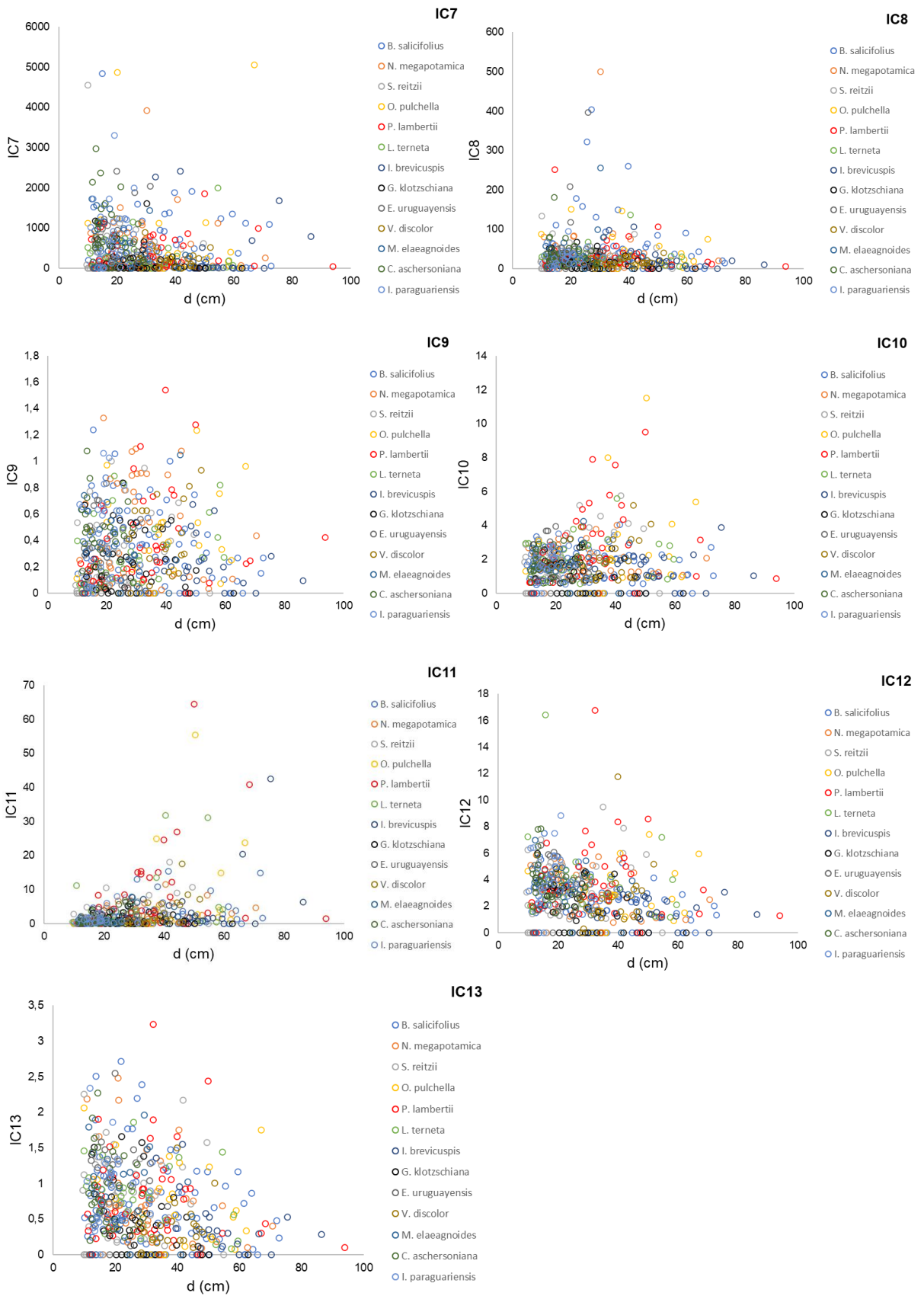
Observando os valores dos índices para todas as espécies descritos na tabela, nota-se que apenas *C. aschersoniana* não atingiu o valor mínimo zero de alguns coeficientes que demonstram menor valor quando ocorre menor competição, como por exemplo o IC2, mostrando que a maioria das árvores dessa espécie encontram-se submetidas à competição com árvores de maior dimensão. Neste caso trata-se de uma espécie que ocorre na Parcela 3, em local onde há maior densidade de araucárias de grandes dimensões, e as árvores de *C. aschersoniana* encontram dificuldade de acesso aos recursos do ambiente.

As demais espécies atingiram valor mínimo zero, e, neste caso, estaria representando a ausência de competição unilateral, demonstrando que pelo menos uma das árvores dessas espécies, possui o maior diâmetro da comunidade florestal, o que não ocorre para *C. aschersoniana*. Para os índices de comportamento análogo, a não ocorrência de competição unilateral é representada pelo valor máximo dos coeficientes, e coerentemente observa-se o mesmo comportamento para *C. aschersoniana* e demais espécies.

Para a maior parte das espécies, a competição em que as árvores estão submetidas foi menor para as árvores de maior diâmetro; como o esperado. No entanto, é importante salientar a grande variação existente entre os valores dos 13 índices de competição em todas as classes de diâmetro nas diferentes espécies, demonstrando os diferentes cenários da competição existente dentro da floresta, essas variações estão ligadas aos distintos comportamentos que os índices expressam ao representar a competição natural, conforme pode ser observado na dispersão dos índices de competição ao serem confrontados com o diâmetro das árvores (Figura 23).

Figura 23. Dispersão dos índices de competição calculados para as 13 espécies em relação ao diâmetro a altura do peito das árvores na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil





Fonte: A autora (2022).

Essa elevada heterogeneidade demonstrada na dispersão dos índices torna complexa a compreensão da ocorrência da competição nas diferentes classes de diâmetro, por outro lado, expressa a realidade encontrada no interior da floresta. Entre os diferentes índices de competição calculados, o IC2 apresenta uma distribuição mais adequada à realidade e permite dizer que as árvores maiores e dominantes dos estratos superiores dos maciços florestais, enfrentam menor competição, e dessa forma, a maior competição recai sobre as árvores localizadas no sub-bosque. Como já detectado por Cunha (2009), essa relação fica visível principalmente para as árvores mais finas das espécies *S. reitzii*, *C. aschersoniana* e *G. klotzschiana* que sofrem maior competição, ocorrendo da mesma forma para as árvores finas de *L. ternata*. Esta espécie, porém, possui árvores nas classes de maior diâmetro enfrentando menor competição. Já as espécies mais favorecidas são *P. lambertii* e *B. salicifolius*, pois mesmo suas árvores das menores classes apresentam menores índices de competição.

Castro et al (2014) explicam que as árvores de dimensões menores pertencentes ao sub-bosque, estão sujeitas a maior competição e menores taxas de crescimento em diâmetro, estando dessa forma mais suscetíveis a mortalidade, visto que as melhores condições de iluminação da copa estão disponibilizadas às árvores do estrato superior fazendo com que estas apresentem menor competição.

Os comportamentos observados se aproximam da competição natural observada na floresta, e assim entende-se que, sob diferentes níveis de competição, respostas diferentes ocorrem na variação da dimensão das árvores em maior e menor proporção, tanto nas variáveis biométricas quanto de morfometria. Zhao et al. (2004), mostraram em seu estudo que os efeitos da competição no crescimento são de difícil detecção em florestas naturais ricas em espécies, o que corrobora com a complexidade no entendimento da influência da competição na dimensão das árvores observadas neste estudo.

Em contrapartida, Foli et al. (2003) salientam que o uso de índices de competição para a modelagem da dimensão de árvores individuais e o crescimento em florestas nativas deve ser considerado. Os resultados encontrados por Lisboa (2014) ao avaliar a influência da competição no incremento das araucárias de um fragmento de FOM no Paraná, mostram que a competição ajuda a prever o incremento em área basal e realça a necessidade de considerar a competição em

modelos de crescimento de árvores individuais. Assim, a inclusão de índices de competição em equações que visem descrever a variação diamétrica das espécies, em nível de árvore individual em florestas inequidâneas, torna-se um subsídio importante. No entanto, não é possível mensurar a competição de forma direta, busca-se então expressar o estresse competitivo que cada árvore está sujeita, contribuindo, por sua vez, para projeções da dimensão e crescimento das árvores.

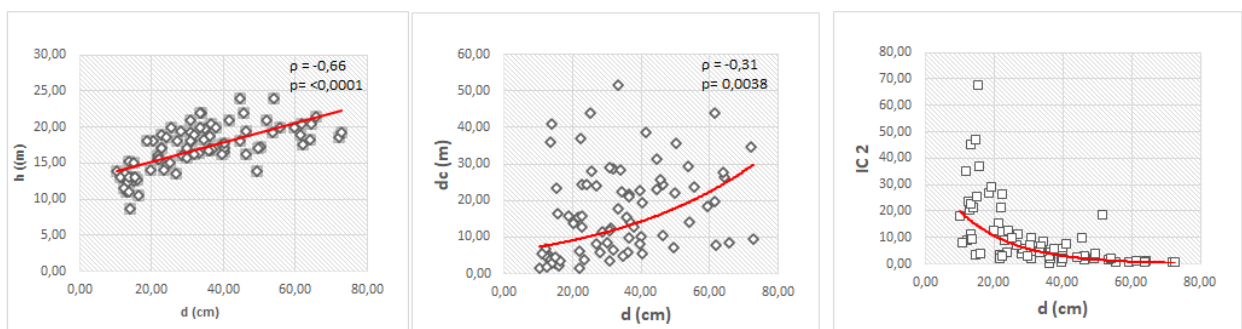
4.7 MODELAGEM DO DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO

4.7.1 Correlação e determinação das variáveis predictoras

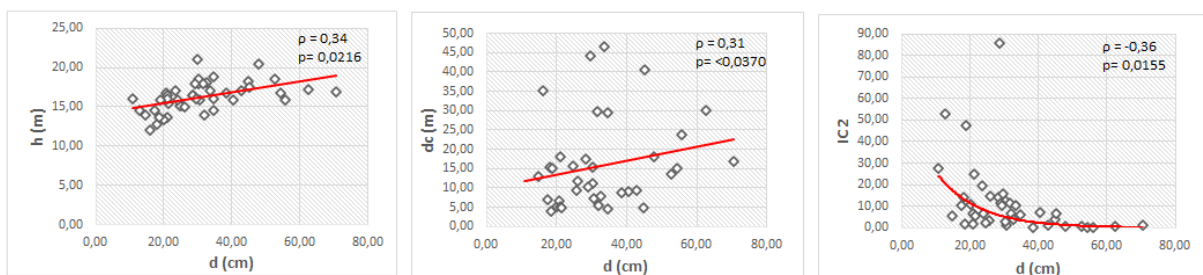
Com a análise de correlação de Pearson foi avaliado o grau de associação entre a variável dependente diâmetro a altura do peito (d) e as variáveis independentes, tornando possível a inserção de variáveis de tamanho, vigor e competição atual nos modelos de algumas das espécies. Assim, houve variação quanto ao arranjo de variáveis predictoras em cada espécie, o qual é descrito na Figura 24, onde há informações quanto o grau de correlação entre as variáveis, bem como, quanto a dispersão delas em relação ao diâmetro.

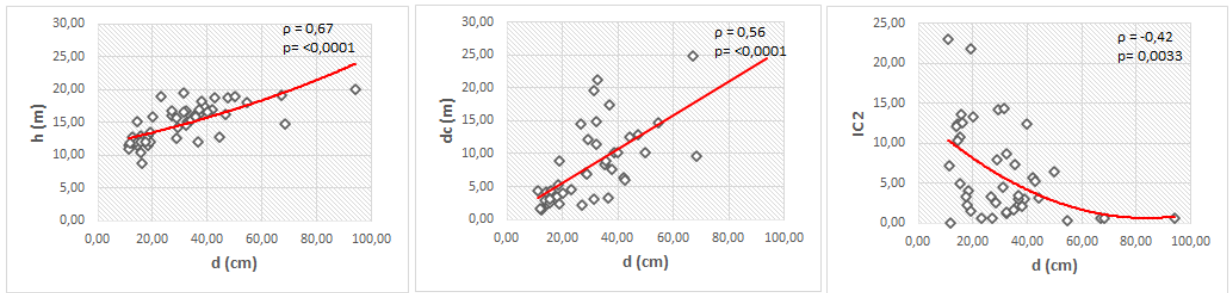
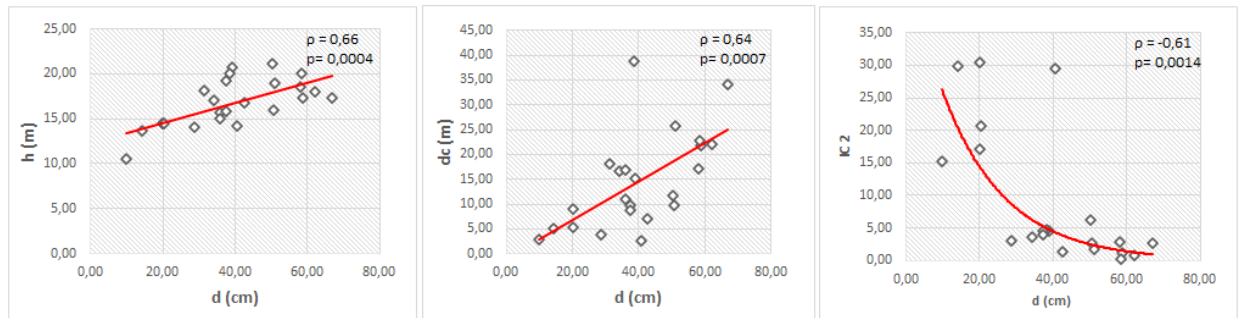
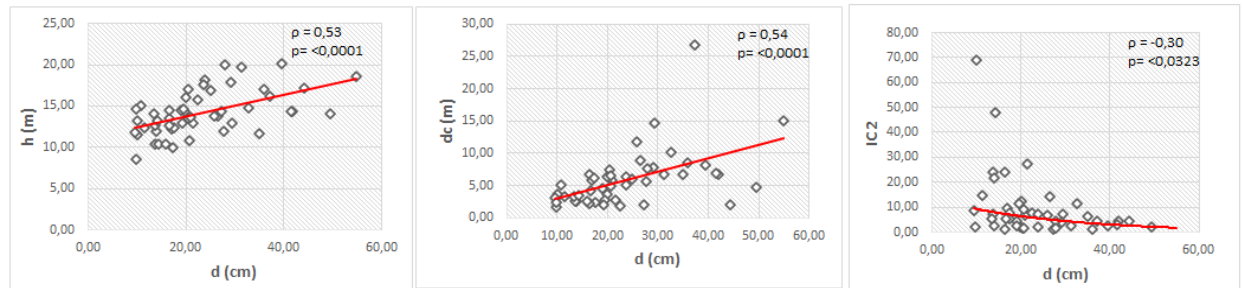
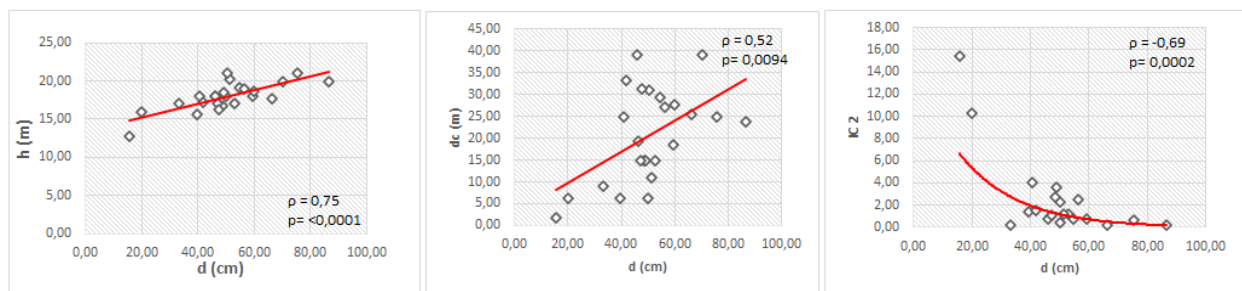
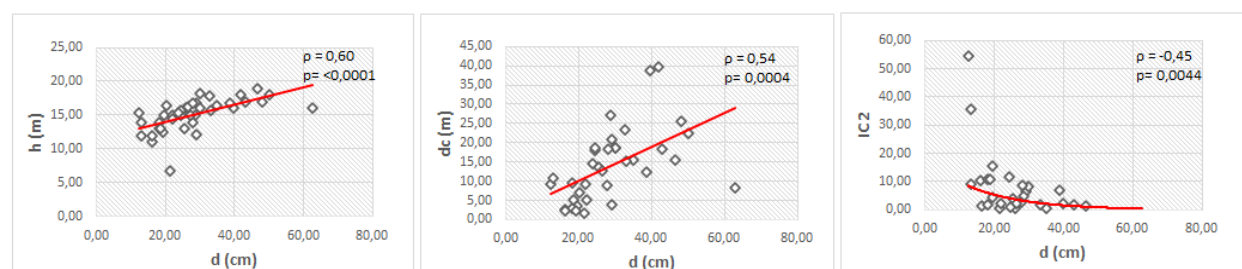
Figura 24 - Correlação de Pearson e dispersão de d em função das variáveis consideradas inicialmente predictoras para cada espécie em estudo na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil

