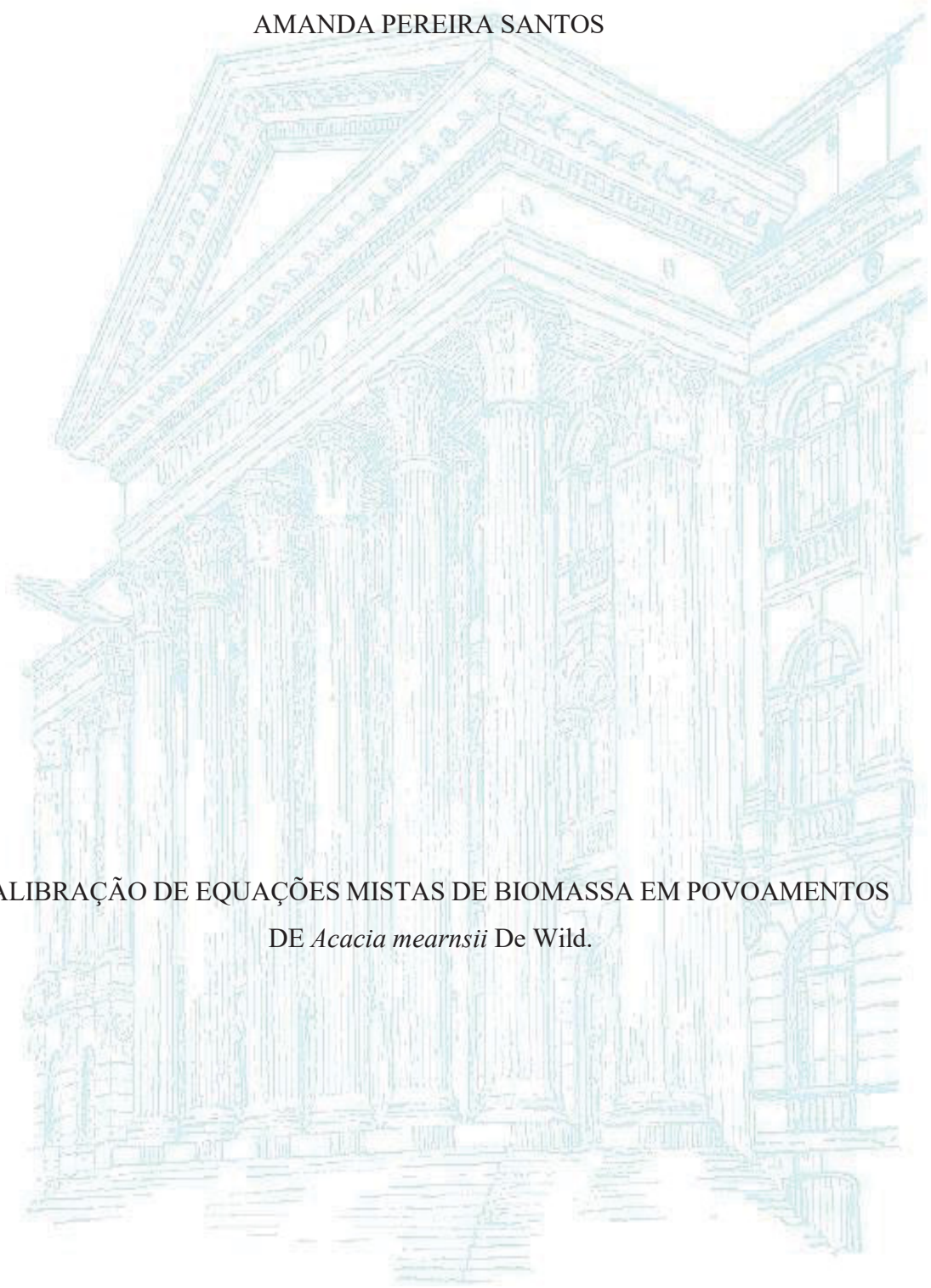
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

AMANDA PEREIRA SANTOS



CALIBRAÇÃO DE EQUAÇÕES MISTAS DE BIOMASSA EM POVOAMENTOS DE *Acacia mearnsii* De Wild.

CURITIBA

2022

AMANDA PEREIRA SANTOS

CALIBRAÇÃO DE EQUAÇÕES MISTAS DE BIOMASSA EM POVOAMENTOS DE *Acacia mearnsii* De Wild.

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de concentração de Manejo Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Behling

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta
Prof. Dr. Henrique Soares Koehler

CURITIBA

2022

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Santos, Amanda Pereira
Calibração de equações mistas de biomassa em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild. / Amanda Pereira Santos. – Curitiba, 2022.
1 recurso on-line : PDF.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Behling
Coorientadores: Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta
Prof. Dr. Henrique Soares Koehler
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 04/02/2022.
Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Biomassa florestal - Modelos matemáticos. 2. Equações. 3. Acacia. 4. Amostragem. 5. Teses. I. Behling, Alexandre. II. Sanquetta, Carlos Roberto. III. Koehler, Henrique Soares. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9
CDU – 634.0.548

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1160

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **AMANDA PEREIRA SANTOS** intitulada: **CALIBRAÇÃO DE EQUAÇÕES MISTAS DE BIOMASSA EM POVOAMENTOS DE Acacia mearnsii De Wild.**, sob orientação do Prof. Dr. ALEXANDRE BEHLING, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 04 de Fevereiro de 2022.

Assinatura Eletrônica
07/02/2022 10:43:02.0
ALEXANDRE BEHLING
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
07/02/2022 09:54:09.0
JULIO EDUARDO ARCE
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
07/02/2022 13:01:51.0
JONATHAN WILLIAM TRAUTENMÜLLER
Avaliador Externo (null)

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.
Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 145958
Para autenticar este documento/assinatura, acesse https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp e insira o codigo 145958

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná (UFPR) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal (PPGEF) pela grande oportunidade de crescimento pessoal e profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos bolsa de estudos e por permitir a minha dedicação diária no projeto de pesquisa desenvolvido.

Ao meu orientador Professor Dr. Alexandre Behling, pelos ensinamentos e paciência para trilhar esse caminho comigo em meio a todos os desafios impostos, tenho certeza que esse trabalho não seria possível sem seu apoio, dedicação e compreensão.

Aos meus coorientadores professores Dr. Carlos Roberto Sanquetta e Dr. Henrique Soares Koehler pelos ensinamentos compartilhados e contribuições ao trabalho.

Ao Professor Dr. Sylvio Péllico Netto, pelas consideráveis contribuições ao longo do trabalho.

A todos os professores das disciplinas que cursei durante os dois anos, pelo esforço, dedicação e por cumprirem com maestria os desafios exigidos nas aulas remotas durante a pandemia.

Aos companheiros de laboratório de manejo florestal que, apesar do impedimento em compartilhar histórias e experiências devido à pandemia, sempre estiveram presentes virtualmente e foram extremamente acolhedores e solícitos nos poucos momentos presencias que compartilhamos.

À empresa TANAGRO / TANAC S.A. pela disponibilização dos dados, pois sem ela não seria possível realizar o presente trabalho.

Aos meus pais, Aparecida e Célio, que me criaram com zelo e amor e se esforçaram muito para me oferecer oportunidades como essa.