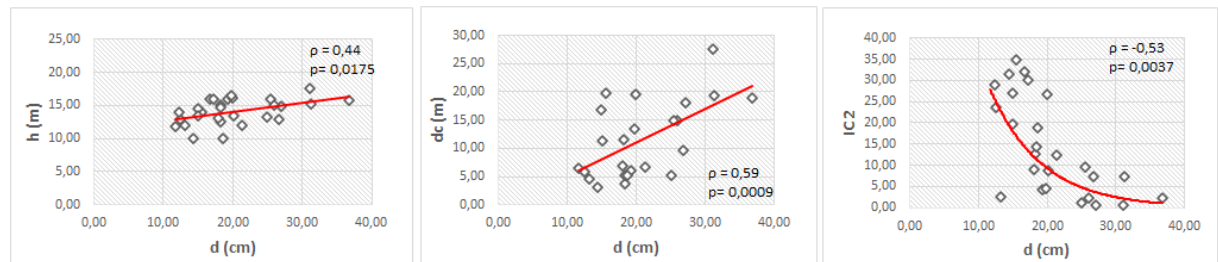
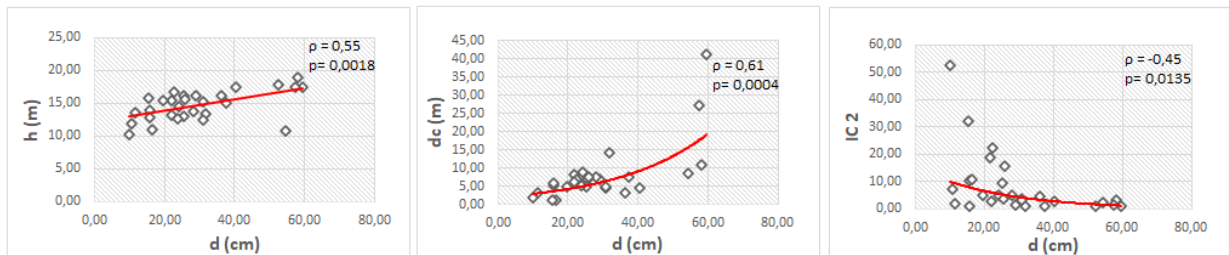
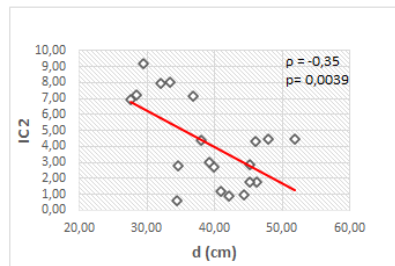
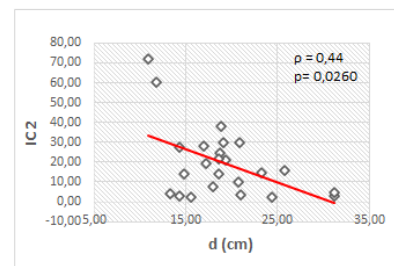
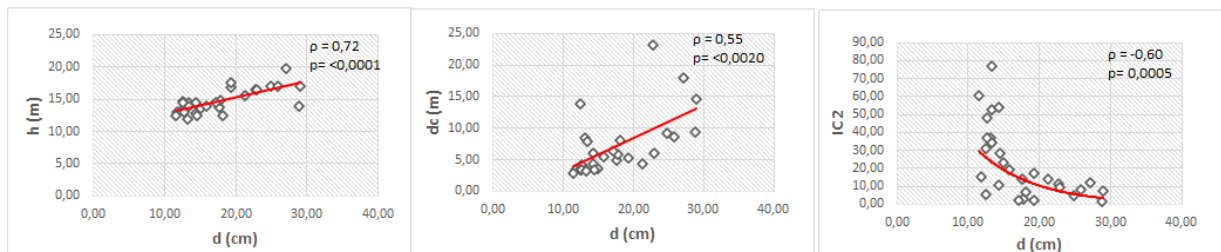
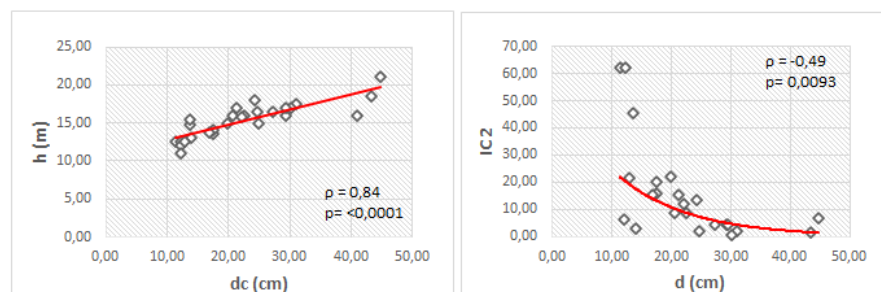
Blepharocalyx salicifolius



Nectandra megapotamica



Podocarpus lambertii*Ocotea pulchella**Siphoneugena reitzii**Ilex brevicuspis**Gyneranthes Klotzschiana*

Eugenia uruguayensis*Lamanonia temata**Vernonia discolor**Ilex paraguariensis**Cryptocarya aschersoniana**Matayba elaeagnoides*

Fonte: A autora (2022).

Com exceção de *E. uruguayensis*, *V. discolor* e *I. paraguariensis*, as outras dez espécies apresentaram uma relação altura e diâmetro altamente significativos. Esta relação é influenciada pela posição sociológica da árvore na floresta e difere para

árvores de classes sociológicas diferentes, além de sofrer o efeito das condições do sítio, refletindo na distribuição das alturas em uma tendência mais elevada quando as árvores estão em melhores condições de desenvolvimento, como pode ser observado para as espécies *B. salicifolius*, *P. lambertii* e *S. reitzii*. Para as demais espécies, que possuem correlação da h com o d , há distribuição dessa relação com forma mais achatada, ou seja, com tendência dos pontos que representam as alturas se agruparem em um nível mais baixo. Quanto a ausência de correlação significativa da altura com o diâmetro, pode ser interpretado como um indicativo de condições do sítio inferiores para a espécie, desfavorecendo também a formação de classes sociológicas para a espécie. Além disso, deve-se considerar o comportamento específico de cada espécie quanto ao diâmetro e da altura.

A distribuição da variável dc para as árvores amostradas das 13 espécies, que expressa vitalidade, capacidade fotossintética, espaço ocupado no dossel e por isso potencial de crescimento, demonstra a heterogeneidade das relações entre as dimensões das copas das árvores e a dimensão do diâmetro. Também identifica diferentes arranjos arquitetônicos que as copas apresentam e que foram perceptíveis *in loco*, decorrente das condições do sítio, demonstrando também a complexidade das florestas mistas sem manejo, com espécies e árvores com dimensões variadas e distribuição irregular dentro da floresta, dessa forma impedindo que identificar a tendência de variação nestas relações, como pode ser observado em algumas espécies, especialmente em *B. salicifolius*, *N. megapotâmica*, e *O. pulchella*.

Deve-se considerar as condições reais encontradas no momento da amostragem das copas, em que a determinação do raio médio, para posterior cálculo do diâmetro de copa, considerou a soma de 8 raios mensurados. Entretanto, houve ocasiões em que a árvore não possuía copa em todas as direções, atribuindo-se então, valor zero ao raio correspondente; bem como copas disformes localizadas foram da posição vertical localizada acima da base da árvore, efeito esse também decorrente de forte competição. Desse ponto de vista, pode-se também explicar as situações em que árvores de diâmetro maior possuem copa de diâmetro pequeno, consistindo em uma falta de tendência na distribuição dos pontos amostrados. Assim, é possível afirmar que a ocorrência de árvores com diâmetro expressivo decorre de período em que a árvore possuía espaço de crescimento e copa com dimensões e forma que possibilitaram o crescimento, condições não mais existentes no estágio atual de competição em floresta não manejada.

A variável explicativa, que descreve o grau de competição imposto às árvores, selecionado na análise de correlação, foi o índice de competição denominado *IC2*. Este ítem como característica alcançar valores mais altos para representar alta competição e valores menores conforme a competição imposta diminui. Além disso, a distribuição mostrou maior variação do valor de *IC2* nas árvores de menor *d*, decorrente da influência do número de competidoras para cada árvore objetivo, e não somente o próprio diâmetro, mostrando que algumas árvores menores coexistem com árvores de maior dimensão e com um maior número dessas competidoras. Árvores com um mesmo diâmetro assumem índice de competição extremamente diferentes, nesse caso os valores menores de *IC2* correspondem a árvores objetivo com menor número de concorrentes. Porém, como observado em campo, são casos em que as araucárias e árvores espécies latifoliadas de grandes dimensões tomam a maioria do espaço de crescimento, justificando a maior amplitude de *IC2* nas árvores menores.

Outros pontos discrepantes ou fora da tendência, muito frequentes, nas distribuições do *IC2* trata-se de árvores objetivo de grande porte e que estão sob competição com árvores concorrentes de diâmetro elevado, como registrado, em especial, em árvores da *B. salicifolius* na Parcela 3. Neste local *B. salicifolius* se encontravam entre várias araucárias de grande diâmetro, o que gerou maior valor de *IC2*, descrevendo a concorrência existente entre árvores da porção superior do dossel.

V. discolor possui correlação significativa entre *h* e *d*, não apresentando tendências na dispersão desses dados. Observando as árvores no campo e as informações registradas, observou-se que as árvores competidoras eram, por vezes, mais finas e com altura semelhantes ou menores que as árvores objetivo e, por sua vez, estavam localizadas em área de terreno com grande inclinação, podendo justificar os menores valores de *IC2*.

As observações referentes a dispersão do índice de competição e altura estabelecer que a modelagem do diâmetro teria como variáveis independentes a *h* (altura total da árvore); *dc* (diâmetro de copa); e índice de competição *IC2*, bem como por apresentaram correlação significativa com a variável dependente para a maioria das espécies. Além disso, representam a dimensão, características da copa e grau de competição, atributos necessários para compor o modelo que descreve a dimensão atual do diâmetro a altura do peito e descrevem, respectivamente, a dimensão atual por meio da altura, a competição passada por meio da dimensão atual da copa e a

intensidade da competição atual com o Índice de Competição IC2.

4.7.2 Modelagem pelo procedimento Stepwise

As variáveis determinadas na etapa anterior (análise de correlação) foram incluídas no processo de modelagem *Stepwise*, visando a adição sistemática dos preditores mais significativos. Os passos de regressão calculados durante todo procedimento foram avaliados quanto aos parâmetros estatísticos do modelo como o coeficiente de determinação (R^2), ao erro padrão da estimativa (S_{yx}), à probabilidade do valor de F da análise de variância, conforme resumido na Tabela 10.

Tabela 10 - Resumo estatístico da seleção Stepwise para as treze espécies, selecionadas em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista, São Francisco de Paula, RS, Brasil

<i>B. salicifolius</i>			
Variável	R^2 - Parcial	F	Prob >F
<i>h</i>	0,2365	55,22	<,0001*
<i>IC2</i>	0,0187	4,63	0,031*
<i>N. megapotamica</i>			
Variável	R^2 - Parcial	F	Prob >F
<i>h</i>	0,2069	8,61	0,0060*
<i>IC2</i>	0,0924	5,70	0,023*
<i>S. reitzii</i>			
Variável	R^2 - Parcial	F	Prob >F
<i>dc</i>	0,1491	13,62	0,0007*
<i>IC2</i>	0,4021	28,25	<,0001*
<i>O. pulchella</i>			
Variável	R^2 - Parcial	F	Prob >F
<i>h</i>	0,1641	7,33	0,0150*
<i>IC2</i>	0,4551	15,03	0,0011*
<i>P. lambertii</i>			
Variável	R^2 - Parcial	F	Prob >F
<i>dc</i>	0,0445	4,46	0,0416*
<i>IC2</i>	0,4798	32,28	<,0001*
<i>L. ternata</i>			
Variável	R^2 - Parcial	F	Prob >F

<i>dc</i>	0,4823	22,36	<,0001*
<i>IC2</i>	0,0716	4,69	0,047*
<i>I. brevicuspis</i>			
Variável	R ² - Parcial	F	Prob >F
<i>h</i>	0,5407	22,63	0,0001*
<i>IC2</i>	0,1238	6,64	0,0190*
<i>G. klotzschiana</i>			
Variável	R ² - Parcial	F	Prob >F
<i>h</i>	0,4149	17,02	0,0004*
<i>IC2</i>	0,2372	15,68	0,0006*
<i>E. uruguayensis</i>			
Variável	R ² - Parcial	F	Prob >F
<i>dc</i>	0,2494	13,84	0,0014*
<i>IC2</i>	0,4083	13,80	0,0014*
<i>V. discolor</i>			
Variável	R ² - Parcial	F	Prob >F
<i>dc</i>	0,1141	3,54	0,0771 ^{ns}
<i>IC2</i>	0,3380	9,19	0,0072*
<i>M. elaeagnoides</i>			
Variável	R ² - Parcial	F	Prob >F
<i>h</i>	0,8393	88,79	<,0001
<i>IC2</i>	0,0724	13,11	0,0023
<i>C. aschersoniana</i>			
Variável	R ² - Parcial	F	Prob >F
<i>h</i>	0,5283	29,12	<,0001
<i>IC2</i>	0,1644	13,38	0,0012
<i>I. paraguariensis</i>			
Variável	R ² - Parcial	F	Prob >F
<i>IC2</i>	0,2741	7,17	0,0149

Fonte: A autora (2022).

As análises gráficas de dispersão das variáveis para cada regressão e espécie auxiliou na definição da viabilidade de inclusão no modelo de regressão.

4.7.3 Ajuste de modelos de diâmetros para árvores individuais

Durante o processo de modelagem foi realizada a análise da dispersão dos resíduos dos modelos de regressão ajustados, e identificada a presença de problemas como a não normalidade e heterocedasticidade da variância. A transformação logarítmica da variável dependente e o novo ajuste dos modelos, resultou nos coeficientes e estatísticas constantes na Tabela 11.

Tabela 11 - Análise de variância e estimativa dos parâmetros gerados para o modelo logarítmico do diâmetro a altura do peito – $\ln(d)$ para as 13 espécies estudadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula – RS

<i>Blepharocalyx salicifolius</i>					
Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	1,29260	6,46298	69,37	<,0001
Erro	71	6,61456	0,09316		
Total	73	1,95405			
Estimativas dos parâmetros					
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t	
Intercepto	1,96844	0,22668	8,68	<,0001	
h	0,08965	0,01225	7,32	<,0001	
IC2	-0,01522	0,00321	-4,74	<,0001	
	R ² aj	0,6520		Syx 0,3052	
<i>Nectandra megapotamica</i>					
Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	1,95666	0,97833	7,04	0,0023
Erro	42	5,83665	0,13897		
Total	44	7,79330			
Estimativas dos parâmetros					
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t	
Intercepto	2,280110	0,48490	4,70	<,0001	
h	0,07083	0,02888	2,45	0,0184	
IC2	-0,00894	0,00353	-2,53	0,0153	

R ² aj 0,2154			Syx 0,3728		
<i>Siphoneugena reitizii</i>					
Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	3,53567	1,76784	12,44	<,0001
Erro	49	6,96612	0,14217		
Total	51	10,50179			
Estimativas dos parâmetros					
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t	
Intercepto	2,81598	0,10050	28,02	<,0001	
dc	0,05177	0,01237	4,19	0,0001	
IC2	-0,00760	0,00446	-1,71	0,0945	
R ² aj 0,3096			Syx 0,3771		
<i>Ocotea pulchella</i>					
Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	3,34627	1,67313	17,01	<,0001
Erro	21	2,06610	0,09839		
Total	23	5,41237			
Estimativas dos parâmetros					
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t	
Intercepto	2,04906	0,54833	3,74	0,0012	
h	0,09889	0,03031	3,26	0,0037	
IC2	-0,01668	0,00786	-2,12	0,0458	
R ² 0,5819			Syx 0,3137		
<i>Podocarpus lambertii</i>					
Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	4,17258	2,08629	13,27	<,0001
Erro	43	6,75847	0,15717		
Total	45	10,93105			
Estimativas dos parâmetros					
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t	
Intercepto	2,88953	0,09718	29,73	<,0001	

dc	0,05050	0,01004	5,03	<,0001	
IC2	0,00195	0,00091161	2,14	0,0379	
R ² 0,3530			Syx 0,3965		
<i>Lamanonia ternata</i>					
Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	3,33581	1,66790	11,68	0,0002
Erro	26	3,71277	0,1428		
Total	28	7,04858			
Estimativas dos parâmetros					
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t	
Intercepto	1,89987	0,50491	3,76	0,0009	
h	0,10278	0,03296	3,12	0,0044	
IC2	-0,01729	0,00660	-2,62	0,0145	
R ² 0,4327			Syx 0,3779		
<i>Ilex brevicuspis</i>					
Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	2,55333	1,27667	40,70	<,0001
Erro	21	0,65878	0,03137		
Total	23	3,21211			
Estimativas dos parâmetros					
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t	
Intercepto	2,54644	0,49418	5,15	<,0001	
h	0,08054	0,02632	3,06	0,0059	
IC2	-0,06036	0,01383	-4,36	0,0003	
R ² 0,7754			Syx 0,1771		
<i>Gymnanthes klotzschiana</i>					
Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	3,29078	1,64539	25,56	<,0001
Erro	36	2,31754	0,06438		
Total	38	5,60832			
Estimativas dos parâmetros					

Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t
Intercepto	2,05834	0,27408	7,51	<,0001
h	0,08690	0,01765	4,92	<,0001
IC2	-0,01694	0,00402	-4,21	0,0002
R ² 0,5638		Syx 0,2537		

Eugenia uruguayensis

Análise de Variância

FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	1,01822	0,50911	8,92	0,0012
Erro	25	1,42642	0,05706		
Total	27	2,44464			

Estimativas dos parâmetros

Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t
Intercepto	2,26246	0,35622	6,35	<,0001
h	0,06079	0,02428	2,50	0,0192
IC2	-0,01192	0,00398	-3,00	0,0061
R ² 0,3698		Syx 0,2389		

Vernonia discolor

Análise de Variância

FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	0,26678	0,13339	5,27	0,0151
Erro	19	0,48108	0,02532		
Total	21	0,74786			

Estimativas dos parâmetros

Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t
Intercepto	3,60130	0,07465	48,24	<,0001
h	0,01721	0,00675	2,55	0,0195
IC2	-0,03378	0,01270	-2,66	0,0155
R ² 0,2890		Syx 0,1591		

Cryptocarya aschersoniana

Análise de Variância

FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	1,54412	0,77206	24,73	<,0001
Erro	26	0,81160	0,03122		

Total	28	1,35571			
Estimativas dos parâmetros					
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t	
Intercepto	1,68936	0,31295	5,40	<,0001	
h	0,08622	0,01981	4,35	0,0002	
IC2	-0,0057	0,00184	-3,10	0,0046	
R ² 0,6290			Syx 0,1767		
<i>Ilex paraguariensis</i>					
Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	1	0,40831	0,40831	7,32	0,0126
Erro	23	1,28291	0,05578		
Total	24	1,69121			
Estimativas dos parâmetros					
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t	
Intercepto	3,04400	0,06928	43,94	<,0001	
IC2	-0,00726	0,00268	-2,71	0,0126	
R ² 0,2084			Syx 0,2362		
<i>Matayba elaeagnoides</i>					
Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	3,44370	1,72185	46,66	<,0001
Erro	24	0,88559	0,03690		
Total	26	4,32929			
Estimativas dos parâmetros					
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t	
Intercepto	1,0102	0,30536	3,31	0,0030	
h	0,13721	0,01866	7,35	<,0001	
IC2	-0,00534	0,00247	-2,16	0,0406	
R ² 0,7784			Syx 0,1921		

Fonte: A autora (2022).

Os modelos com $\ln(d)$ foram em sua totalidade significativos, com os valores de F demonstrando que eles têm uma capacidade de previsão do diâmetro melhor que

a média, assim como seus coeficientes, demonstrando a variação de $\ln(d)$ a partir das regressões geradas. A maioria dos modelos que possuem como variáveis independentes h e IC2, apresentaram ajustes superiores a 40 %, chegando a 78% para *M. elaeagnoides*. Já os modelos com dc e IC2 foram menos explicativos, estando acima de 30% para as duas espécies. O modelo de *I. paraguariensis* tem como variável independente somente o IC2, e proporcionou ajuste de 21%.

Contudo, ocorreu uma dissimilaridade entre as variáveis selecionadas pela existência de correlação (coeficiente de Pearson) com as variáveis selecionadas no procedimento *Stepwise*, especialmente referente à variável diâmetro de copa, da qual esperava-se que fosse altamente explicativa, pois fora considerada com correlação significativa com o diâmetro para a grande maioria das espécies, mas que, no entanto, não foi incluída nos modelos de algumas delas.

A resposta para isso está na dimensão atual das árvores e sua distribuição das variáveis em referência ao plano horizontal que, com o aumento da competição e diminuição do espaço para crescimento, sofreram forte perda de dimensão da copa, descrevendo exatamente o que foi observado na floresta: uma alta variabilidade de situações de competição e disponibilidade de recursos que resultaram em arquiteturas e dimensões de copa bastante heterogêneas. Além disso, algumas árvores no momento da coleta de dados estavam com a copa danificada pela ação de intempéries climáticas, bem como, por vezes, encontravam-se com pouca quantidade de galhos, presentes apenas em uma direção, determinando um valor de dc pequeno e, em alguns casos, tratando-se de árvore com d grande. Muitas árvores apresentavam diâmetros de fuste grande, porém, em sua maioria com diâmetros de copa reduzidos, condições impostas pelo ambiente em que se encontravam e, por isso, essas relações por vezes não foram explicativas nos modelos de regressão em algumas espécies, impedindo a inclusão da variável dc nos modelos construídos no processo *Stepwise*.

Essas condições decorrem de período em que a árvore possuía espaço de crescimento e copa com forma e dimensões que possibilitaram o crescimento; condições passadas, não existentes atualmente. Com o crescimento das árvores o espaço de crescimento foi sendo reduzido causando a deformação e redução da copa e, por consequência, a redução contínua da vitalidade, do incremento, da perda de qualidade da planta e, em alguns casos, sua morte.

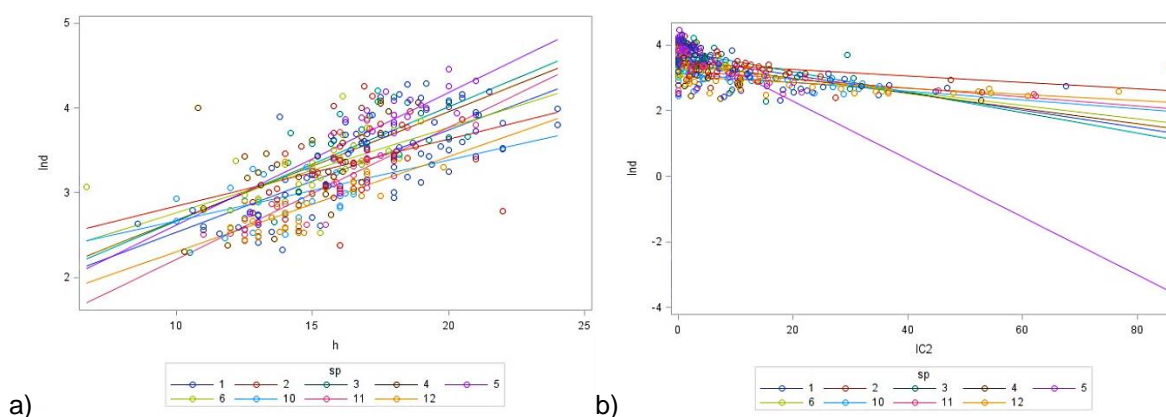
As condições registradas na floresta, comprovam e justificam a necessidade de

manejo florestal para a manutenção da estabilidade, sanidade e produtividade das espécies florestais e da comunidade florestal como um todo.

4.7.4 Análise da equivalência de regressões – Análise de covariância

Considerando a grande diversidade e variabilidade dos atributos das espécies que interferem no ajuste de modelos matemáticos, considerou-se o agrupamento das espécies em regressões comuns avaliando o arranjo de variáveis nos modelos, resultando em dois grupos: Grupo 1: 9 espécies que contém como variáveis predictoras no modelo h e $IC2$; Grupo 2: três espécies com dc e $IC2$ como variáveis predictoras do d ; e isoladamente *I. paraguariensis* que não compõe nenhum dos grupos pois, têm como preditora apenas $IC2$. Assim, a hipótese de não existência de diferença em nível e inclinação das regressões individuais mostrou no Grupo 1 existir diferença entre os níveis (b_0) das regressões da variável h ($<,0001$), porém não diferem em inclinação ($0,5315$). Já para $IC2$ confirmou-se a existência de diferença de nível ($<,0001$) e inclinação ($<,0001$) entre as retas de regressão das espécies que compõe o grupo, cujas dispersões podem ser visualizadas na Figura 25a para altura e Figura 25b para $IC2$.

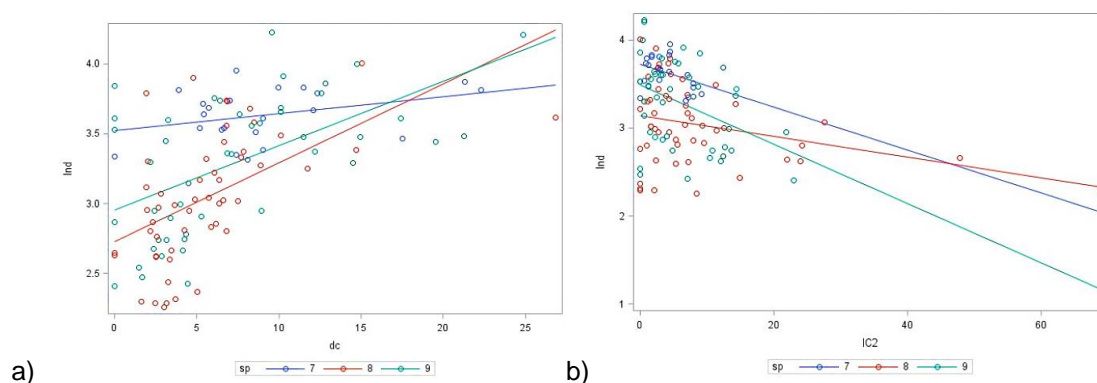
Figura 25 - Equivalência de regressões do Grupo 1, contendo as espécies estudadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil



Fonte: A autora (2022).

No Grupo 2, regressões com variáveis independentes o dc e $ic2$, houve diferença entre os níveis (b_0) das retas da variável dc ($<,0001$), porém elas não diferiram em inclinação ($0,0623$), o mesmo ocorrendo para o $IC2$ com interações significativas (Figura 26a.; figura 26b.).

Figura 26 - Equivalência de regressões do Grupo 1, contendo as espécies estudadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil



Fonte: A autora (2022).

Dessa forma, identificou-se um comportamento distinto das variáveis predictoras em relação ao diâmetro das árvores das diferentes espécies em ambos os grupos, impossibilitando o emprego de uma equação única para descrever o comportamento do d , bem como, o agrupamento das espécies quanto a semelhanças no modelo sendo necessário o emprego de equações para a espécie individualmente.

4.7.5 Análise dos Critérios para ajuste em regressão

A análise das condicionantes de regressão quanto a homogeneidade da variância, independência dos resíduos e normalidade mostrou que a transformação aplicada na variável dependente eliminou o problema de não normalidade na distribuição dos resíduos, porém não eliminou a violação dos demais critérios de regressão para as 13 espécies, justificando a aplicação de Modelos Lineares Generalizados (MLG) na modelagem.

4.7.6 Modelos Lineares Generalizados

O ajuste das regressões considerando o MLG produziu melhores resultados conforme os resultados da Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros e critérios estatísticos dos modelos testados para o diâmetro das 13 espécies estudadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula – RS

<i>Blepharocalyx salicifolius</i> - Gamma In (μ)				
Parâmetros		D	AIC	BIC
Intercepto	2,0348			
<i>b1</i>	0,0885 * h	0,0957	534,3471	543,5634
<i>b2</i>	-0,0154 * IC2			
<i>Nectandra megapotamica</i> - Gamma (μ)				
Parâmetros		D	AIC	BIC
Intercepto	-23,0879			
<i>b1</i>	3,4132 * h	0,1324	344,2943	351,521
<i>b2</i>	-0,1748 * IC2			
<i>Siphoneugena reitzii</i> - Gamma (μ)				
Parâmetros		D	AIC	BIC
Intercepto	-6,2321			
<i>b1</i>	1,5878 * dc	0,1145	357,1811	364,9861
<i>b2</i>	1,257 * IC2			
<i>Ocotea pulchella</i> - Gamma (μ)				
Parâmetros		D	AIC	BIC
Intercepto	-29,9234			
<i>b1</i>	4,2946 *h	0,0846	185,5126	190,2248
<i>b2</i>	-0,2939 *IC2			
<i>Podocarpus lambertii</i> - Gamma (μ)				
Parâmetros		D	AIC	BIC
Intercepto	-14,4276			
<i>b1</i>	2,5477 *dc	0,1028	334,1299	341,4444
<i>b2</i>	0,9064 * IC2			
<i>Lamanonia ternata</i> - Gamma In(μ)				
Parâmetros		D	AIC	BIC
Intercepto	2,302			
<i>b1</i>	0,0814 *h	0,1448	221,0118	226,481
<i>b2</i>	-0,0203 *IC2			
<i>Ilex brevicuspis</i> - Gamma In(μ)				

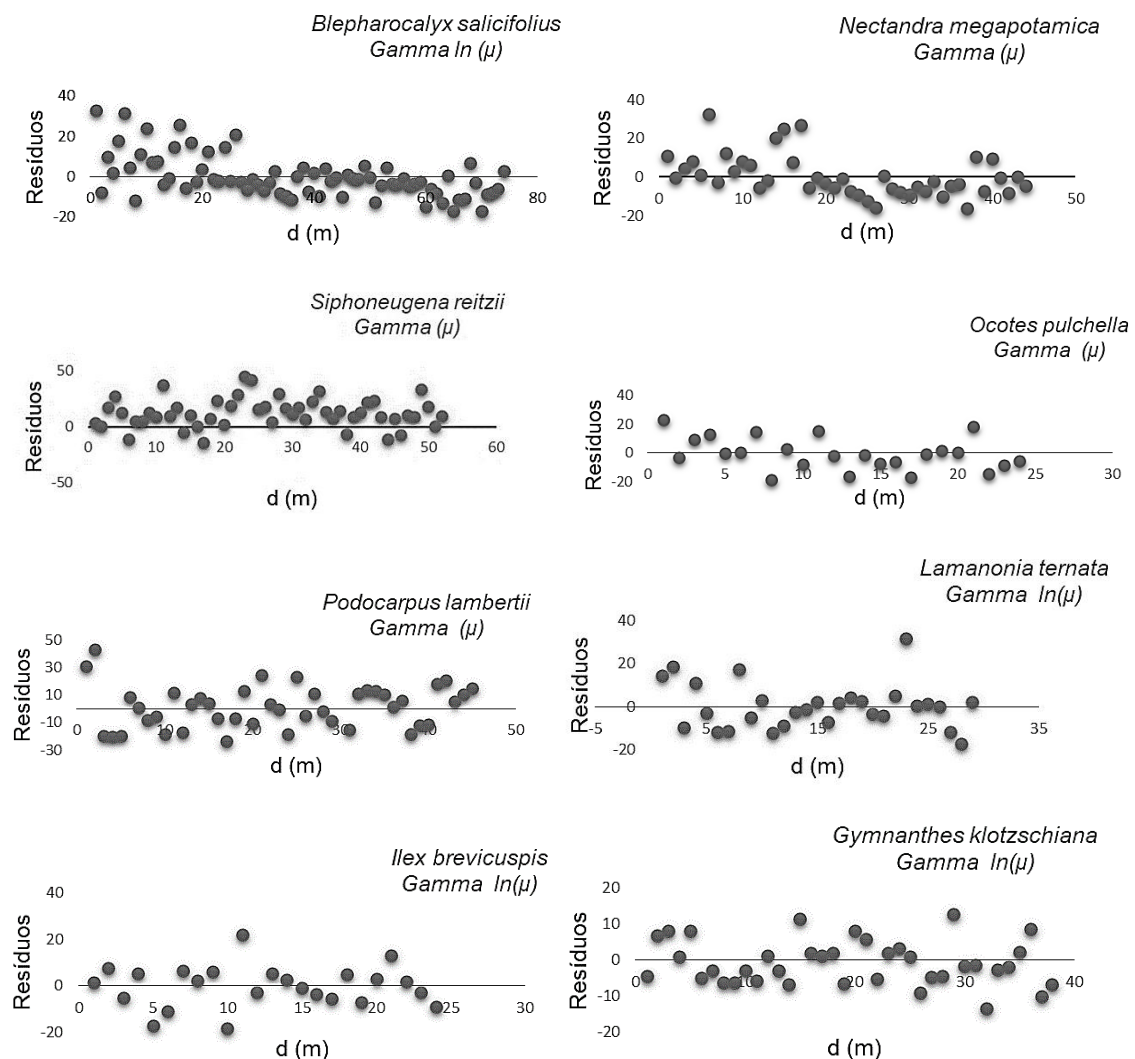
Parâmetros		D	AIC	BIC
Intercepto	2,5403			
<i>b1</i>	0,0817 *h	0,0305	174,56	179,2801
<i>b2</i>	-0,0606 *IC2			
<i>Gymnanthes klotzschiana</i> - Gamma ln(μ)				
Parâmetros		D	AIC	BIC
Intercepto	2,1282			
<i>b1</i>	0,0847 *h	0,0663	265,3423	271,9966
<i>b2</i>	-0,0179 *IC2			
<i>Eugenia uruguayensis</i> - Gamma ln(μ)				
Parâmetros		D	AIC	BIC
Intercepto	2,3737			
<i>b1</i>	0,0558 *h	0,0555	169,2624	174,5912
<i>b2</i>	-0,0132 *IC2			
<i>Vernonia discolor</i> - Gamma (μ)				
Parâmetros		D	AIC	BIC
Intercepto	37,2523			
<i>b1</i>	0,6695 *dc	0,0254	146,2782	150,6424
<i>b2</i>	-1,3158 *IC2			
<i>Matayba elaeagnoides</i> - Gamma ln(μ)				
Parâmetros		D	AIC	BIC
Intercepto	1,029			
<i>b1</i>	0,1374 *h	0,037	156,6741	161,8775
<i>b2</i>	-0,0057 *IC2			
<i>Cryptocarya aschersoniana</i> - Gamma ln(μ)				
Parâmetros		D	AIC	BIC
Intercepto	1,7553			
<i>b1</i>	0,0834 *h	0,0316	151,2816	156,7508
<i>b2</i>	-0,0062 *IC2			
<i>Ilex paraguariensis</i> - Gamma (μ)				
Parâmetros		D	AIC	BIC
Intercepto	21,6511			
<i>b1</i>	-0,1426 * IC2	0,0541	147,4739	151,1306