À minha irmã Priscila, pela compreensão e pelos conselhos e à minha afilhada Maria Luiza, por me mostrar o significado de grandeza mesmo sendo pequena.

À minha madrinha Mariana e a Nathália (madrinha de coração) pelos incentivos e por serem minha inspiração para seguir a vida acadêmica.

Meus sinceros agradecimentos a todos que fizeram parte dessa caminhada e que continuemos a trocar experiências.

"Verdadeiramente o que mais prazer me proporciona, não é o saber, mas o estudar, não a posse, mas a conquista, não o estar aqui, mas o chegar além."

Carl Friedrich Gauss

RESUMO

Conjuntos de dados de biomassa têm sido estabelecidos com a finalidade de ajustar equações. Esses dados foram obtidos em diversos povoamentos florestais e constituem uma importante fonte de informação dos locais. Na presente pesquisa, foi discutido como é possível utilizar a informação já existente para calibrar equações de biomassa em novos povoamentos florestais, a partir de um número reduzido de árvores amostradas. Assim, foram estabelecidas as seguintes questões: i) as estimativas das equações calibradas são comparáveis com às obtidas pelo método tradicional (conjunto de dados específico para um povoamento)? ii) quais são os níveis da estrutura hierárquica (povoamento ou povoamento e parcela) que devem ser estabelecidos na calibração de equações? iii) quantas e quais árvores são necessárias para calibrar as equações de biomassa em novos povoamentos? O objetivo geral da pesquisa foi calibrar a equação de Schumacher-Hall para a estimativa de biomassa, de árvores de acácia-negra, por meio da modelagem mista e comparar os resultados com a equação ajustada pelo método tradicional (conjunto de dados específico para um povoamento). A calibração das equações foi testada nos níveis: i) povoamento e ii) povoamento e parcela. Adicionalmente, foi avaliado o tamanho da amostra de árvores e a forma de seleção dessa para a calibração de equações mistas. Para o desenvolvimento da modelagem foram utilizados dados oriundos de plantios de acácia-negra no estado do Rio Grande do Sul, obtidos em duas etapas de medições. A amostra da primeira etapa foi constituída de 670 árvores e 12 povoamentos de 1 a 10,75 anos e a segunda de 79 árvores e 6 povoamentos entre 2 a 7 anos. A calibração das equações mistas, considerando o nível povoamento (como efeito aleatório), possibilitou a obtenção de estimativas próximas às obtidas pelo método tradicional, entretanto, com uma redução considerável do número de árvores amostradas nos novos povoamentos. A calibração das equações para dois níveis (povoamento e parcela como efeitos aleatórios) não revelou ganhos consideráveis na acurácia, evidenciando a necessidade de calibrar equações somente em nível de povoamento. Nas duas abordagens de níveis testadas, o tamanho da amostra selecionada para a calibração foi de duas árvores, sendo as duas maiores em diâmetro à altura do peito, considerando as estatísticas de ajuste das equações e também o custo benefício da operação de mensuração. As estimativas das equações calibradas são comparáveis com às obtidas pelo método tradicional. Apenas o nível povoamento deve ser considerado na calibração das equações e são necessárias as duas maiores árvores em relação ao diâmetro à altura do peito. Com essa proposta, para um novo povoamento florestal, foi possível obter resultados de equações de biomassa semelhantes ao método tradicional (mensuração em média de 50 árvores), promovendo uma redução de amostragem 96%.

Palavras-chave: Efeitos aleatórios. EBLUP. Amostragem de árvores. Biomassa.

ABSTRACT

Biomass data sets have been established with the purpose of fitting equations. These data have been obtained from a variety of forest stands and are an important source of information. In the present study, it was discussed how it is possible to use the available data to calibrate biomass models in new forest stands, based on a reduced number of sampled trees. Thus, the following issues were established: i) the estimates of the calibrated equations are comparable with those obtained using the traditional method (stand-specific data set)? ii) which levels of the hierarchical structure (stand or stand and plot) should be established in the calibration equations? iii) how many and which trees are needed for calibrating biomass equations in new stands? The overall objective of the study was the calibrating of Schumacher-Hall's equation to estimate the biomass of black acacia trees using mixed modeling and comparing the results with the equation fitted by the traditional method (specific data set for one stand). The calibrated model was tested at the following levels: i) stand and ii) stand and plot. Additionally, the size of the sample of trees and the way to select them for the mixed model calibration was evaluated. For the modeling process, data from acacia stands in the state of Rio Grande do Sul, obtained in two sampling campaigns, were used. The sample of the first campaign consisted of 670 trees and 12 stands of 1 to 10.75 years and the second of 79 trees and 6 stands of 2 to 7 years. The mixed model calibrated considering the stand level (as a random effect) allowed us to obtain estimates close to those obtained by the traditional method, however, with a considerable decrease in the number of trees sampled in the new stands. The two-level calibration of the model (population and plot as random effects) did not reveal considerable gains in accuracy, indicating the necessity to calibrate models only at the population level. In the two-level approaches tested, the sample size selected for calibrating was two trees, the two largest in relation to diameter at breast height, considering the fit statistics of the equations and also the cost benefit of the measuring operation. The estimates of the calibrated equations are comparable to those obtained by the traditional method. Only the stand level should be considered in the calibration of the equations and the two largest trees in reference to diameter at breast height are required. With this proposal, for a new forest stand, it was possible to obtain biomass estimation results similar to the traditional method (average measurement of 50 trees), promoting a 96% sampling decrease.

Keywords: Random effects. EBLUP. Tree sampling. Biomass.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – EXEMPLO DA CALIBRAÇÃO DA EQUAÇÃO DE BIOMASSA 18
FIGURA 2 – ÁREA DE CULTIVO DE ACÁCIA-NEGRA NAS REGIÕES DE CRISTAL, ENCRUZILHADA DO SUL E PIRATINI, NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL 29
FIGURA 3 – PARCELA CIRCULAR DA ETAPA DE MEDIÇÃO DE 670 ÁRVORES INSTALADA NOS POVOAMETNOS DE ACÁCIA-NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL 30
FIGURA 4 – RESUMO DOS MÉTODOS UTILIZADAS NA PRIMEIRA ABORDAGEM (EM NÍVEL DE POVOAMENTO), APRESENTANDO A DIVISÃO DOS DADOS E OS MÉTODOS DE AJUSTES DAS EQUAÇÕES DE BIOMASSA PARA PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL 41
FIGURA 5 – RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS dap (CM), h (M) E $d2h$ (M³) COM OS GRUPOS DE IDADE E DISPERSÃO DA BIOMASSA NOS GRUPOS DE IDADE COM A VARIÁVEL COMBINADA ($d2h$), PARA A PRIMEIRA ETAPA DE MEDIÇÃO (670 ÁRVORES), ORIUNDOS DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL 43
FIGURA 6 – RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS dap (CM), h (M) E $d2h$ (M³) COM AS IDADES E DISPERSÃO DA BIOMASSA NAS IDADES COM A VARIÁVEL COMBINADA ($d2h$), PARA A SEGUNDA ETAPA DE MEDIÇÃO (79 ÁRVORES), ORIUNDOS DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL 44
FIGURA 7 – VARIAÇÃO DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO TRADICIONAL ($\beta 0$, $\beta 1$ E $\beta 2$) AO LONGO DOS POVOAMENTOS PARA A PRIMEIRA ETAPA DE MEDIÇÃO (670 ÁRVORES) DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL 45
FIGURA 8 – VARIAÇÃO DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO TRADICIONAL ($\beta 0$, $\beta 1$ E $\beta 2$) AO LONGO DOS GRUPOS DE POVOAMENTOS E PARCELAS PARA A BASE DE DADOS DE AJUSTE (600 ÁRVORES) DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL 48
FIGURA 9 – VARIAÇÃO DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO MISTA CALIBRADA 2A ($b0$, $b1$ E $b2$) NOS POVOAMENTOS PARA A PRIMEIRA ETAPA DE MEDIÇÃO (670 ÁRVORES) DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL 52
FIGURA 10 – DISPERSÃO DA BIOMASSA OBSERVADA (KG) E DAS BIOMASSAS ESTIMADAS (KG) PELO MÉTODO TRADICIONAL, PELO EFEITO FIXO E PELA EQUAÇÃO MISTA CALIBRADA COM A VARIÁVEL COMBINADA d^2h (M³) DA SEGUNDA ETAPA DE MEDIÇÃO (79 ÁRVORES) EM CADA POVOAMENTO DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL 53