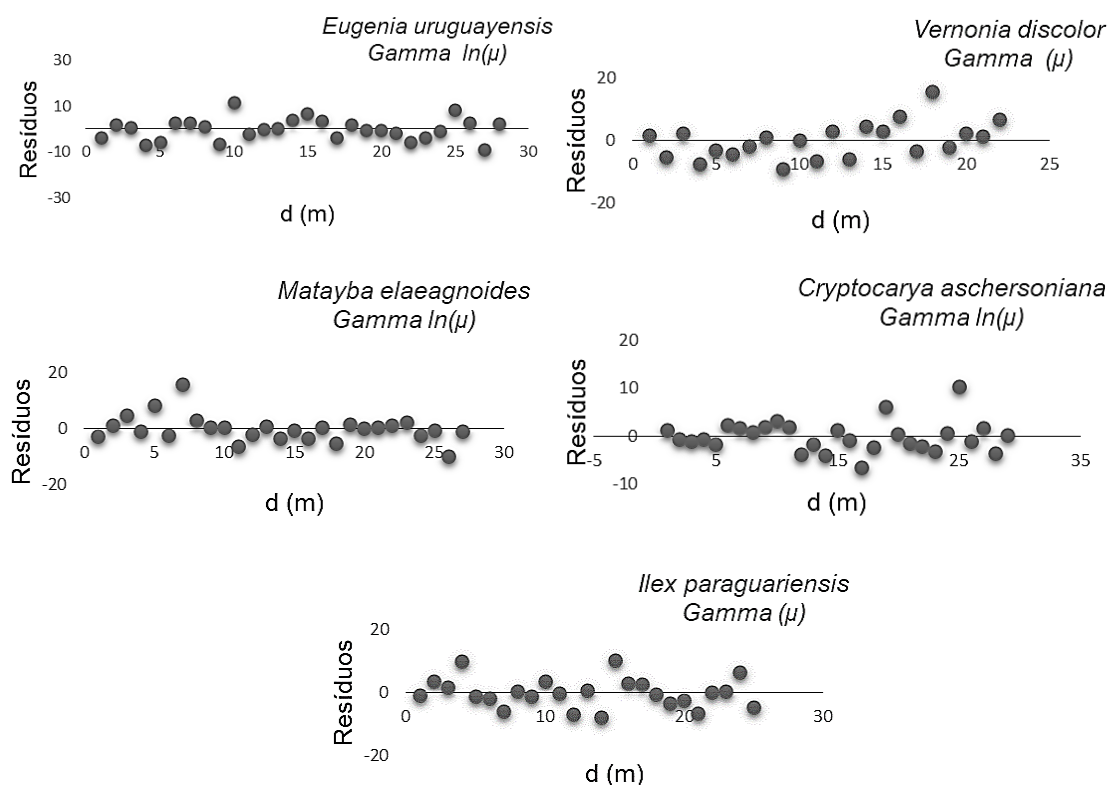
Em que: h: altura total (m); dc: diâmetro de copa (m), IC2: Índice de competição 2; D: desvio, AIC: critério de informação de Akaike, BIC: critério de informação Bayesiano.

Fonte: A autora (2022).

O Modelo Linear Generalizado com o campo aleatório *Gamma* apresentou os melhores critérios para todas as espécies, 7 delas com a função de ligação logarítmica e as demais com função de ligação identidade. Os critérios de análise de Informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC), embora não comparáveis diretamente com o Syx dos modelos de Regressão Ordinários de Mínimos Quadrados, apresentaram valores reduzidos. O exame dos resíduos foi mais um critério para a escolha do modelo que melhor representou os dados conforme a Figura 27.

Figura 27 - Resíduos gerados pelo ajuste dos MLGs para o diâmetro a altura do peito para as respectivas espécies estudadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil





Fonte: A autora, 2022.

Todas as equações para as treze espécies convergiram com coeficientes significativos ($\text{Prob.} > F$), confirmando a existência de regressão entre a variável dependente diâmetro à altura do peito e as variáveis independentes, e consolidando o uso das técnicas de MLG's na modelagem do diâmetro de espécies florestais latifoliadas da Floresta Ombrófila Mista que apresentaram comportamento assimétrico.

O efeito da inclusão da variável dc nas equações das espécies onde havia correlação com a variável dependente, não mostrou melhoria quanto ao valor de ajuste e ao erro, diferindo pouco quanto aos critérios avaliados nos modelos apresentados anteriormente.

A relação do diâmetro das árvores em relação à h , dc e índice de competição foi equivalente nas espécies em estudo. Foram observadas diferentes alturas para um mesmo diâmetro, sendo este um reflexo da competição e da capacidade das árvores, mais favorecidas, em sobressair às demais, estabilizando as medidas de altura ao atingirem um diâmetro maior e, conseqüente, conformação da copa. No entanto é necessário ter cautela nessa análise, pois as árvores das diferentes espécies

apresentam diferentes formas e dimensões de copas em floresta natural inequidiana.

As árvores de menor d sofrem com maior competição, sendo esta exercida por menor número de competidoras, porém de grandes dimensões, assim como, em outros casos, por um número maior de árvores de mesmo porte que competem no estrato médio da floresta. Nestes, o índice de competição apresentou um peso para cada árvore objetivo, árvores de d diferentes podem apresentar valores do índice muito semelhantes, influenciado pelo número de árvores competidoras e suas dimensões.

Nas parcelas amostradas identificou-se alta competição entre árvores e espécies, o que acarretou variabilidade nas formas e vitalidade das copas, nas dimensões de altura e diâmetro e, conseqüente, estagnação do desenvolvimento das árvores e da floresta, ocasionando situações mais drásticas como a mortalidade das árvores detectada em campo e deficiência no recrutamento de espécies, ou seja, perda de diversidade e recursos de origem florestal. Frequente foi a existência de árvores com copa extremamente reduzidas, irregulares quanto a forma de projeção horizontal e vertical, copa em posição distante do eixo da árvore, apresentando diâmetro que permite aproveitamento industrial. Entretanto, tais exemplares eram de baixa vitalidade, por vezes doentes, com copa quebrada não justificando a dimensão atual do diâmetro da árvore, o qual é dependente do diâmetro e comprimento da copa, comprovando a falta de manejo da floresta.

É importante ressaltar que a complexidade ambiental e a composição das florestas nativas se dão pelo grande número de espécies com as mais diferentes características silviculturais e ecológicas, requerendo uma análise profunda e com grande número de informações, não só das árvores, mas também do ambiente em que estão distribuídas no intuito de entender a dinâmica desses ecossistemas. Entretanto, é indiscutível a manutenção desta tipologia florestal na paisagem, com árvores saudáveis e bem desenvolvidas, requer a aplicação constante de práticas silviculturais de regulação do espaço vital e qualificação das árvores na floresta.

Nesse estudo buscou-se descrever com modelos matemáticos a dimensão do diâmetro de árvores das espécies estudadas, testando variáveis de competição, posição social, dimensões da copa e variáveis referentes ao ambiente, para que este fosse o mais completo e explicativo possível. No entanto, comprovada a grande heterogeneidade e complexidade da relação entre essas variáveis, não foi possível incluir descritores do ambiente por falta de correlação com a variável resposta nos

modelos ajustados.

4.7.8 Aprendizado de máquina na predição do diâmetro das árvores

A aplicação dos dados aos métodos de ajuste da RNA, considerando um modelo geral para as espécies e variáveis independentes amostradas resultou no número de neurônios da camada oculta entre 5 e 11, com base no método Fletcher-Glos. A testagem de diferentes arquiteturas variando o número de neurônios da camada oculta entre 5 a 11 (7 arquiteturas diferentes), contendo cada arquitetura nomeada com referência ao número de neurônios na camada oculta, resultou em ajuste e dispersão dos dados para o neurônio de saída descritor do diâmetro das árvores a 1,30m do solo os valores reunidos na Tabela 13.

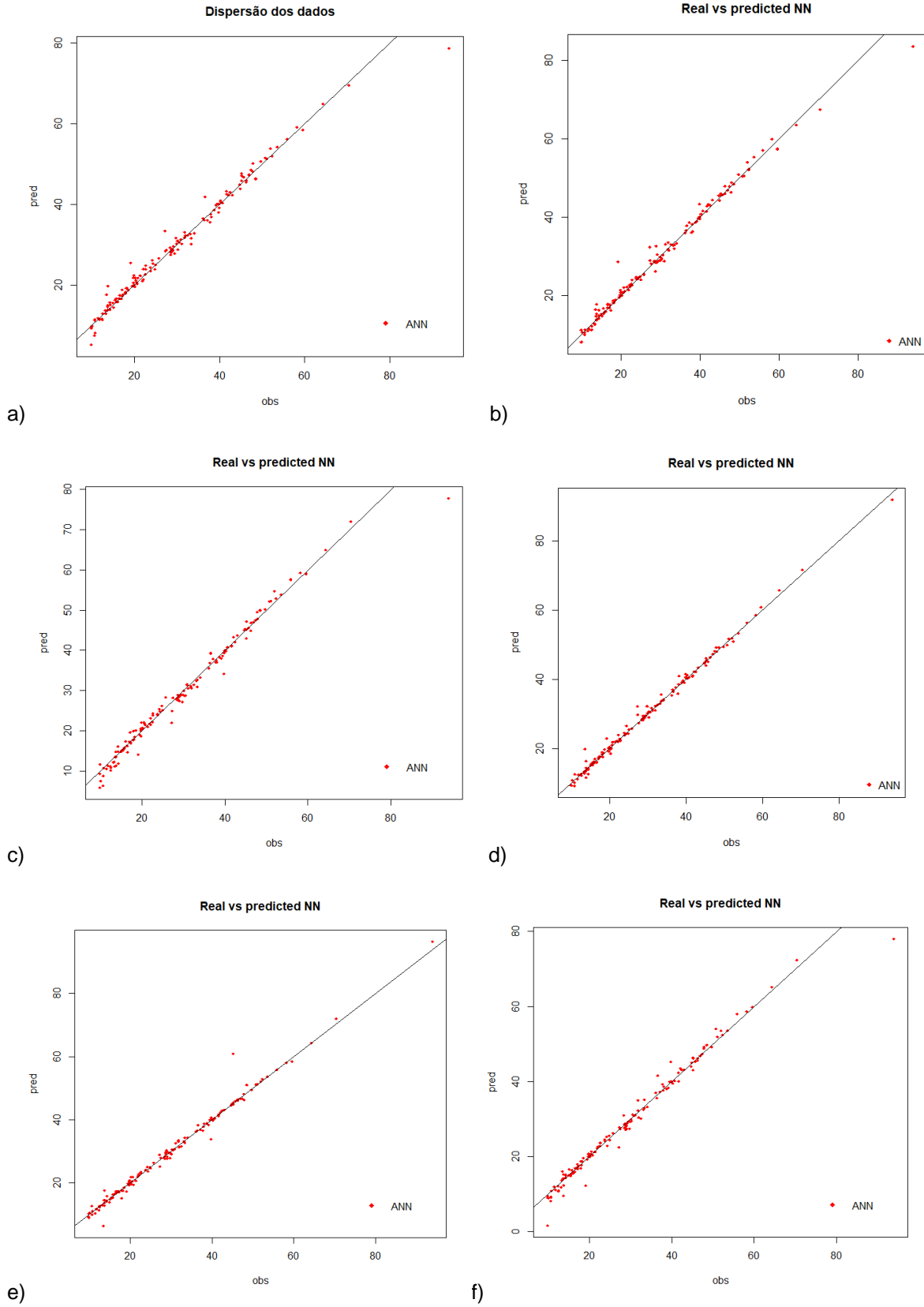
Tabela 13. Estatísticas das RNA selecionadas como mais adequadas para as sete arquiteturas consideradas, para descrição do grupo de espécies da Floresta Ombrófila Mista

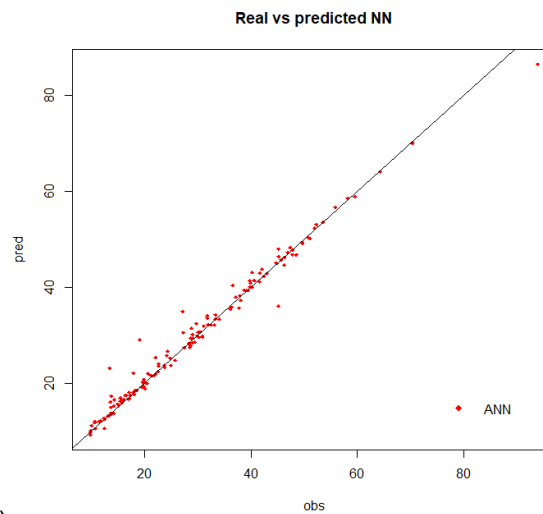
Arquitetura	R ²	RMSE	RMSE %	BIAS	BIAS %
5	0,98	1,99	6,79	0,20	0,70
6	0,98	1,64	5,61	0,17	0,57
7	0,98	1,99	6,60	-0,39	-1,34
8	0,99	1,12	3,81	0,21	0,70
9	0,98	1,76	6,02	0,07	0,24
10	0,97	2,06	7,03	-0,17	-0,58
11	0,98	2,03	6,93	0,48	1,63

Fonte: A autora, 2022.

As RNA testadas, com diferentes arquiteturas, apresentaram coeficiente de determinação acima de 90% e raiz quadrada do erro quadrático médio abaixo de 10%, com baixa dispersão das estimativas do treino das RNAs (Figura 28).

Figura 28 - Dispersão das estimativas dos modelos obtidos pelas redes selecionadas para cada arquitetura testada: a) arquitetura 5; b) arquitetura 6; c) arquitetura 7; d) arquitetura 8; e) arquitetura 9; d) arquitetura 10; e) arquitetura 11





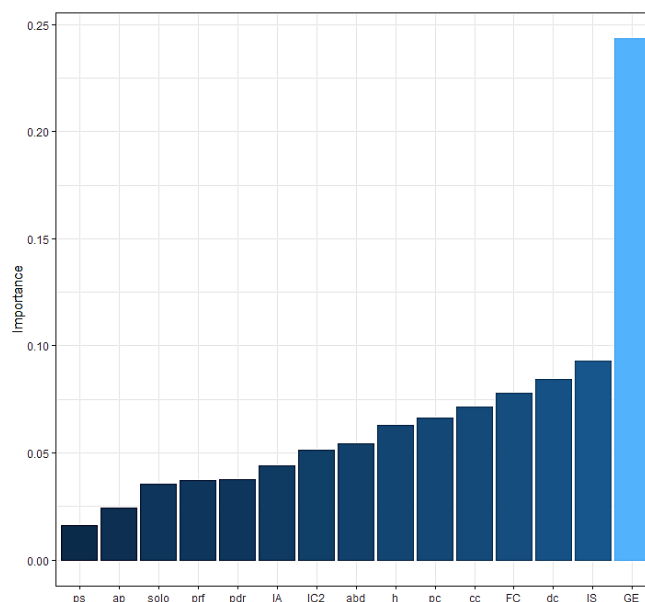
g)

Fonte: A autora, 2022.

Entre as redes testadas, a RNA de arquitetura 8 apresentou os melhores resultados para as estatísticas de ajuste e melhor dispersão dos resíduos em relação a linha de tendência, indicando a rede de arquitetura 8 (15-8-1) como a mais adequada para prever o diâmetro das árvores das treze espécies.

A análise da contribuição relativa de cada variável no modelo de arquitetura 8 considerando o algoritmo Garson mostrou a razão dada pela altura e diâmetro da árvore como a de maior poder explicativo com 24%, (Figura 29).

Figura 29 - Importância relativa de cada variável do modelo RNA arquitetura 8, contendo os dados levantados na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil



Fonte: A autora (2022).

O resultado permite observar que o grau de esbeltez (GE) demonstra ainda que existe uma forte influência do grau de estabilidade das árvores refletindo nas dimensões do diâmetro.

O índice de saliência, que expressa a proporção da copa em relação ao diâmetro a altura do peito das árvores, e que também representa estabilidade e a potencialidade da árvore em ocupar espaço dentro da floresta e, dessa forma a capacidade da árvore sobressair-se na competição foi a segunda variável de maior poder explicativo. As demais variáveis preditoras de maior importância para as prognoses do diâmetro também são descritoras das copas das árvores, destacando-se, além destas, a variável altura total entre as de maior importância relativa.

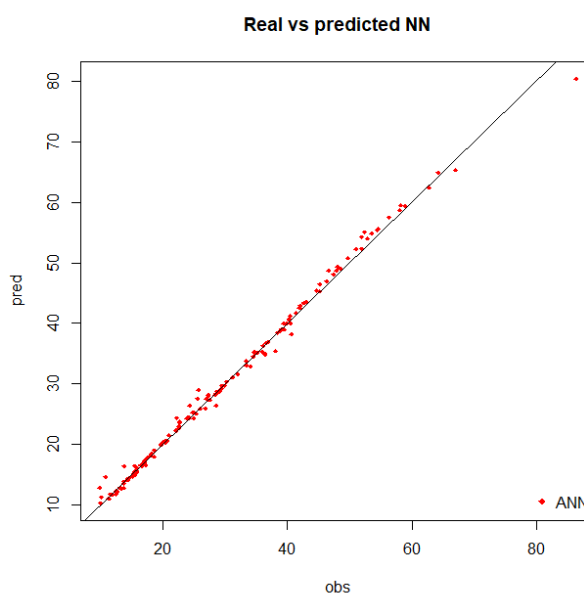
Contudo, visando um menor esforço amostral na aquisição das variáveis de entrada, reduzindo recursos de levantamento, o ajuste da RNA com variáveis de entrada identificadas como de maior importância e contribuição: GE, IS, dc, FC e h (Figura 29), além da variável IC2 (descritora da competição), mostrou melhora dos descritores estatísticos do modelo (Tabela 14 e Figura 30), confirmando o potencial da RNA arquitetura 8 na prognose do diâmetro.

Tabela 14 - Estatísticas de ajuste da RNA (15-8-1) construída com as variáveis de maior importância relativa, para as árvores observadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil

R ²	RMSE	RMSE %	BIAS	BIAS %
0,99	1,08	3,58	0,18	0,60

Fonte: A autora, 2022.

Figura 30 - Dispersão do modelo obtido pela RNA contendo as variáveis de maior relevância para as árvores observadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil



Fonte: A autora (2022).

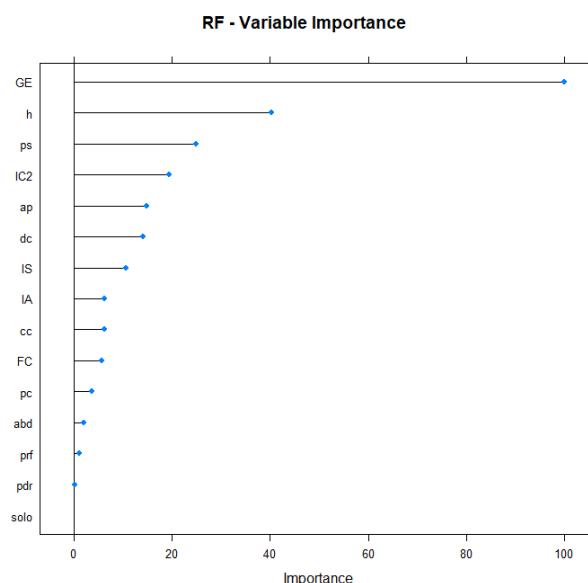
Dessa forma, as redes neurais artificiais mostram-se como uma alternativa para a modelagem das características dendrométricas de árvores individuais em floresta inequiânea, pois esta técnica de inteligência artificial permite realizar inferências incluindo variáveis de natureza não linear e mais complexas que descrevem a alta variabilidade existente nesses ambientes naturais e que condicionam as dimensões das árvores.

As técnicas de RNA vêm sendo aplicadas de forma relevante na área florestal apresentando resultados de sucesso como os encontrados por Diamantopoulou et al. (2015) na modelagem da distribuição diamétrica onde concluíram que o procedimento de estimação mais confiável é a modelagem de redes neurais artificiais, assim como já observado por Leduc et al. (2001).

No âmbito das florestas nativas no Brasil existem investigações abordando diferentes características das florestas, colaborando para o gerenciamento das mesmas, como nas pesquisas referentes à predição de incêndios florestais, classificação de estágios seccionais na Amazônia e modelagem do grau de mortalidade da floresta desenvolvidas por Maeda et al., (2009); Kuplich, (2009); Castro et al., (2015), respectivamente.

Assim como a RNA, o algoritmo *Random Forest*, aplicado com o treinamento inicial contendo as 15 variáveis independentes, identificou as mais relevantes para predizer o diâmetro a altura do peito (Figura 31).

Figura 31 - Importância relativa (%) das quinze variáveis independentes utilizadas no treinamento do RF, para os dados de 13 espécies da Floresta Ombrófila Mista



Fonte: A autora (2022).

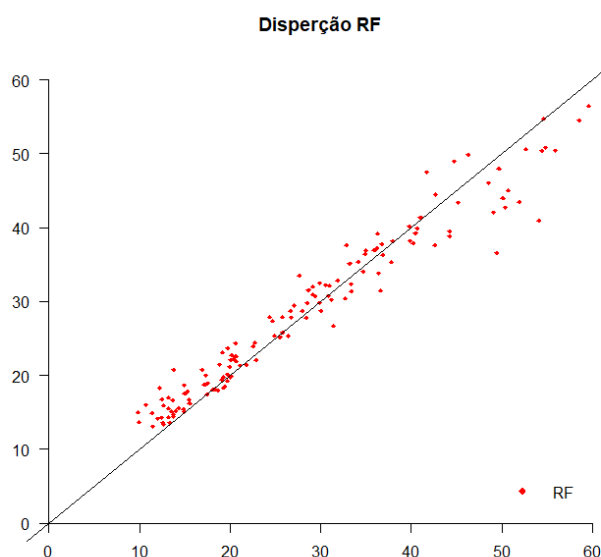
Em comparação à importância relativa das variáveis elencadas pelo método Garson no ajuste da RNA, no caso do RF, a participação das variáveis preditoras seguiu a mesma tendência de importância com as variáveis que descrevem a estabilidade, as condições da copa, assim como a altura total. Já o IC2, nesse caso, figurou entre as cinco mais importantes; conforme as estatísticas e a dispersão dos dados preditos no treinamento do RF na Tabela 15 e na Figura 32.

Tabela 15 - Estatísticas geradas pelo treinamento do RF para o conjunto de dados contendo informações das árvores de 13 espécies latifoliadas da FOM

Estatísticas do Modelo				
R ²	RMSE	RMSE %	BIAS	BIAS %
0,94	4,30	14,63	-0,16	-0,54

Fonte: A autora (2022).

Figura 32 - Dispersão do modelo inicial obtido pelo RF para espécies da Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil



Fonte: A autora (2022).

Os resultados desse primeiro processamento demonstrou a aptidão do algoritmo em prever o diâmetro a partir das variáveis incluídas para todas as árvores das 13 espécies, atingindo um ajuste de 94% e valor para raiz quadrada do erro inferior a 15%.

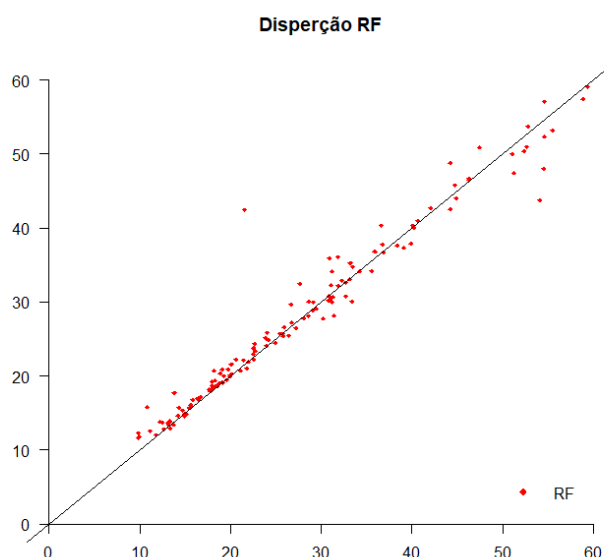
O treinamento contendo somente as variáveis de maior importância relativa: GE, h, ps, IC2 e IS, (Tabela 16 e na Figura 33) mostrou não haver alterações significativas nas estatísticas e na dispersão das estimativas ao retirar as variáveis de menor importância, indicando a manutenção da capacidade de predição do RF. Ao comparar com a dispersão das estimativas geradas pela RNA nota-se a superioridade da rede em relação a força e direção da correlação entre as variáveis dependentes e independentes.

Tabelas 16 - Estatísticas dos treinamentos (a) com as variáveis de maior importância relativa apontada no treinamento inicial, São Francisco de Paula, RS, Brasil

Estatísticas do Modelo RF				
R ²	RMSE	RMSE %	BIAS	BIAS %
0,94	3,94	13,27	-0,01	-0,03

Fonte: A autora (2022).

Figura 33 - Dispersão dos dados para os ajustes de RF com as variáveis de maior importância relativa, para as espécies estudadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil



Fonte: A autora, 2022.

Assim como a RNA, as análises realizadas com Random Forest, pouco exploradas no contexto de espécies nativas da FOM, é um algoritmo dos mais acurados para problemas de regressão. Conforme descrito por Wang et al. (2016) seu aproveitamento nas ciências florestais é considerado alto nos problemas que envolvem a análise da relação hipsométrica, como demonstrado também por Su et al. (2017) nos estudos da estrutura do ecossistema florestal em florestas da Cordilheira de Sierra Nevada. Na distribuição de diâmetro, Shang et al. (2017) observaram que RF foi mais preciso e flexível que a estimativa com outra técnica de aprendizado de máquina (K-NN). Pesquisas de sortimento de madeira, biomassa florestal, volume, e altura comprovaram a aplicação da RF em florestas plantadas (SILVA et al., 2017; SILVA et al. 2019; LOPES et al., 2021). Os estudos têm demonstrado que o emprego de novos métodos de aprendizado de máquina apresenta vantagens sobre a regressão, pois são capazes de aprender e generalizar os dados, com maior tolerância aos ruídos, ao tempo em que equações tradicionais não podem simular com precisão nestes casos (WERE et al., 2015).

Confrontando os resultados encontrados na aplicação dos métodos de inteligência computacional para os dados dessa pesquisa, verificou-se que a RNA é mais adequada, pois é capaz de gerar estimativas melhores com um melhor

relacionamento entre variável dependente e as variáveis independentes.

De acordo com Schikowski (2016), a aplicação da RNA em regressão para fins florestais, pode ser considerada mais difundidas que o algoritmo RF, porém o uso ainda é muito recente, principalmente no tocante às florestas nativas, pois entre as aplicações destacam-se estudos para estimativas do volume individual.

Portanto, é necessária a evolução em redes neurais artificiais para projetar as características dendrométricas e morfométricas das espécies em florestas naturais, servindo como tomada de decisão no manejo florestal sustentável na FOM. Dessa forma, poderá haver ganhos consideráveis nas prognoses com uso das RNA, pelas suas propriedades e capacidades inerentes a não-linearidade, capacidade de aprendizagem, habilidades de generalização, adaptabilidade à complexidade dos dados. O potencial dessas técnicas comprovado nesse estudo motiva seu emprego em pesquisas futuras com maior aprofundamento das análises.

4.8 MODELAGEM DO ÍNDICE DE COMPETIÇÃO

A pouca variação da altura das árvores em relação às diferentes classes de diâmetro verificada nos dados amostrados, reduziu ou inviabilizou seu emprego na modelagem do diâmetro a altura do peito devido a baixa correlação, o que justificou a descrição da altura máxima (hmax), ou seja, a altura máxima da floresta.

A Regressão Quantílica para o quantil de 90% da variável altura, Tabela 17, obteve coeficientes de intercessão e inclinação significantes, com coeficiente de determinação. Essa metodologia foi adotada por Costa (2015) na descrição da altura máxima de Florestas com *Araucaria angustifólia*.

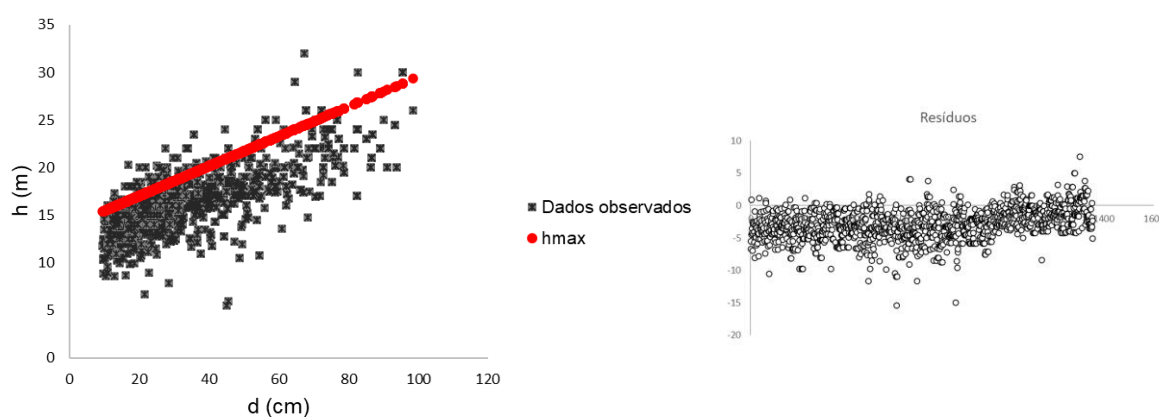
Tabela 17 - Estatísticas do ajuste da hmax em função do diâmetro por regressão quantílica, para as árvores amostradas nas três parcelas da Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil

Regressão Quantílica (Quantil superior 0,90)				
Variável	Parâmetro	Erro Padrão	Valor de t	Pr.> F
Intercepto	13,88996	0,19056	72,88897	0,000
d	0,15645	0,0044	35,53263	0,000
R¹ (τ) 0,827194				

Em que: R^1 (τ): coeficiente de determinação para regressão quantílica; d: diâmetro a altura do peito.
Fonte: A autora, 2022.

A partir do ajuste da regressão quantílica para h_{max} , representando o estrato dominante da floresta (figura 34), foi calculada a nova variável, denominada h_{rel} que consiste na proporção da altura total das árvores objetivo em relação à altura máxima da floresta. a qual foi usada na modelagem do IC2.

Figura 34 - Dados observados e ajustados para as alturas máximas de todas as árvores mensuradas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, e distribuição dos resíduos do modelo



Fonte: A autora, 2022.

O emprego da variável h_{rel} no modelo de regressão para a estimativa do índice de competição das árvores objetivo na descrição da competição em função do diâmetro a altura do peito e da altura relativa (h_{rel}), Tabela 18, teve regressão não foi significativa para algumas espécies, não cumprindo os critérios mínimos de ajuste.