FIGURA 11 – GRÁFICOS DE RESÍDUOS DAS EQUAÇÕES TRADICIONAL (TESTEMUNHA), DO EFEITO FIXO E DA EQUAÇÃO CALIBRADA PARA OS DADOS DAS 79 ÁRVORES NOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL 54
FIGURA 12 – LIMITES DE CONCORDÂNCIA PARA A COMPARAÇÃO ENTRE A BIOMASSA OBSERVADA E ESTIMADA PELO MÉTODO TRADICIONAL, EFEITO FIXO E MODELO MISTO CALIBRADO (2A) NA SEGUNDA ETAPA DE MEDIÇÃO (79 ÁRVORES) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA-NEGRA, NO RIO GRANDE DO SUL 55
FIGURA 13 – VARIAÇÃO DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO MISTA CALIBRADA 2A ($b0$, $b1$, $b2$, $b02$, $b12$ E $b22$) NOS GRUPOS DE POVOAMENTOS E PARCELAS PARA A BASE DE DADOS DE 600 ÁRVORES DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL 57
FIGURA 14 – DISPERSÃO DA BIOMASSA OBSERVADA (KG) E DAS BIOMASSAS ESTIMADAS (KG) PELOS: MÉTODO TRADICIONAL, EFEITO FIXO E EQUAÇÃO MISTA CALIBRADA (2A) EM FUNÇÃO DA VARIÁVEL COMBINADA d^2h (M³) DAS PARCELAS SELECIONADAS PARA CALIBRAÇÃO NOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL 58
FIGURA 15 – GRÁFICOS DE RESÍDUOS DAS EQUAÇÕES TRADICIONAL (TESTEMUNHA), DO EFEITO FIXO E DA EQUAÇÃO CALIBRADA PARA OS DADOS DE 71 ÁRVORES NOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL 59
FIGURA 16 – LIMITES DE CONCORDÂNCIA PARA A COMPARAÇÃO ENTRE A BIOMASSA OBSERVADA E ESTIMADA PELO MÉTODO TRADICIONAL, EFEITO FIXO E MODELO MISTO CALIBRADO (2A) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA-NEGRA, NO RIO GRANDE DO SUL 60
FIGURA 17 – PRINCIPAIS RESULTADOS DAS ABORDAGENS PARA ESTIMAR A BIOMASSA TOTAL EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL 61

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – NÚMERO DE ÁRVORES AMOSTRADAS (N) PARA A SEGUNDA ETAPA DE MEDIÇÃO (79 ÁRVORES) DE ACÁCIA-NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL 30

TABELA 2 – GRUPOS DE IDADES DOS POVOAMENTOS DE ACÁCIA-NEGRA AMOSTRADOS NO RIO GRANDE DO SUL, CLASSIFICADOS POR IDADE E MATURIDADE DOS POVOAMENTOS 38

TABELA 3 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA AS VARIÁVEIS DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO (dap, CM), ALTURA (h, M) E BIOMASSA (b, KG), ORIUNDAS DE POVOAMENTOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA NO ESTADO RIO GRANDE DO SUL 42

TABELA 4 – EQUAÇÕES AJUSTADAS NA ETAPA DE MEDIÇÃO DE 670 ÁRVORES, PELO MÉTODO TRADICIONAL NOS POVOAMENTOS E AS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS PARA COMPARAÇÃO (R^2, Syx E $S\bar{y}x$) NOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL 45

TABELA 5 – EQUAÇÕES AJUSTADAS PELO MODELO TRADICIONAL E AS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS PARA COMPARAÇÃO (R^2, Syx E $S\bar{y}x$) EM CADA POVOAMENTO E PARA O GERAL DA SEGUNDA ETAPA DE MEDIÇÃO (79 ÁRVORES), NOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL 46

TABELA 6 – EQUAÇÕES AJUSTADAS PARA A BASE DE DADOS DE AJUSTE (600 ÁRVORES), PELO MÉTODO TRADICIONAL E AS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS PARA COMPARAÇÃO (R^2, Syx E $S\bar{y}x$), PARA OS GRUPOS DE POVOAMENTOS E PARCELAS, E PARA O GERAL DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL 47

TABELA 7 – EQUAÇÕES AJUSTADAS PARA A BASE DE DADOS DE CALIBRAÇÃO (71 ÁRVORES), PELO MÉTODO TRADICIONAL E AS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS PARA COMPARAÇÃO (R^2, Syx E $S\bar{y}x$), PARA OS GRUPOS DE POVOAMENTOS E PARCELAS, E PARA O GERAL DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL 47

TABELA 8 – MATRIZES DE VARIÂNCIA/COVARIÂNCIA E ERRO PARA A PARTE FIXA DA EQUAÇÃO MISTA PARA A PRIMEIRA ETAPA DE MEDIÇÃO (670 ÁRVORES) DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL 49

TABELA 9 – EQUAÇÕES AJUSTADAS COM EFEITO FIXO PARA TODA A BASE E AS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS PARA SUA COMPARAÇÃO COM A EQUAÇÃO TRADICIONAL GERAL, NOS DADOS DA PRIMEIRA E SEGUNDA ETAPA DE MEDIÇÃO NOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL 49