Tabela 18 - Análise de variância e estimativa dos parâmetros gerados para o modelo do índice de competição para as 13 espécies estudadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula – RS

<i>Blepharocalyx salicifolius</i>					
Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	3245,05	1622,52541	22,71	<,0001*
Erro	71	5002,18	71,46		
Total	73	8247,23			
Estimativas dos parâmetros					
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t	

Intercepto	27,98529	7,06232	3,96	0,000*	
d	-0,41864	0,06295	-6,65	<,0001*	
hrel	-5,77551	7,58726	-0,76	0,4491 ^{ns}	
R ² aj 0,3761			Syx 8,4534		
<i>Nectandra megapotamica</i>					
Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	748,6402	374,32009	5,41	0,0083*
Erro	42	2768,511	69,21277		
Total	44	3517,15092			
Estimativas dos parâmetros					
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t	
Intercepto	12,44351	12,98690	0,96	0,3437 ^{ns}	
d	-0,29007	0,10908	-2,66	0,0112*	
hrel	5,12364	12,34659	0,41	0,6804 ^{ns}	
R ² aj 0,1735			Syx 8,32		
<i>Siphoneugena reitizii</i>					
Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	148,73316	74,36658	1,76	0,1831 ^{ns}
Erro	49	1985,1079	42,23634		
Total		2133,8410			
	51	2133,84			
Estimativas dos parâmetros					
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t	
Intercepto	15,11938	6,31034	2,40	0,0206*	
d	-0,13958	0,08586	-1,63	0,1107 ^{ns}	
hrel	-6,69563	7,28731	-0,92	0,3629 ^{ns}	
R ² aj 0,03			Syx 6,50		
<i>Ocotea pulchella</i>					
Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	978,9863	489,49314	7,47	0,0035*
Erro	21	1376,0394	65,52568		

Total	23	2355,0257			
Estimativas dos parâmetros					
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t	
Intercepto	40,97338	15,54255	2,64	0,0154 *	
d	-0,40924	0,10845	-3,77	0,0011 *	
hrel	-20,44195	17,29277	-1,18	0,2504 ^{ns}	
R ² 0,3601			Syx 8,09		
<i>Podocarpus lambertii</i>					
Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	4785,18948	2392,5947	0,53	0,5907 ^{ns}
Erro	43	193051	4489,5693		
Total	45	197837			
Estimativas dos parâmetros					
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t	
Intercepto	27,92849	74,76632	0,37	0,7106 ^{ns}	
d	0,67903	0,70291	0,97	0,3394 ^{ns}	
hrel	-40,85191	91,34419	-0,45	0,6570 ^{ns}	
R ² aj -0,0212			Syx 67,00		
<i>Lamanonia ternata</i>					
Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	358,19474	179,09737	3,86	0,0346 *
Erro	26	1159,9881	46,39952		
Total	28	1518,1829			
Estimativas dos parâmetros					
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t	
Intercepto	-4,60117	12,32586	-0,37	0,7121 ^{ns}	
d	-0,16590	0,09628	-1,72	0,0972 ^{ns}	
hrel	20,07620	13,73405	1,46	0,1563 ^{ns}	
R ² aj 0,1748			Syx 6,81		
<i>Ilex brevicauspis</i>					
Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F

Modelo	2	150,35479	75,17740	11,29	0,0005*
Erro	21	139,80524	6,65739		
Total	23	290,16003			

Estimativas dos parâmetros

Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t
Intercepto	20,94001	8,74284	2,40	0,0260*
d	-0,17790	0,03790	-4,69	0,0001*
hrel	-11,85985	9,37856	1,26	0,2199 ^{ns}

R²aj 0,4723

Syx 2,58

Gymnanthes klotzschiana

Análise de Variância

FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	315,36574	157,68287	4,10	0,0252*
Erro	36	1347,60691	38,50305		
Total	38	1662,97265			

Estimativas dos parâmetros

Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t
Intercepto	13,74305	8,27049	1,66	0,1055 ^{ns}
d	-0,26045	0,09202	-2,83	0,007*
hrel	-2,27318	9,70969	-0,23	0,8163 ^{ns}

R²aj 0,1433

Syx 6,20

Eugenia uruguayensis

Análise de Variância

FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	1075,16346	537,58173	5,15	0,0134*
Erro	25	2610,56974	104,42279		
Total	27	3685,73320			

Estimativas dos parâmetros

Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t
Intercepto	23,13003	17,11891	1,35	0,1888 ^{ns}
d	-0,98113	0,31034	-3,16	0,0041*
hrel	12,09923	19,34568	0,63	0,5374 ^{ns}

R² 0,2350

Syx 10,2187

Vernonia discolor

Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	23,49334	11,74667	1,51	0,2461 ^{ns}
Erro	19	147,70986	7,77420		
Total	21	171,20320			

Estimativas dos parâmetros				
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t
Intercepto	5,18999	7,52537	0,69	0,4987 ^{ns}
d	-0,11525	0,09546	-1,21	0,2421 ^{ns}
hrel	3,49050	5,94905	0,59	0,5643 ^{ns}
R ² aj 0,0464			Syx 2,79	

Cryptocarya aschersoniana

Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	3224,07495	1612,03747	7,96	0,0021 [*]
Erro	26	5060,12577	202,40503		
Total	28	8284,20072			

Estimativas dos parâmetros				
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t
Intercepto	61,78846	28,75212	2,15	0,0415 [*]
d	-1,94317	0,55274	-3,52	0,0017 [*]
hrel	-7,74364	35,61556	-0,22	0,8296 ^{ns}
R ² aj 0,3403			Syx 14,23	

Ilex paraguariensis

Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	1	113,21801	56,60900	0,42	0,6617 ^{ns}
Erro	23	2685,3168	134,26584		
Total	24	2798,5348			

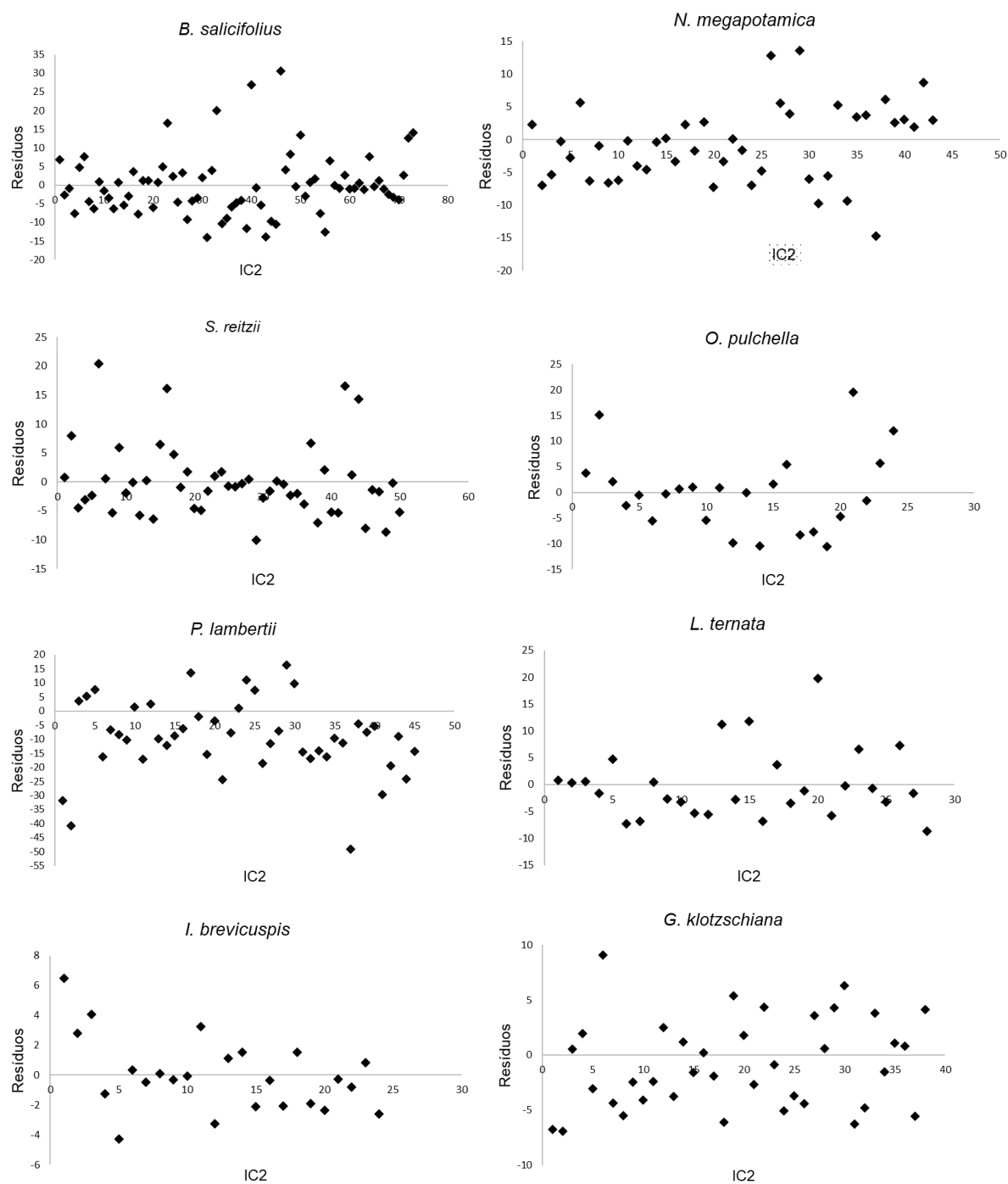
Estimativas dos parâmetros				
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t
Intercepto	31,74646	21,94145	1,45	0,1634 ^{ns}
d	-0,41804	0,50798	-0,82	0,4202 ^{ns}
hrel	-10,09378	21,39843	-0,47	0,6422 ^{ns}

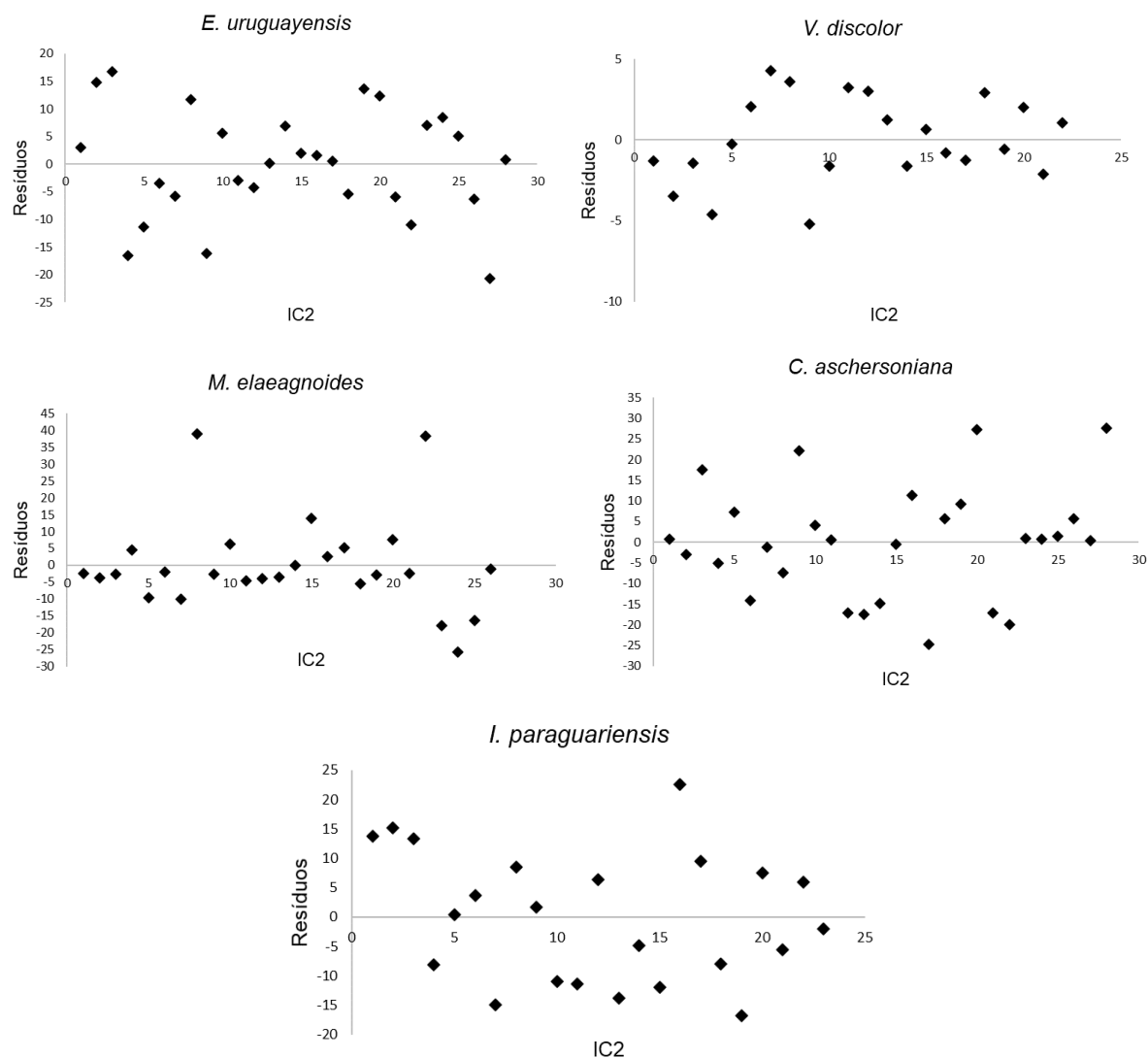
R ² aj -0,05		Syx 11,58			
<i>Matayba elaeagnoides</i>					
Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	F	Pr. >F
Modelo	2	1759,85236	879,92618	4,12	0,0295*
Erro	24	4909,98219	213,47749		
Total	26	6669,83455			
Estimativas dos parâmetros					
Variável	Parâmetro	Erro padrão	Valor de t	Pr. > t	
Intercepto	55,70929	33,02712	1,69	0,1052 ^{ns}	
d	-0,72527	0,34429	-2,11	0,0463 ^{ns}	
hrel	-30,33528	41,01195	-0,74	0,4670 ^{ns}	
R ² aj 0,1998		Syx 14,61			

Fonte: A autora, 2022.

Os resultados demonstrados esclarecem que as equações $IC2 = f(d, hrel)$ não se ajustam aos dados observados, para as espécies *N. megapotamica*, *S. reitzii*, *P. lambertii*, *V. discolor* e *I. paraguariensis*, o ajuste foi não significativo, ou seja, não há regressão para estes dados. Já as espécies *B. salicifolius*, *O. pulchella*, *L. ternata*, *I. brevicuspis*, *G. klotzschiana*, *E. uruguayensis* e *C. aschresoniana*, apresentaram ajuste de $IC2 = f(d, hrel)$ significativos, no entanto, por vezes as variáveis preditoras apresentam valor-p não significativo, demonstrando que as alterações no valor da preditora não estão relacionadas a alterações na variável resposta, sugerindo que as mudanças em altura relativa e diâmetro das árvores não estão associadas a mudanças no IC2. O resultado confirma o já esperado e anteriormente observado, de que, a dimensão atual diâmetro depende da dimensão e condições da copa em anos passados, sendo que o Índice de competição, como descritor da condição atual de competição, não descreve a dimensão atual do diâmetro em florestas estagnadas. Além disso, a maioria das equações possuem valores de R²aj baixos para as medidas de precisão consideradas aceitáveis, bem como, mostram medidas de erro padrão da estimativa elevadas, esclarecendo que os dados estão espalhados por uma ampla gama de valores, conforme visualizado na figura 35, com resíduos sem distribuição aleatória, sendo possível reconhecer alguns padrões.

Figura 35 - Distribuição dos resíduos para os modelos do índice de competição IC2 para as 13 espécies estudadas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula – RS

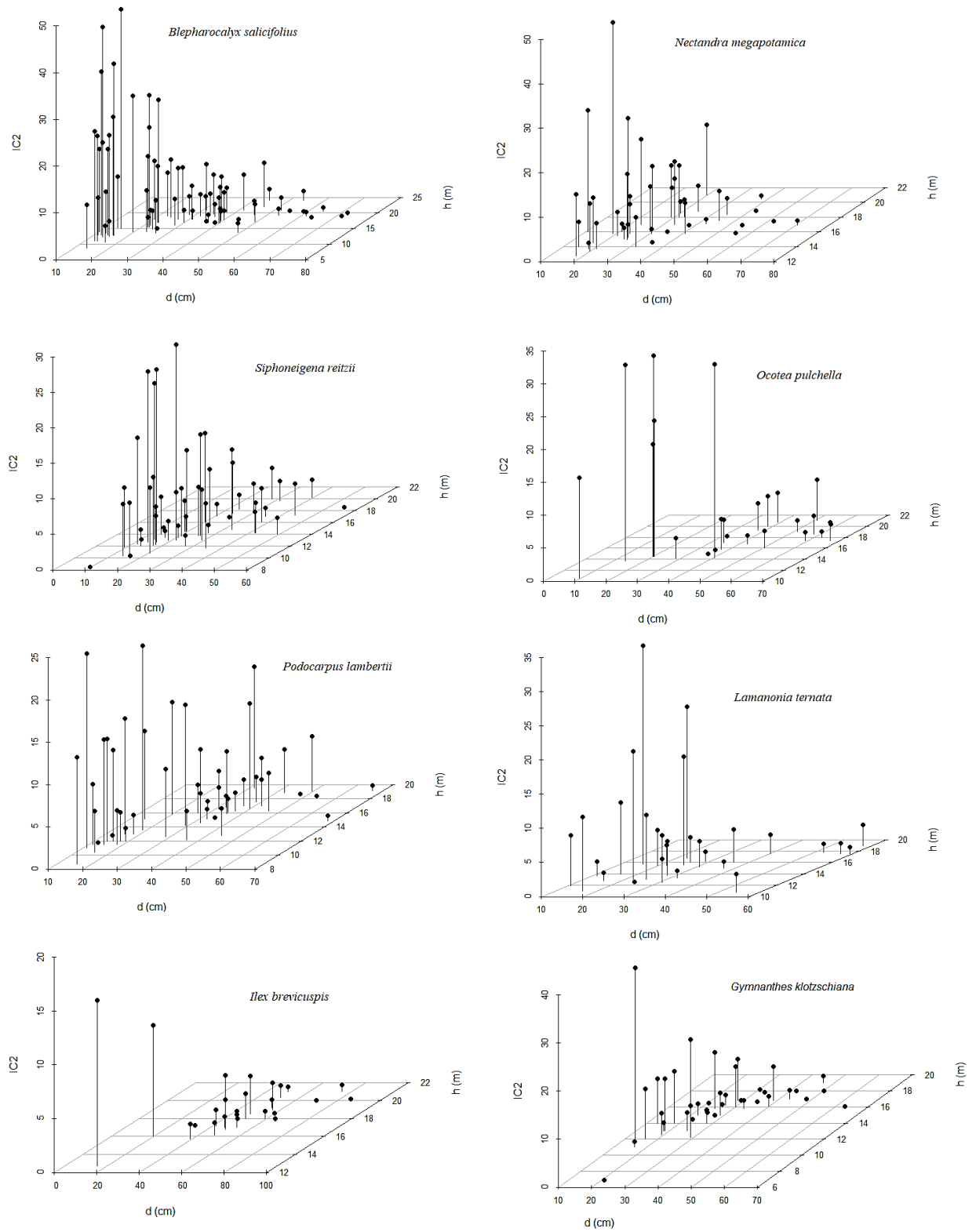


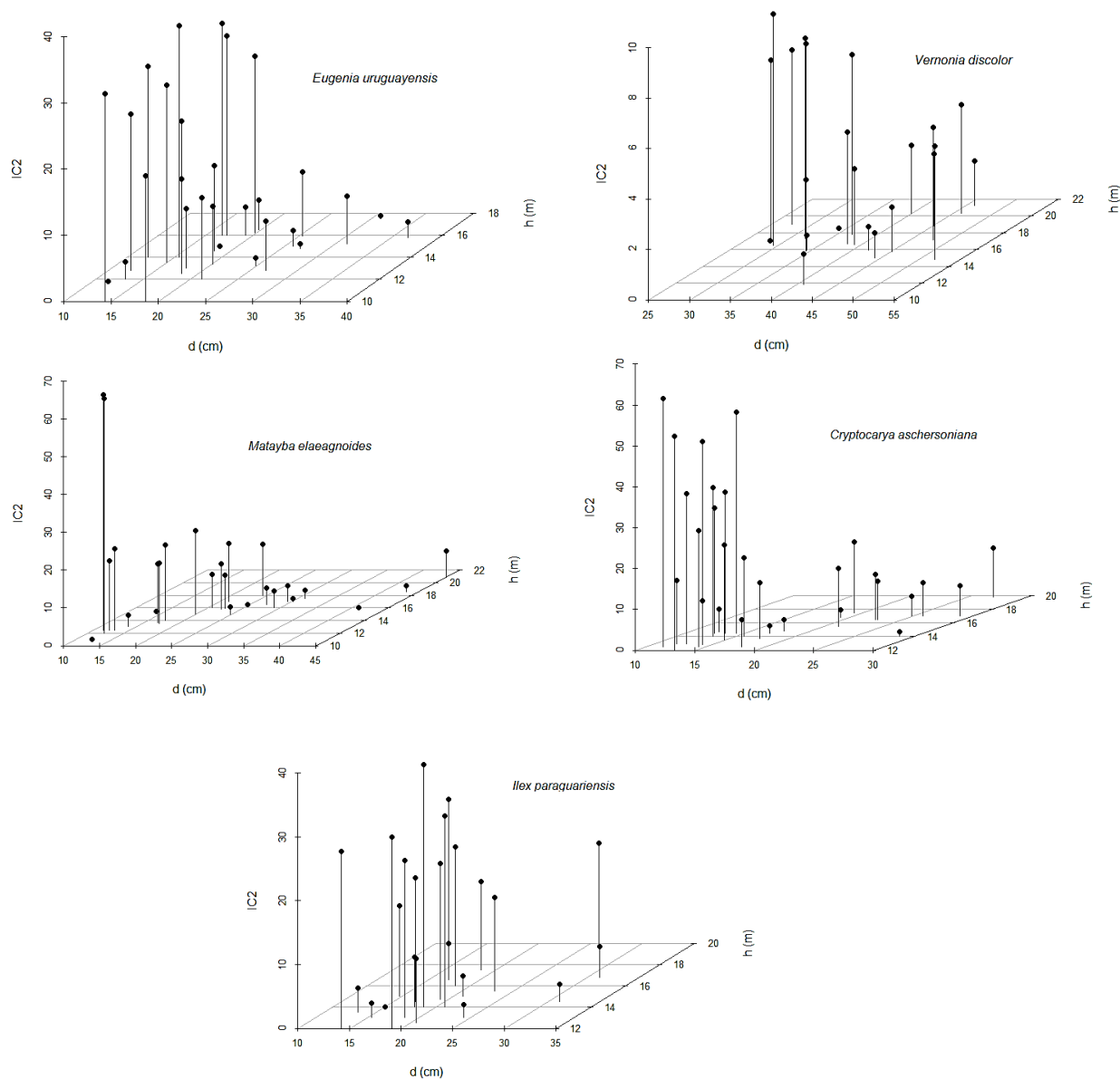


Fonte: A autora, 2022.

A grande variação nos dados descreve árvores sob alto estresse competitivo, que nem sempre refletem a dimensão alcançada pelo d não possibilitando modelar um índice de competição. Esta variação da competição quando confrontada com a altura e diâmetro das árvores, teve distribuição coerente (Figura 36) com os resultados encontrados nos processos de modelagem.

Figura 36 – Distribuição gráfica do índice de competição calculado para cada árvore objetivo do estudo, em relação ao diâmetro a altura do peito e a altura total, São Francisco de Paula, RS, Brasil





Fonte: A autora, 2022.

A análise gráfica mostrou, para uma mesma espécie, fustes de mesmo porte atribuídos a índices de competição diferentes, o mesmo ocorrendo em árvores de espécies diferentes. Por outro lado, ocorrem valores de índices de competição muito próximos em árvores de dimensões completamente diferentes. Por isso, é possível que variáveis relacionadas à copa pudessem esclarecer as táticas usadas pelas espécies e árvores para vencer a competição e sobressair frente às demais, como apontam Canham et al. (2004) ao explicarem o efeito da competição no sombreamento e dimensões da copa, incluindo no modelo de regressão variáveis da copa de *Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg. e do cedro vermelho ocidental (*Thuja plicata* Donn ex D. Don).

Porém, para os dados desse trabalho, não foi possível explicar a competição existente em função destas variáveis, pois com a análise de correlação, confirmada também pela análise visual realizada in loco durante as visitas a campo para coleta de dados, ficou evidente a variação existente entre as características morfométricas das espécies e árvores, evidenciando que a competição é um processo dinâmico e susceptível a perturbações naturais que ocorrem na floresta, sendo estes, os mecanismos que controlam e conduzem os processos de mudanças na comunidade ecológica, os quais possuem efeitos a longo prazo, e prestam um papel fundamental para a dinâmica competitiva.

As árvores que compõem o estrato superior da floresta, principalmente a *A. angustifolia* quando presente, impõem sob as demais um estado de constante busca pelo estabelecimento da copa em posições mais favoráveis para acesso a iluminação. Com isso, no estrato abaixo existe uma aglomeração de copas das diferentes espécies que coexistem pressionadas, fazendo com que assumam variadas e irregulares formas de copas e fustes. Somado a isso, estão as demais condições do ambiente que, em se tratando de florestas nativas, não são controladas, além das questões de tolerância e adaptabilidade das espécies. Esse conjunto de fatores determina a alta variabilidade de características das árvores demonstradas nesse trabalho, caracterizando fragmentos da FOM sem ações sustentáveis de manejo, resultando em uma situação em que a araucária sucumbe sem perspectivas de regeneração natural em número suficiente para seu pleno desenvolvimento nas gerações futuras, mesmo que apresente elevado potencial de crescimento como já demonstrado por tantos autores como Ricken (2014), Costa (2015) e Minatti (2015). Este conjunto de variações, por hora inviabiliza a modelagem matemática das dimensões, do crescimento e da competição das espécies alvos dessa pesquisa.

5 CONCLUSÕES

Os resultados alcançados com o desenvolvimento desta pesquisa permitem as seguintes conclusões:

- a) A composição florística se difere entre as parcelas amostradas, o grupo de espécies de maior valor de importância não é o mesmo para as três parcelas, a densidade da araucária exerce influência nessa composição;
- b) Existe dependência espacial entre os dados do ambiente tornando possível mapeá-los e interpolar valores nas parcelas a partir de semivariogramas teóricos com precisão;
- c) As espécies observadas têm preferências por determinadas características ambientais, essa seletividade influencia a distribuição das árvores no terreno;
- d) O aumento na taxa de mortalidade das espécies está condicionado à baixa vitalidade, sanidade e competição existente no sub-bosque da floresta;
- e) A vitalidade e estabilidade das árvores das 13 espécies, foram explicadas pelos índices morfométricos, evidenciando que existem árvores sucumbindo devido às condições impostas dentro do fragmento, indicando a necessidade de intervenção com técnicas de manejo adequado;
- f) As formas e dimensões das copas das árvores das espécies estudadas são extremamente heterogêneas, no entanto, para algumas das espécies a variável dc apresentou correlação significativa. Dessa forma, são necessárias maiores investigações sobre o arranjo arquitetônico das copas dessas espécies;
- g) As árvores de maior diâmetro estão sob menor nível de competição em comparação às árvores menores. Foi evidente a influência das condições ambientais no comportamento dos índices de competição;
- h) O índice de competição Corona e Ferrara (1989) foi capaz de descrever com concisão a competição existente entre as árvores das 13 espécies;

- i) Não houve regressão para os dados de diâmetro e índice de competição, mesmo com as transformações aplicadas e com as técnicas de MLG, devido a grande variabilidade dos valores, decorrente da floresta nativa com alto grau de concorrência entre árvores;
- j) O uso das técnicas de inteligência computacional, em especial a RNA, são promissoras para o uso em dados complexos advindos de florestas nativas da FOM. Permitiu nesse trabalho reduzir o número de variáveis de entrada sem causar prejuízos para a qualidade de predição da rede, servindo como uma opção para reduzir o esforço amostral, no entanto ainda necessita de maiores investigações para sua validação.

Todas as questões sobre as interrelações das espécies e árvores da Floresta Ombrófila Mista, e sobre a dinâmica do desenvolvimento dessas espécies frente a atual condição dessa tipologia e da espécie que a caracteriza, *A. angustifolia*, encontram-se sem ser esclarecidas. Essa condição poderá ser mudada com a implementação de investigações que venham a considerar o manejo florestal sustentável na prática para a FOM, no Rio Grande do Sul. Dessa forma, a comunidade científica das Ciências Florestais terá acesso ao conhecimento a respeito dos efeitos positivos advindos das práticas do Manejo Florestal Sustentado para as espécies da FOM, ou até mesmo sobre a inexequibilidade dessas premissas, só assim ações corretas para assegurar a continuidade desses ecossistemas serão conhecidas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSMANN E. **The principles of forest yield study**. Oxford: Pergamon Press, 1970. 506 p.

BARBOSA, L. O. **Efeito da competição no incremento em área transversal de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em floresta ombrófila mista, no sul do Brasil**. 2018. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

BARDDAL, M. L. **A influência da saturação hídrica na distribuição de oito espécies arbóreas da floresta ombrófila mista aluvial do rio Iguaçu, Paraná, Brasil**. 2006. Tese (Doutorado) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006

BEGON, M., TOWNSEND, C. R., & HARPER, J. L. (2007). **Ecologia de indivíduos a ecossistemas** (4. ed.). Porto Alegre: Artmed.

BOSCHETTI, W. T. N. et al. Parâmetros dendrométricos e excentricidade da medula em árvores inclinadas de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 781-789, 2015.

BUCHMAN, R. G.; PEDERSON, S. P.; WALTERS, N. R. A tree survival model with application to species of the Great Lakes region. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 13, n. 4, p. 601-608, 1983.

BURKHART, H.E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. Dordrecht: Springer; 2012, 457 p

CANETTI, A.; MATTOS, P. P. de; BRAZ, E. M.; RICKEN, P.; PÉLLICO NETTO, S. Retrospective analysis of competition in a forest remnant: A case study of *Podocarpus lambertii* in the *Araucaria* Forest. **Dendrochronologia**, v. 40, p. 43–49, 2016.

CASTRO, R. V. O.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; MARTINS, F. B.; NOGUEIRA, G. S.; OLIVEIRA, M.; SILVA, F. Competição em nível de árvore individual em uma floresta estacional semidecidual. **Silva Lusitana**, v. 22, n. 1, p. 43-66, mar. 2014.

CANHAM, C. D.; LEPAGE, P. T.; COATES, K. D. A neighborhood analysis of canopy tree competition: effects of shading versus crowding. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 34, p. 778-787, 2004.

CASTRO, R. V. O.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; MARTINS, F. B.; NOGUEIRA, G. S.; ROMARCO, M. L. O. Artificial neural networks effectiveness to estimate mortality in a Semi-deciduous Seasonal Forest. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, Amman, v. 9, p. 435-444, 2015.

CHASSOT, T.; FLEIG, F. D. Modelagem do incremento diamétrico para árvores individuais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 1128–1141, 2018.

CHASSOT, T.; FLEIG, F. D.; FINGER, C. A. G.; LONGHI, S. J. Modelos de crescimento em diâmetro de árvores individuais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em floresta ombrófila mista. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p. 303–313, 2011.

CORONA, P.; FERRARA, A. Individual competition indices for conifer plantations. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 27, n. 1-4, p. 429-437, 1989.

COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G.; FLEIG, F. D. Influência da posição social nas relações morfométricas de *Araucaria angustifolia*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 1, p. 225-234, 2016.

COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G.; HESS, A. F. Modelo de incremento em área basal para árvores de araucária de uma floresta inequiana. **Pesquisa Florestal Brasileira**. Colombo, v. 35, n. 83, p. 239-245, 2015.

COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G. Efeito da Competição nas Relações Dimensionais de Araucária. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 1-11, 2017.

COSTA, E. A. **Influência de variáveis dendrométricas e morfométricas no incremento diamétrico de *A. angustifolia* (Bertol.) Kuntze, Lages, SC.** Dissertação (Mestrado). 148f. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS. 2011.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, 1991.

CUBAS, R.; WATZLAWICK, L. F.; FIGUEIREDO FILHO, A. Incremento, ingresso, mortalidade em um remanescente de Floresta Ombrófila Mista em Três Barras – SC. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 3, p. 889-900, 2016.

CUNHA, T. A. (2009). **Modelagem do incremento de árvores individuais de *Cedrela odorata* L. na Floresta Amazônica**. Dissertação (Mestrado). 88f. Universidade Federal de Santa Maria Santa Maria – RS. 2011.

DIONISIO, L. S. F. et al. Caracterização morfométrica de árvores solitárias de *Bertholletia excelsa* H.B.K. no sudeste de Roraima. **Revista Agroambiente**, v. 11, n. 2, p. 163-173, 2017.

DANIELS, R. F, BURKHART, H. E., CLASON, T. R., A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 16, .6, p. 1230-1237, 1986.

DIAMANTOPOULOU, M. J.; OZÇELIK, R.; CRECENTE-CAMPO, F.; ELER, U. Estimation of Weibull function parameters for modelling tree diameter distribution using least squares and artificial neural networks methods. **Biosystems Engineering**, Bedford, v. 133, p. 33–45, 2015.

DURLO M. A. Relações morfométricas para *Cabralea canjerana* (Well.) Mart. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 141 – 150, 2001.

DURLO M. A, DENARDI L. Morfometria de *Cabralea canjerana* em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul, **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.8, n.1,1998, p.55-66, 1998.

EBLING, A. A. et al. Alterações florísticas e estruturais em floresta com araucária no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Agrarian Academy**, Goiânia, v.1, n.01; p.1-27, 2014.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de pesquisa Agropecuária - CNPS. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: 2011. 225 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de pesquisa Agropecuária - **Sistema brasileiro de classificação dos solos**. Brasília, 2012. 418 p.