TABELA 10 – MATRIZES DE VARIÂNCIA/COVARIÂNCIA E ERRO PARA O AJUSTE DA PARTE FIXA DA EQUAÇÃO MISTA PARA A BASE DE DADOS DE 600 ÁRVORES DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL 50
TABELA 11 – EQUAÇÕES AJUSTADAS PELO EFEITO FIXO PARA TODA A BASE E AS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS PARA SUA COMPARAÇÃO COM A EQUAÇÃO TRADICIONAL GERAL DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL 50
TABELA 12 – DUAS MAIORES ÁRVORES EM dap SELECIONADAS NA CALIBRAÇÃO DOS POVOAMENTOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, NO RIO GRANDE DO SUL 51
TABELA 13 – EQUAÇÕES AJUSTADAS PELA EQUAÇÃO MISTA CALIBRADA (2A) NOS POVOAMENTOS, PELA PARTE FIXA DA EQUAÇÃO MISTA E AS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS PARA COMPARAÇÃO (R^2, Syx E $S\bar{y}x$) PARA CADA POVOAMENTO, PELO MÉTODO TRADICIONAL, PARA A PARTE FIXA DA EQUAÇÃO MISTA E PARA TODA A BASE CALIBRADA DA SEGUNDA ETAPA DE MEDIÇÃO (79 ÁRVORES), DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL 52
TABELA 14 – MEDIDA DE CONCORDÂNCIA PARA A COMPARAÇÃO ENTRE A BIOMASSA OBSERVADA E ESTIMADA PELO MÉTODO TRADICIONAL, EFEITO FIXO E MODELO MISTO CALIBRADO (2A) NA SEGUNDA ETAPA DE MEDIÇÃO (79 ÁRVORES) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA-NEGRA, NO RIO GRANDE DO SUL 55
TABELA 15 – DUAS MAIORES ÁRVORES EM dap SELECIONADAS NA CALIBRAÇÃO DOS POVOAMENTOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, NO RIO GRANDE DO SUL 56
TABELA 16 – EQUAÇÕES AJUSTADAS PELA EQUAÇÃO MISTA CALIBRADA (2A) NOS GRUPOS DE POVOAMENTOS, DA PARTE FIXA E AS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS PARA COMPARAÇÃO, PELO MÉTODO TRADICIONAL, PARA A PARTE FIXA E PARA TODA A BASE CALIBRADA PELO MÉTODO 2A DAS PARCELAS SELECIONADAS PARA CALIBRAÇÃO DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL 56
TABELA 17 – MEDIDA DE CONCORDÂNCIA PARA A COMPARAÇÃO ENTRE A BIOMASSA OBSERVADA E ESTIMADA PELO MÉTODO TRADICIONAL, EFEITO FIXO E MODELO MISTO CALIBRADO (2A) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA-NEGRA, NO RIO GRANDE DO SUL 60
TABELA 18 – VALORES METEOROLÓGICOS OBSERVADOS NA ESTAÇÃO CLIMATOLÓGICA DE PELOTAS, RIO GRANDE DO SUL E ASSOCIADOS AOS POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA AMOSTRADOS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL 79

TABELA 19 – CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO HORIZONTE SUPERFICIAL DO SOLO PARA A PRIMEIRA ETAPA DE MEDIÇÃO EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA SITUADOS NOS MUNICÍPIOS DE CRISTAL, ENCRUZILHADA DO SUL E PIRATINI NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL 80

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
2 OBJETIVOS 20
3 REVISÃO DE LITERATURA 21
3.1 A CULTURA DA ACÁCIA-NEGRA (*Acacia mearnsii* De Wild.) 21
3.2 MODELOS DE BIOMASSA PARA A ESPÉCIE ACÁCIA-NEGRA 22
3.3 A MODELAGEM MISTA E A CALIBRAÇÃO 24
3.4 PROC MIXED 27
4 MATERIAIS E MÉTODOS 29
4.1 Origem dos dados 29
4.2 Silvicultura dos povoamentos de acácia-negra 32
4.4 Modelo de biomassa ajustado por meio do método tradicional (testemunha) 33
4.5 Modelo de biomassa ajustado por efeitos mistos e calibração de equações 34
4.6 Calibração do modelo de biomassa por povoamento 36
4.7 Calibração do modelo de biomassa para o nível povoamento e parcela 38
4.8 Avaliação das equações de biomassa 39
5 RESULTADOS 42
5.1 Estatísticas descritivas das variáveis e suas associações 42
5.2 Modelagem tradicional (testemunha) 44
5.2.1 Equação por povoamento 44
5.2.2 Equação para o nível povoamento e parcela 46
5.3 Equação de biomassa ajustada por efeitos mistos 48
5.3.1 Efeito fixo da equação mista por povoamento 48
5.3.2 Efeito fixo da equação mista para o nível povoamento e parcela 49
5.4 Calibração da equação de biomassa 50
5.4.1 Calibração da equação por povoamento 50
5.4.2 Calibração da equação pelos grupos: povoamento e parcela 55
6 DISCUSSÃO 62
6.1 Métricas das variáveis biomassa, diâmetro à altura do peito e altura total 62
6.2 Equações de biomassa – método tradicional 63
6.3 Equações de biomassa – efeito fixo do modelo misto 64
6.4 Calibração das equações 65
6.4.1 Calibração em nível de povoamento 65
6.4.2 Calibração em nível de povoamento e parcela 66
6.5 Comparação das abordagens 66

7 CONCLUSÃO 69

REFERÊNCIAS 70

ANEXO 1 – CARACTERÍSTICAS METEROLÓGICAS E QUÍMICAS DE SOLO NOS POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA 79

1 INTRODUÇÃO

A biomassa arbórea é de interesse para o manejo florestal, para a ecologia e em diversos estudos. Questões importantes como o sequestro de carbono, o manejo florestal para bioenergia, a produtividade florestal e a simulação de incêndios florestais requerem o conhecimento sobre a biomassa e o estoque de carbono para serem devidamente abordadas (MARTIN; DORAISAMI; THOMAS, 2018; SANQUETTA et al., 2019; TRAUTENMÜLLER et al., 2021).

A quantificação da biomassa arbórea pelo método destrutivo consiste em um processo oneroso que exige a derrubada da árvore. Por esse motivo, as medições de biomassa acima do solo são substituídas utilizando-se equações alométricas (PICARD; SAINT-ANDRÉ; HENRY, 2012; SANQUETTA et al., 2015; XIANG et al. 2016) que relacionam a biomassa arbórea com variáveis mais facilmente medidas, como o diâmetro à altura do peito (dap) (PARRESOL, 2001; SANQUETTA et al., 2018) e a altura total das árvores (h) (BI; TURNER; LAMBERT, 2004; DONG; ZHANG; LI, 2016).

Uma decisão importante na modelagem da biomassa é especificar se os preditores do modelo são de efeitos fixos, aleatórios ou mistos (fixo e aleatório). O ajuste de um modelo com efeitos fixos assume que todos os grupos (cluster de dados) têm uma inclinação ou intercepto comum para uma covariável (geralmente dap e altura). Os efeitos fixos são considerados constantes (SEARLE; CASELLA; MCCULLOCH, 2009) e integram uma estrutura hierárquica natural, porém não levam em consideração a existência de variações entre os grupos (PINHEIRO; BATES, 2000).

Por meio das estimativas de efeito fixo não é apropriado fazer previsões para novos grupos, porque as estimativas são oriundas de relações alométricas apenas para os grupos que compõem o conjunto dos dados amostrados para o ajuste (PINHEIRO; BATES, 2000). Para a modelagem de biomassa essa característica é importante, porque os coeficientes das equações de biomassa variam de acordo com os povoamento, densidade e sítio, conforme já evidenciado por Powell et al. (2014), Tian et al. (2016), Fu, Sun e Wang (2017) e Xiang et al. (2021). A vantagem da utilização de modelos fixos é a simplicidade na sua abordagem (FANG; BAILEY, 2001).

Os dados podem ser utilizados no ajuste com efeitos aleatórios para explicar conjuntos (grupos) maiores das populações, nos quais a variável aleatória assume a representatividade da população dentro de uma distribuição de probabilidade (LITTELL et al., 2006). Os efeitos aleatórios permitem modelar a variabilidade que não é explicada

pelas covariáveis do modelo (dap e h), devido à variabilidade dos coeficientes das equações ocasionada pelo efeito das condições ambientais, sítios e parcelas.