ERDMANN, A. A. **Fatores que influenciam a dinâmica florestal após exploração de madeira na Amazônia brasileira**. 2019. 195 F. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2019.

FACELI, K.; LORENA, A. C.; GAMA, J.; CARVALHO, A. C. P. L. F. **Inteligência artificial: uma abordagem de aprendizado de máquina**. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 378p

FERREIRA, R. L. C. **Estrutura e dinâmica de uma floresta secundária de transição, Rio Vermelho e Serra Azul de Minas, MG**. 1997. 208 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

FIGUEIREDO FILHO, A. et al. Crescimento, mortalidade, ingresso e distribuição diamétrica em Floresta Ombrófila Mista. **Floresta**, Curitiba, v. 4, n.4, p. 763–776, 2010.

FOLI, E. G.; ALDER, D.; MILLER, H. G.; SWAINE, M. D. Modelling growing space requirements for some tropical forest tree species, **Forest Ecology and Management**, v. 173, p. 79-88. 2003.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. Methods of soil analysis. 2ed. Madison: ASA and SSSA, p.383-409, 1986.

GLOVER, G. R., HOOL, J. N. A basal area ratio on predictor of loblolly pine plantations mortality. **Forest Science**, v. 25, n. 2, p. 275-282, 1979.

GOLDSMITH, F. B.; HARRISON, C. M. Description and analysis of vegetation. In: CHAPMAN, S.B. **Methods in plant ecology**. London: Blackwell Scientific, p.85-155, 1976.

GUERRA, M. P.; MANTOVANI, N. S. A.; NODARI, R. O.; REIS, M. S.; SANTOS, K. L. Araucária: evolução, ontogênese e diversidade genética. In: BARBIERI, R. L.; STUMPF, E. R. T. **Origem e evolução de plantas cultivadas**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008.

HEGYI F. A simulation model for managing jack-pine stands. In: Fries G, editor. Growth models for tree and stand population. Stockholm: Royal College of Forestry, p. 74-90, 1974.

HESS, F. A.; MINATTI, M.; FERRARI, L.; PINTRO, B. A. Manejo de floresta ombrófila mista pelo método de liocourt, município de Painel, SC. *Cerne*, v. 20, n. 4, p. 575 – 580, 2014.

HUSCH, B.; MILLER, C.I.; BEERS, T.W. **Forest Mensuration**. 3ª ed. New York: John Wiley & Sons, 1982, 402 p.

IVANOV, G. B. **Influência de variáveis dendrométricas, anatômicas e ambientais na produção de frutos e sementes de *Bertholletia excelsa* H.B.K.** 2011. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria.

KEDDY, P.A. **Competition**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.2001.

KEIL, S. S. Propriedades físicas do solo e desenvolvimento da Araucaria angustifolia (Bert.) O. Ktze. 1989. 81 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1989.

KLEIN, D. R. Morfometria e crescimento diamétrico de Araucaria angustifolia (Bertol.) Kuntze no planalto sul catarinense. 2017. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2017.

KOENKER, R.; BASSETT, G. **Regression quantiles**. *Econométrica*, v. 46, 1978.

LAMBRECHT, F. R.; BALBINOT, R.; MATTOS, P. P. de; BRAZ, E. M.; TRAUTENMÜLLER,

J. W.; CANETTI, A. Competição em floresta natural de araucária na região noroeste do Rio Grande do Sul-Brasil. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 121, p. 131–138, 2019.

LASSERE, S. R; VAIRETTI, M.; LASSERE, E. N. de. Crecimiento de *Araucaria angustifolia* (Bertol) O. Kuntze., en distintos tipos de suelos de Puerto Piray, Misiones. **IDIA: Suplemento Forestal**, n. 7, p. 36-45, 1972.

LEDERMANN, T. Evaluating the performance of semi-distance-independent competition indices in predicting the basal área growth of individual trees. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 40, p. 796-805, 2010.

LEDUC, D. J; MATNEY, T. G.; BELLI, K. L.; BALDWIN, V. C. Predicting diameter distributions of longleaf pine plantations: a comparison between artificial neural networks and other accepted methodologies. **USDA Forest Service, Southern Reserach Station**, v. 25, 2001.

LISBOA, S. G. **Dinâmica, competição e distribuição espacial em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista**. 2014. 224f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

LOPES, L. I; et al. Aplicação de técnicas de regressão linear e aprendizagem de máquinas na predição da altura total de árvores de *Eucalyptus* spp. In: OLIVEIRA, J. R. **Silvicultura e Manejo Florestal Técnicas de Utilização e Conservação da Natureza**. Belo Horizonte: Editora Científica Digital, 2021. p. 29-43.

LORIMER, C. G. Tests of age independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. **Forest Ecology and Management**, v. 6, n. 4, p. 343-360, 1983.

MAEDA, E. E.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARCOVERDE, G. F. B.; HANSEN, M. C. Predicting forest fire in the Brazilian Amazon using MODIS imagery and artificial neural networks. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, V. 11, n. 4, p. 265–272, 2009

MARTINS, D. A. P. **Restauração de áreas degradadas por exploração mineral no Planalto Catarinense**. 2017. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina.

MENDONÇA, N. P; CARVALHO, M. C; GOMIDE, L. R; FERRAZ, A. C; FERREIRA, M. A. Previsão de diâmetros ao longo do fuste de eucalipto via redes neurais artificiais. **Enciclopédia Biosfera**, Jandaiaa, GO, v. 11, n. 22, p. 2419-2429, 2015.

MINATTI, M. **Dendrocronologia aplicada na geração de modelos de crescimento biométricos e ambientais para *Araucaria angustifolia* na fitorregião do planalto serrano, SC**. 2015. 140p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade do Estado de Santa Catarina – Lages, 2015.

MINATTI, M. **Dinâmica e modelagem de crescimento em nível de árvores individuais dependente e independente da distância em Floresta Ombrófila Mista no Paraná**. 2019.

131p. Tese (Doutorado em ciências florestais) - Universidade Federal do Paraná – Curitiba, 2019.

MINSKY, M. **Semantic information processing**. Cambridge: The MIT Press, 1968.

MONTAÑO, R. A. N. R. **Aplicação de Técnicas de Aprendizado de Máquina na Mensuração Florestal**. 2016. 102 f. Tese – (Doutorado em Informática). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

MUGASHA AG. Evaluation of simple competition indices for the prediction of volume increment of young jack pine and trembling aspen trees. **Forest Ecology and Management**, v. 26, n. 3, p. 227-235, 1989.

MÜLLER–DOMBOIS, D.; ELLENBERG, H. **Aims and methods of vegetation ecology**. New York: Willey & Sons, 1974, 547 p.

KUPLICH, T. M. Classifying regenerating forest stages in Amazônia using remotely sensed images and a neural network. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 234, n. 1–3, p. 1–9, 2006.

OLIVEIRA, R. B.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C.; PASSOS, R. R.; SILVA, S. A.; SILVA, A. F. Comparação entre métodos de amostragem do solo para recomendação de calagem e adubação do cafeeiro conilon. **Engenharia Agrícola**, v.28, n.1, p.176-186, 2008.

ORELLANA, E.; FIGUEIREDO FILHO, A.; PÉLLICO NETTO, S.; VANCLAY, J. K. A distance - independent individual-tree growth model to simulate management regimes in native Araucaria forests. **Journal of Forest Research**, v. 22, n. 1, p. 30– 35, 2017.

ORSO, G. A. **Comportamento de índices de competição e estimativa do incremento diamétrico de um fragmento de floresta ombrófila mista**. 2020. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

PADOIN, V.; FINGER, C. A. G. Relações entre as dimensões da copa e a altura das árvores dominantes em povoamentos de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 95-105, 2010.

PEREIRA, L. D. **Dendroecologia de *Cedrela fissilis* (Vell.) na região de Santa Maria, RS**. 2011. 63 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

PENG, C. Growth and yield models for uneven-aged stands: past, present and future.

Forest Ecology and Management, v. 132, p. 259–279, 2000.

PRETZSCH, H. **Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model**. Springer, Berlin, 2009.

PRETZSCH, H. Perspektiven einer modellorientierten Waldwachstumsforschung

Forstwissenschaftliches Centralblatt, v. 114, p. 188-209, 1995.

PUKALA, T., & KOLSTRÖM, T. Competition indices and the prediction of radial growth in Scots pine. *Silva Fennica*, v. 21, p. 55-67, 1987.

RICKEN, P.; HESS, A. F.; BORSOI, G. A. Relações biométricas e ambientais no incremento diamétrico de *Araucaria angustifolia* no planalto serrano catarinense. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 4, p. 1592–1603, 2018.

REZENDE, S. O. **Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações**. Manole, Barueri, Brasil.

REIS, P. L. **Modelagem de floresta inequidiana: redes neurais artificiais aplicadas em uma floresta manejada no leste da Amazônia**. 2017. 91 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

RICKEN, P. **Incremento, espaço horizontal e competição em povoamento natural de *Araucaria angustifolia* no Planalto Catarinense**. 2014. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal – Área: Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina.

ROMAN, M.; BRESSAN D. A.; DURLO, M. A. Variáveis morfométricas e relações interdimensionais para *Cordia trichotoma* (Vell.) Arráb. ex Steud. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 4, p. 473-480, 2005.

ROSSI, L. M. B. **Processo de difusão para simulação da dinâmica de Floresta Natural**. Curitiba, 2007. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

ROUVINEN, S.; KUULUVAINEN T. Structure and asymmetry of tree crowns in relation to local competition in a natural mature Scots pine forest. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 27, n. 6, p. 890-902, 1997.

ROVEDA, M. **Geoestatística aplicada a inventários florestais e atributos do solo em Floresta Ombrófila Mista**. Curitiba, 2018. 152 f. (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **The Artificial Intelligence**. Prentice Hall Press, Upper Saddle River, NJ, USA, 3rd Editions, 2010.

SANTOS, F. N. K.; RODE, R.; ANDRADE, C. F. D.; CORRÊA, S. K. K.; LOPES, S. S. L. Ajuste de equações volumétricas e redes neurais artificiais na estimativa do volume de

Tauari na Floresta Nacional do Tapajós. **Revista Agroecossistemas**, v. 10, n. 1, p. 1-17, 2018.

SANTOS, J. J.; ROCHA, F. S. J. W.; SOUZA, M. T. D.; SILVA, B. A.; SANTOS, B. M. S. Modelagem geoestatística dos elementos maiores do solo em Feira de Santana – BA, Brasil. **Physis Terrae**, v. 2, n. 1, p. 63-86, 2020.

SAS INSTITUTE. **Statistical analysis system 2004**: versão 9.1 Cary, USA. 2004.

SCHONS, T. C.; FIGUEIREDO FILHO, A.; SANTOS, L. T.; NASCIMENTO, M. G. R. Índices de competição em nível de árvore individual para espécies da Floresta Ombrófila Mista. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, p. 1-14, 2020.

SCHUTZER, D. **Artificial intelligence: an applications-oriented approach**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1987.

SCOLFORO, H.F.; SCOLFORO, J.R.S.; MELLO, J.M; MELLO, C.R. & MORAIS, V.A. Spatial interpolators for im-proving the mapping of carbon stock of the arboreal vegetation in Brazilian biomes of Atlantic forest and Savanna. **Forest Ecology and Management**, vol. 376, p. 24–35, 2016.

SCHIKOWSKI, A. B. **Estimativa do volume e da forma do fuste utilizando técnicas de aprendizado de máquina**. 2016, 71 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Curitiba, 2016.

SHANG, C. et al. Estimating stem diameter distributions in a management context for a tolerant hardwood forest using ALS height and intensity data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 43, n. 1, p. 79–94, 2017.

SHEIL, D.; BURSLEM, D. F. R. P.; ALDER, D. The interpretation and misinterpretation of mortality rate measures. **Journal of Ecology**, London, v. 83, n. 2, p. 331-333, 1995.

SILVA, C. A. et al. Predicting stem total and assortment volumes in an industrial Pinus taeda L. forest plantation using airborne laser scanning data and random forest. **Forests**, v. 8, n. 7, p. 1–17, 2017. 38.

SILVA, J. P. M. et al. Computational techniques applied to volume and biomass estimation of trees in Brazilian savanna. **Journal of Environmental Management**, v. 249, n. February, p.

109368, 2019.

SILVA, F. A.; FORTES, F. O.; RIVA, D.; SCHORR, L. P. B. Caracterização de índices morfométricos para *Araucaria angustifolia* plantada na região norte do Rio Grande do Sul. **Advances in Forestry Science**, v. 4, n. 3, p. 143–146, 2017.

SILVEIRA, B. D; FLORIANO E. P.; NAKAJIMA, N. Y.; HOSOKAWA, R. T.; ROSOT, N. C.; GRACIOLI, C. R. Relação da morfometria e competição com o crescimento de *Trichilia clausenii* em um fragmento de Floresta Semidecidual, RS. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 45, n. 2, p. 373 – 382, 2015.

SCHIKOWSKI, A. B, CORTE, A. P. D, SANQUETTA, C. R. Estudo da forma do fuste utilizando redes neurais artificiais e funções de afilamento. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 35, n. 82, p. 119-127, 2015.

SOTHE, C.; LIESENBERG, V.; ALMEIDA, M. C.; SCHIMALSK, B. M. abordagens para classificação do estágio sucessional da vegetação do Parque Nacional de São Joaquim empregando imagens Landsat-8 e Rapideye. **Bulletin of Geodetic Science**. Curitiba, v. 23, nº3, p.389 - 404, 2017.

SU, Y.; MA, Q.; GUO, Q. Fine-resolution forest tree height estimation across the Sierra Nevada through the integration of spaceborne LiDAR, airborne LiDAR, and optical imagery. **International Journal of Digital Earth**, v. 10, n. 3, p. 307–323, 2017.

STERBA, H. **Forstliche Ertragslehre**. Universität für Bodenkultur. Wien, 1992, 160p.

TÉO, S. J.; FIGUEIREDO FILHO, A.; LINGNAU, C. Análise espacial do estresse competitivo, incremento diamétrico e estrutura de uma floresta ombrófila mista, Irati, PR. **Floresta**, v. 45, n. 4, p. 681–694, 2015.

TETTO, A. F.; SANQUETTA, C. R. Estrutura etária e padrões de crescimento em uma floresta natural com *Araucaria angustifolia* (BERT.) O. KTZE., no Estado do Paraná. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE ECOSSISTEMAS FLORESTAIS, 4., Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte : [s.n], 1996. p.227-228.

TILMAN, D. Competition and biodiversity in spatially structured habitats. **Ecology**, v. 75, p. 2-16, 1994.

TONINI, H.; ARCO-VERDE, M. F. Morfologia da copa para avaliar o espaço vital de quatro espécies nativas da Amazônia. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.40, n.7, p.633-638, 2005.

VALENTE, O. E.; VALENTE, S. F. G. Simulação de redes neurais artificiais para estimativa de volume de madeira florestal a partir do DAP. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**. Curitiba, v.4, n.3, p.3748-3757, 2021.

VANCLAY, J. K. **Techniques for modelling timber yield from indigenous forests with special reference to Queensland**. 1983. 194 f. Dissertation (Master of Science in Forestry) - Linacre College, Oxford University, Oxford, 1983.

VATRAZ, S.; SILVA, M. N. J.; ALDER, D. Competição versus crescimento de árvores em Floresta Ombrófila Densa no estado do Amapá – Brasil. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 1118-1127, 2018.

VUADEN, E. **Morfometria e crescimento de *Cordia trichotoma* (Vell.) Arráb. ex Steud na região central do Rio Grande do Sul**. 2013. 101 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

WANG, L. et al. Estimation of biomass in wheat using random forest regression algorithm and remote sensing data. **Crop Journal**, v. 4, n. 3, p. 212–219, 2016.

WEBER, V. P.; FINGER, C. A. G.; COSTA, E. A.; ZIMMERMANN, A. P. L.; LONGHI, R. V. Modelagem linear generalizada para descrever o incremento em área transversal de árvores individuais de Imbuia. **Floresta**, v. 48, n. 1, p. 123–132, 2018.

WEISKITTEL, A. R., HANN, D. W., KERSHAW, J. A., & VANCLAY, J. K. **Forest growth and yield modeling**. Oxford: Wiley-Blackwell, 2011.

WERE, K. et al. A comparative assessment of support vector regression, artificial neural networks, and random forests for predicting and mapping soil organic carbon stocks across an Afromontane landscape. **Ecological Indicators**, v. 52, p. 394–403, 2015.

ZHAO, D., BORDERS, B., WILSON, M. Individual-tree diameter growth and mortality models for bottomland mixed-species hardwood stands in the lower Mississippi alluvial valley. **Forest Ecology and Management**, v. 199, n. 3, p. 307-322, 2004.