Modelos com efeitos fixos e aleatórios, denominados de mistos, constituem uma técnica estatística importante para modelagem dos dados (PINHEIRO; BATES, 2000). Esses modelos são usados principalmente para descrever de forma flexível as relações entre uma variável resposta e algumas covariáveis em dados agrupados (clusters específicos) (PINHEIRO; BATES, 2000).

Uma das aplicações consiste em utilizar a modelagem mista em modelos multiníveis, nos quais os níveis de agrupamentos podem ser: locais, povoamentos, sítios, parcelas, entre outros. Por exemplo, Bouriaud, Stefan e Saint-André (2019), destacaram que local foi considerado um nível de agrupamento para uma função de afilamento, Ogana et al. (2020), evidenciaram que modelos hipsométricos mistos calibrados com parcelas apresentaram bons resultados na estimativa e Xiang et al. (2021), revelaram resultados satisfatórios na utilização da idade do povoamento como efeito aleatório em um modelo de biomassa.

Uma vantagem da utilização de modelos de efeito misto está na capacidade de calibrar o modelo, usando dados independentes daqueles usados no ajuste (VANDERSCHAAF, 2020). A calibração refere-se ao processo de ajuste dos parâmetros estimados do modelo, para que a equação calibrada estime os resultados observados com maior acurácia (TAYLOR et al., 2012). O objetivo da modelagem consiste em identificar uma nova função de um atributo específico para um cluster de dados, a partir da amostragem de poucas árvores, possibilitando a redução da amostragem (ZENG, 2015) de árvores que compõe as equações de biomassa em um novo povoamento.

Diversos pesquisadores utilizaram os modelos de efeitos mistos calibrados na Ciência Florestal com o objetivo de melhorar as estimativas de variáveis. Por exemplo, destacam-se as pesquisas conduzidas por Cao e Wang (2011), Arias-Rodil et al. (2015), Adamec et al. (2019) e Bouriaud, Stefan e Saint-André (2019), que encontraram melhorias na modelagem de afilamento; Lappi (1991), Vismara, Mehtätalo e Batista (2016) e Dantas et al. (2020) na estimativa de volume; Zang, Lei e Zeng (2016), Kalbi et al. (2018), Gollob et al. (2018), Sharma et al. (2019), Vanderschaaf (2020) e Ogana et al. (2020) nas relações hipsométricas; de Miguel, Mehtätalo e Durkaya (2014), Ou et al. (2016), Valbuena et al. (2016) e Fu, Sun e Wang (2017) que também verificaram essa melhoria para a estimativa de biomassa.

As equações de biomassa ajustadas pelo método tradicional (mensuração de várias árvores e aplicação de um preditor fixo para um grupo de dados) são aplicadas com sucesso nos inventários florestais. Entretanto, essas equações apresentam algumas limitações: 1) as relações de biomassa variam entre sítios, povoamentos, densidades, daí a necessidade de estabelecimento de várias equações para os clusters; 2) exige a amostragem de várias árvores para ajuste de novas equações; 3) exige expressiva mão de obra e recursos, se tornando uma operação onerosa e demorada e 4) parcialmente, sua aplicação em outros povoamentos, requer a validação das equações, provavelmente por serem novos clusters de dados. Uma alternativa para superar esses aspectos citados, é utilizar a predição de efeitos aleatórios a partir de poucas árvores, para um cluster específico de dados, com o objetivo de calibrar as equações.

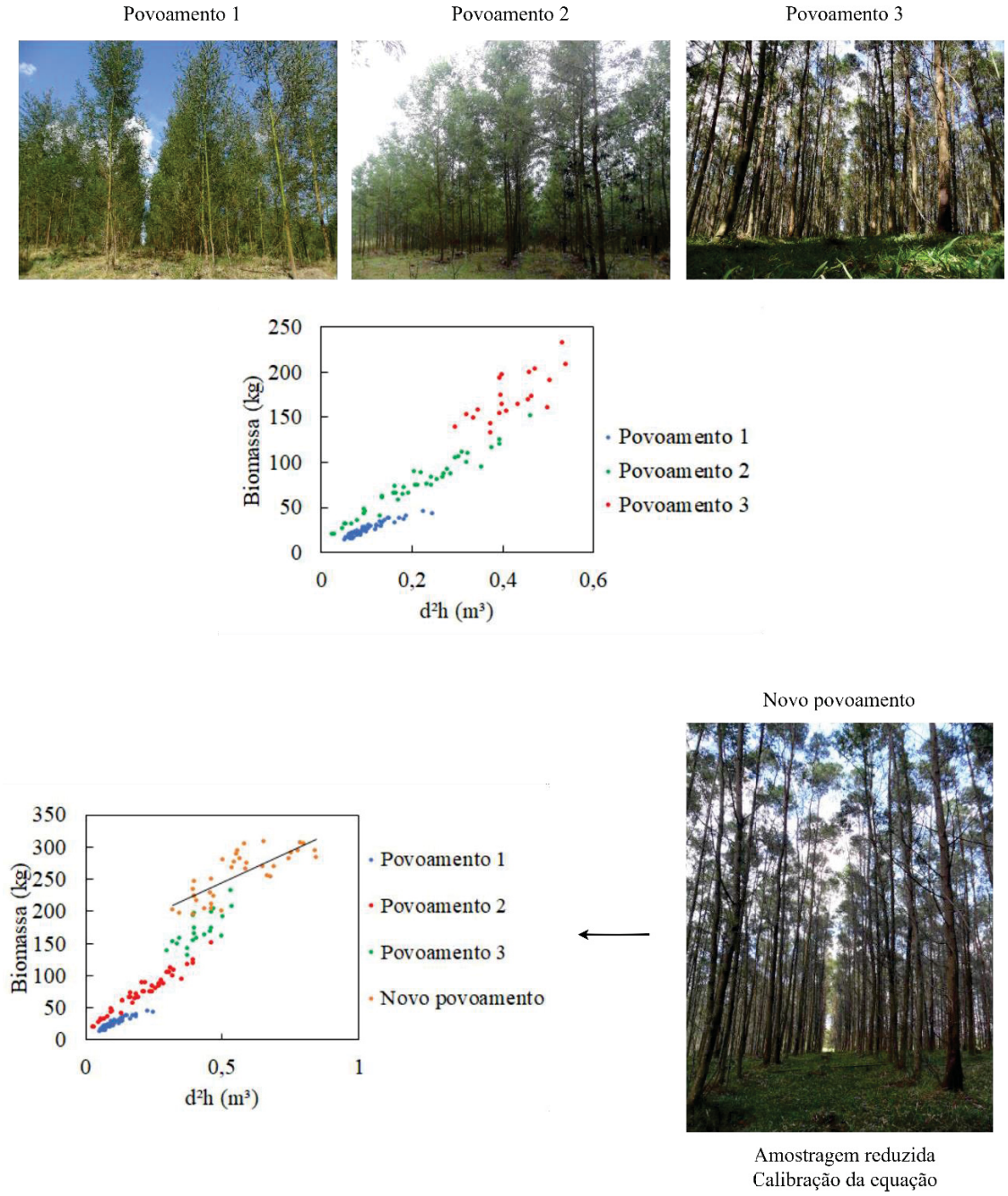
Por exemplo, um gestor florestal deseja estimar a biomassa para um novo povoamento estabelecido no município de Piratini, no Rio Grande do Sul. Esse gestor florestal pode utilizar uma equação já ajustada para um povoamento estabelecido no mesmo ou em outro município. Cabe ressaltar que as relações alométricas entre povoamentos para uma mesma espécie e em uma mesma idade podem variar. Neste sentido, em algumas situações o procedimento de validação das equações é utilizado, no qual uma amostra é obtida para a avaliação da biomassa e os resultados são comparados com os estimados pelas equações.

Observa-se que conjuntos de dados de biomassa, para a obtenção de equações, têm sido estabelecidos. O resultado disso são conjuntos de dados formados por povoamentos que abrangem locais, idades, regimes de manejo, entre outros fatores, os quais afetam as relações alométricas. O presente estudo, surgiu da motivação de utilizar essas informações (bases de dados já estabelecidas) para calibrar equações de biomassa em novos povoamentos florestais, visando obter acurácia próxima da equação específica para o novo povoamento em questão. Uma equação específica envolveria a mensuração de diversas árvores, o que acarreta em atividades onerosas.

Assim, no exemplo referido, o gestor poderá se valer das informações já existentes e, a partir da predição de efeitos aleatórios de uma amostra pequena de árvores, poderá calibrar a equação de biomassa. Ou seja, ao invés de mensurar uma amostra para validar as equações já existentes, ele poderá utilizá-la para calibrar a equação (Figura 1).

FIGURA 1 – EXEMPLO DA CALIBRAÇÃO DA EQUAÇÃO DE BIOMASSA

Bases de dados estalecidas



FONTE: a autora (2022).

Então, esse estudo foi motivado pelas seguintes questões:

i) as estimativas das equações calibradas são comparáveis com às obtidas pelo método tradicional (conjunto de dados específico para um povoamento)?

ii) quais são os níveis da estrutura hierárquica (povoamento ou povoamento e parcela) que devem ser estabelecidos nos efeitos aleatórios para a calibração de equações?

iii) quantas e quais árvores são necessárias para calibrar as equações de biomassa em novos povoamentos?

Neste trabalho, as respostas à essas perguntas foram pesquisadas para a espécie acácia-negra, dada sua importância na silvicultura brasileira. A hipótese delineada foi: equações de biomassa calibradas por meio da predição dos efeitos aleatórios, a partir de uma amostra pequena, resulta em acurácia semelhante à da equação ajustada para um povoamento específico, na qual uma amostra maior é utilizada para o ajuste da equação.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa foi recomendar condições apropriadas à calibração das equações mistas de biomassa, de árvores de acácia-negra, considerando os níveis hierárquicos e comparar os resultados com a equação ajustada pelo método tradicional (conjunto de dados específico para um povoamento).

Os objetivos específicos foram:

a) ajustar o modelo de Schumacher-Hall por povoamento pelo método da regressão dos mínimos quadrados (método tradicional);

b) ajustar o modelo de Schumacher-Hall por meio da modelagem mista;

c) testar a calibração das equações considerando o nível de povoamento por meio da modelagem mista;

d) testar a calibração das equações considerando os níveis povoamento e parcela por meio da modelagem mista e

e) determinar o número de árvores e a forma de seleção das árvores para a calibração de equações mistas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A CULTURA DA ACÁCIA-NEGRA (*Acacia mearnsii* De Wild.)

A acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild), espécie utilizada no estudo, pertence à família Fabaceae e tem origem na Austrália, ocorrendo em altitudes que variam do nível do mar até 1.070 m (BOLAND, 1987). Essa espécie é considerada uma árvore de médio porte (altura entre 6 e 15 metros), com casca castanho-escuro, rica em tanino e de copa arredondada (HIGA et al., 2009). Seu nome popular se refere a coloração escura da folhagem e casca (KANNEGIESSER, 1990).

Os primeiros plantios comerciais de acácia-negra no Brasil foram realizados por Julio Lohman em 1928 (SCHNEIDER; TONINI, 2003) e o resultado motivou o aumento das plantações em 1930. A utilização comercial dessa espécie foi iniciada em 1941, com a criação da Sociedade Extrativa de Tanino de Acácia Ltda – SETA (MÜLLER, 2006) e em 1948 foi fundada a TANAC S.A., a empresa líder do mercado interno e grande exportadora no setor de extração de tanino (TANAC, s.d). Os plantios dessa espécie se concentram no estado do Rio Grande do Sul, principalmente na encosta da Serra Gaúcha e na Serra do Sudeste, onde estão localizados os centros consumidores de madeira e casca (MORA, 2002; MÜLLER, 2006).

A área de cultivo da acácia –negra, superior à 160 mil hectares (IBÁ, 2017), sendo a quarta espécie mais plantada no Brasil, superada apenas pelos gêneros *Eucalyptus*, *Pinus* e *Hevea* (Seringueira). A rotação dessa espécie se estende de 7 a 10 anos de idade (FOELKEL, 2008) e a produção de madeira em 7 anos varia de 90 a 180 $m^3\ ha^{-1}$, com rendimento médio da casca de 15-30 $m^3\ ha^{-1}$ (CHAN et al., 2015). O total das exportações de madeira de acácia-negra no ano de 2013 foi de 570.000 t, com um valor estimado de US $ 208 milhões e a produção anual de extrato de tanino de 30.000 a 40.000 t (CHAN et al., 2015).

A espécie é utilizada como matéria prima para celulose, carvão e tanino e tem grande importância social, sendo plantada por milhares de famílias (aproximadamente 40 mil famílias), geralmente em pequenas e médias propriedades que detém aproximadamente 60 - 78% das plantações (HIGA et al., 2009; CHAN et al., 2015). A acácia-negra também pode ser utilizada em sistemas agrossilvipastoris, em que nos primeiros anos, com as árvores pequenas, a cultura da acácia é realizada em consórcios com outras culturas, como o milho, melancia e mandioca e, após o fechamento do dossel,

a área pode ser utilizada como pastagem para gado (MÜLLER, 2006). Um trabalho apresentado por Da Silva e Farias (2015) revelou que, o plantio de acácia-negra em consórcio com milho foi viável, com um valor presente líquido (VPL) de R$ 2529,22 ha^{-1} e taxa interna de retorno (TIR) de 18,91%.

O extrato da casca de acácia-negra representa uma das principais fontes de tanino vegetal no mundo (CHAN et al., 2015), sendo superior a outros taninos naturais, devido à alta solubilidade em água e baixa viscosidade. O tanino de acácia-negra é utilizado principalmente no curtimento do couro, mas também pode ser usado na produção de produtos farmacêuticos, com atividade antioxidante, antimicrobiana, antifúngica e antibacteriana (OGAWA; YAZAKI, 2018), produção de tintas, inibidores de corrosão, adesivos, promotores de fluxo de líquidos em tubos, floculantes, no tratamento de água e na clarificação de cervejas e vinhos (FOWLER et al., 2000; SEIGER, 2002).

Além da utilização da madeira de acácia-negra para produção de carvão, ela também é utilizada na fabricação de papel, celulose e cavacos de madeira (CHAN et al., 2015). A alta densidade de madeira e rendimento, caracterizado principalmente pelo baixo teor de lignina da espécie, confere vantagens econômicas para a produção de celulose (MARINHO et al., 2017). A madeira produzida no Brasil também é exportada para outros países, principalmente para o Japão, sendo utilizada na fabricação de polpa Kraft (RISI, 2014).

A acácia-negra apresenta um grande potencial mercadológico e por isso é importante que as estimativas de biomassa das árvores dessa espécie sejam acuradas. Estudos como o de Costa Junior et al., (2018) revelaram que, as diferenças de idades e locais nos povoamentos de acácia-negra alteram a forma do fuste e a quantidade de biomassa no fuste e na copa das árvores, alterando consequentemente, a biomassa total e que esses fatores influenciam de forma distinta os estoques, ou seja, as variações não seguem um padrão e por esse motivo, não podem ser contabilizadas de forma fixa no modelo. Portanto, é importante estudar métodos em que, a estimativa da biomassa das árvores seja realizada abrangendo as variações dos povoamentos de uma forma viável economicamente.

3.2 MODELOS DE BIOMASSA PARA A ESPÉCIE ACÁCIA-NEGRA

Os modelos de biomassa para a espécie acácia-negra são desenvolvidos desde a década de 90 e alguns trabalhos serão citados a seguir. Caldeira et al. (2001), utilizou um

modelo de regressão para estimar a biomassa dos compartimentos em povoamento de acácia-negra com procedência Australiana Batemans Bay aos 2,4 anos de idade e concluíram que nessa idade, cerca de 45,9% da biomassa estava alocada no fuste.

Schneider et al. (2005), utilizaram a derivação do modelo de volume para estimativa de biomassa em povoamentos de acácia-negra com idades de 4 a 8 anos. Nesse estudo, a biomassa foi estimada para cada povoamento e foi eficiente quando comparado ao método de quantificação laboratorial de biomassa. Barichello, Schumacher e Vogel (2005), estimaram por meio do método de regressão, a biomassa total em um povoamento de acácia-negra com 8 anos de idade e constataram que, nessa idade a espécie concentra mais de 60% de sua biomassa na madeira.

Behling et al. (2012), utilizaram equações aditivas para estimar a biomassa total em um povoamento de acácia-negra com idade de 7 anos e demonstraram a importância de compatibilizar as estimativas de biomassa por compartimento e para o total, em que não há diferença entre a soma das equações para cada compartimento e para a biomassa total da árvore. Sanquetta et al. (2014), usando-se de um sistema de equações relevaram que os estoques de biomassa dos compartimentos nas árvores de acácia-negra se alteram entre as idades dos povoamentos em que, a biomassa das folhas, flores e frutos diminuem com o avanço da idade e a madeira e a casca tendem a aumentar. Os autores também revelaram que, na idade de rotação (7 anos) a madeira e casca representam aproximadamente 80% da biomassa total.

Behling et al. (2018) e Behling et al. (2019) também demonstraram que, a utilização de modelos aditivos de biomassa resulta em estimativas mais eficientes quando comparados com modelos independentes para os componentes de biomassa.

Péllico Netto e Behling (2019b), utilizaram o método de estimador de razão na estimativa aditiva dos componentes de biomassa e concluíram que, o uso dos estimadores de razão consiste em uma técnica apropriada para a modelagem da biomassa arbórea e que esse método alcançou a aditividade natural dos componentes de biomassa. Martins (2020) também revelou melhorias na estimativa da biomassa total das árvores de acácia-negra. O autor comparou os valores da biomassa arbórea estimada por equações de regressão e pelo uso de técnicas de aprendizagem de máquina e revelou que o último método apresentou os melhores resultados na estimativa para biomassa em novos povoamentos.

Nota-se que diversos estudos nos modelos de biomassa para a espécie acácia-negra têm sido desenvolvidos. Esses estudos tem o intuito de englobar as diversas

variações que ocorrem nos povoamentos dessa espécie, empregando o menor tempo e custo possível.

3.3 A MODELAGEM MISTA E A CALIBRAÇÃO

Os modelos mistos são utilizados em diversas áreas, como a biologia, a genética, as pesquisas médicas, a agricultura e a indústria, fornecendo uma abordagem flexível em situações de dados correlacionados. Os modelos mistos podem descrever blocos incompletos, parcelas subdivididas, dados espaço-temporais e dados estruturados hierarquicamente (PINHEIRO; BATES, 2000).

Os modelos hierárquicos podem ser conceituados como, modelos de regressão que ocorrem em diferentes níveis (BELL et al., 2013). Por exemplo, a relação da biomassa (total ou de componentes) das árvores com as variáveis independentes dap e h, em que, as variáveis dap e h são medidas em diversas árvores (nível 1) e essas árvores são frequentemente coletadas de parcelas localizadas em regiões distintas (nível 2) (FU, SUN e WANG, 2017). Outro exemplo são os modelos de volumes comerciais das árvores em que, várias medições de diâmetro são coletadas em uma mesma árvore (nível 1) e várias árvores são amostradas em cada local (nível 2), que podem apresentar uma grande variabilidade espacial (ADAMEC et al., 2019).

No setor florestal, frequentemente ocorre a medição de várias árvores por parcelas e de várias parcelas em diferentes povoamentos (MEHTÄTALO; LAPPI, 2020). Os dados coletados nas parcelas são frequentemente correlacionados e essas correlações devem ser consideradas na modelagem (MEHTÄTALO; LAPPI, 2020).

Sendo assim, os modelos multiníveis foram desenvolvidos para contabilizar os grupos hierárquicos correlacionados (PINHEIRO; BATES, 2000). As pesquisas mostram que ignorar um nível de agrupamento nos dados pode impactar nas variâncias estimadas e na explicação das covariáveis ou dos efeitos de tratamentos (MURRAY, 1998; MOERBEEK, 2004), levando a erros na interpretação dos resultados obtidos (GOLDSTEIN, 2011).

Um modelo linear de dois níveis irá incluir no mínimo um efeito aleatório, sendo essa a principal diferença entre modelos lineares de dois níveis e modelos de mínimos quadrados ordinários de nível único (OLS), considerados como tradicionais. Outra distinção entre os modelos é que, o modelo linear misto fornece a flexibilidade de modelar

as médias, as variâncias e as covariâncias dos dados, enquanto o modelo linear tradicional modela apenas as médias dos dados (BURNS, AMIN, NOVAK; 2015).

Segundo Pinheiro e Bates (2000), os modelos mistos podem ser escritos da seguinte forma:

$$Y = X\beta + Zb + \varepsilon$$

$$b \sim \mathcal{N}(0, D)$$

$$\varepsilon \sim \mathcal{N}(0, R)$$

em que: o vetor de observações $Y \in R^n$, $X \in R^{n \times p}$ é a matriz de incidência de efeito fixos, $\beta \in R^p$ é o vetor de efeitos fixos desconhecidos e é obtido por mínimos quadrados generalizados (GLS), $Z \in R^{n \times q}$ é a matriz para os componentes aleatórios do modelo, $X = Z$, que são as variáveis independentes do modelo, b $\in R^q$ é o vetor de efeitos aleatórios, que engloba a variação da resposta média de cluster para cluster, podendo ser dividido em sub-vetores para incluir componentes aleatórios de níveis desejados, é um vetor multivariado com média zero e matriz de variância-covariância D, que explica a variabilidade aleatória entre os níveis; $\varepsilon \in R^n$ é o vetor de resíduos, com distribuição normal e matriz de variância-covariância R.

A variância e covariância entre os efeitos aleatórios é definida por:

$$Var(b) = D = \begin{pmatrix} var(b_0) & \cdots & cov(b_0, b_k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ cov(b_k, b_0) & \cdots & var(b_k) \end{pmatrix}$$

$$Var(\varepsilon) = R = \begin{pmatrix} var(\varepsilon_1) & \cdots & cov(\varepsilon_1, \varepsilon_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ cov(\varepsilon_n, \varepsilon_1) & \cdots & var(\varepsilon_n) \end{pmatrix}$$

O modelo misto também pode ser representado em uma forma matricial (MEHTÄTALO; LAPPI, 2020) e para melhorar o entendimento da aplicação no presente trabalho, o modelo será reescrito para a estimativa de biomassa em nível de povoamento:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} \\ \cdots \\ Y_{1n1} \\ Y_{21} \\ \cdots \\ Y_{2n2} \\ \cdots \\ Y_{i1} \\ \cdots \\ [Y_{ini}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & dap_{11} & h_{11} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & dap_{1n1} & h_{1n1} \\ 1 & dap_{21} & h_{21} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & dap_{2n2} & h_{2n2} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & dap_{i1} & h_{i1} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ [1 & dap_{ini} & h_{ini}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & dap_{11} & h_{11} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & dap_{1n1} & h_{1n1} \\ 1 & dap_{21} & h_{21} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & dap_{2n2} & h_{2n2} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & dap_{i1} & h_{i1} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ [1 & dap_{ini} & h_{ini}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{0i} \\ b_{1i} \\ b_{2i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \cdots \\ \varepsilon_{1n1} \\ \varepsilon_{21} \\ \cdots \\ \varepsilon_{2n2} \\ \cdots \\ \varepsilon_{i1} \\ \cdots \\ [\varepsilon_{ini}] \end{bmatrix}$$

em que: Y_{ini} é o valor da biomassa no povoamento i na repetição ni, $\sum_{i=1} ni = n$, a matriz de planejamento X é formada pelos valores dap_{ini} e h_{ini} , i=1,...,a, para estimação de Y_{ini}, $\beta=[\beta_0 \ \beta_1 \ \beta_2]^T$é o vetor de parâmetros do efeito fixo. A matriz $b=[b_{0i} \ b_{1i} \ b_{2i}]^T$, é vetor de parâmetros do efeito aleatório no povoamento i, a matriz Z é uma submatriz de X relacionada ao povoamento i e o vetor ε de erro de resíduos, com cada ε_{ini} associado a Y_{ini}.

Diferentes métodos são propostos para estimar os parâmetros fixos e aleatórios dos modelos mistos. Pinheiro e Bates (2000), Galecki e Burzykowski (2013) e Mehtätalo e Lappi (2020), providenciam literaturas detalhadas e compreensivas da teoria e das técnicas computacionais sobre os métodos matemáticos e suas aplicações em diferentes áreas.

Os efeitos aleatórios não são considerados parâmetros do modelo e o objetivo geralmente consiste em formular a melhor estimativa para esses efeitos baseados nos dados, utilizando o BLUP (*Best Linear Unbiased Predictor*) (MEHTÄTALO; LAPPI, 2020). Na prática, os componentes de variância utilizados não são conhecidos, eles são estimados, portanto, o preditor resultante não é um BLUP verdadeiro, mas sim, um preditor calculado, usando os componentes de variância estimados, chamado de EBLUP (*Estimated Best Linear Unbiased Predictor*).

A estimativa do EBLUP é efetuada pela máxima verossimilhança restrita (REML). O REML fornece estimativas para os parâmetros relacionados à matriz de variância. Os parâmetros de cluster específico (b_k) são estimados por:

$$\hat{b}_k = DZ_k{}' (Z_k DZ_k{}' + R)^{-1} res$$

em que: res é um vetor de resíduo da diferença entre a variável independe observada e a variável independente estimada usando-se a parte fixa do modelo misto.

O EBLUP permite a inferência específica em um novo povoamento, utilizando informações de todos os povoamentos simultaneamente, sendo utilizado na calibração das equações mistas. Essa técnica consiste em estimativas locais da variável de interesse, ou seja, se os valores das variáveis dependentes e independentes estiverem disponíveis para um povoamento novo, os parâmetros de efeitos aleatórios podem ser previstos e uma resposta específica para um novo povoamento pode ser ajustada em vez de uma resposta média (população) (BURKHART; TOMÉ, 2012) usando-se de poucas medições adicionais.

Por exemplo, um modelo hipsométrico estimado pode ser calibrado para um novo povoamento usando-se de alturas observadas das árvores desse povoamento. Com o modelo de efeito fixo, seria necessária a medição de várias árvores da parcela para ajustar um novo modelo, enquanto um modelo de efeito misto pode ser calibrado com apenas uma árvore do povoamento de interesse (MEHTÄTALO; LAPPI, 2020), promovendo a redução da amostragem.

3.4 PROC MIXED

O SAS PROC MIXED é uma rotina computacional flexível e adequada para ajustar modelos multiníveis, modelos lineares hierárquicos e modelos de crescimento individual. Sua posição como uma rotina integrada no SAS, torna a escolha ideal para pesquisadores que buscam fazer redução, gerenciamento e análise de dados dentro de um único pacote estatístico.

Os comandos utilizados no presente trabalho para o nível povoamento e para o nível povoamento e parcela são:

```
PROC MIXED COVTEST maxiter=3000;                    1
CLASS idade;                                        2
MODEL lnb = lnd lnh / solution;                     3
RANDOM lnd lnh / SUB=idade g v TYPE=un ;            4
run;
```

```
PROC MIXED COVTEST maxiter=3000;                    1
CLASS idade parcela;                                2
MODEL lnb = lnd lnh / solution;                     3
RANDOM lnd lnh / SUB=idade g v TYPE=un ;            4
RANDOM lnd lnh / SUB=parcela (idade) g v TYPE=un ;
run;
```

em que:

1 - COVTEST = gera resultados de teste de hipóteses para os componentes de variância e covariância (também conhecidos como efeitos aleatórios).

2 - CLASS = indica as variáveis de agrupamento, no presente estudo será povoamento (representado por idade) e parcela.

3 - MODEL = especifica os efeitos fixos a serem incluídos no modelo, no presente estudo serão as variáveis independentes na forma logarítmica (lnd e lnh).

4 - RANDOM = especifica os efeitos aleatórios a serem estimados, no presente estudo serão as variáveis independentes na forma logarítmica (lnd e lnh).

SUB = corresponde ao cluster. Especificamente, neste estudo: sub= idade ou sub= parcela (idade), ordena ao SAS que estime cada um dos efeitos aleatórios, dentro do nível 2 (sub= idade) e do nível 3 [sub= parcela (idade)] e as componentes de variância resultantes são estimativas da variação das respostas médias subjacentes entre as unidades de nível 2 e 3.

TYPE = especifica qual a estrutura de covariância (matriz G) a utilizar ao estimar os efeitos aleatórios. No presente estudo, TYPE = un, pois esse TYPE é útil para modelos de coeficientes aleatórios correlacionados.

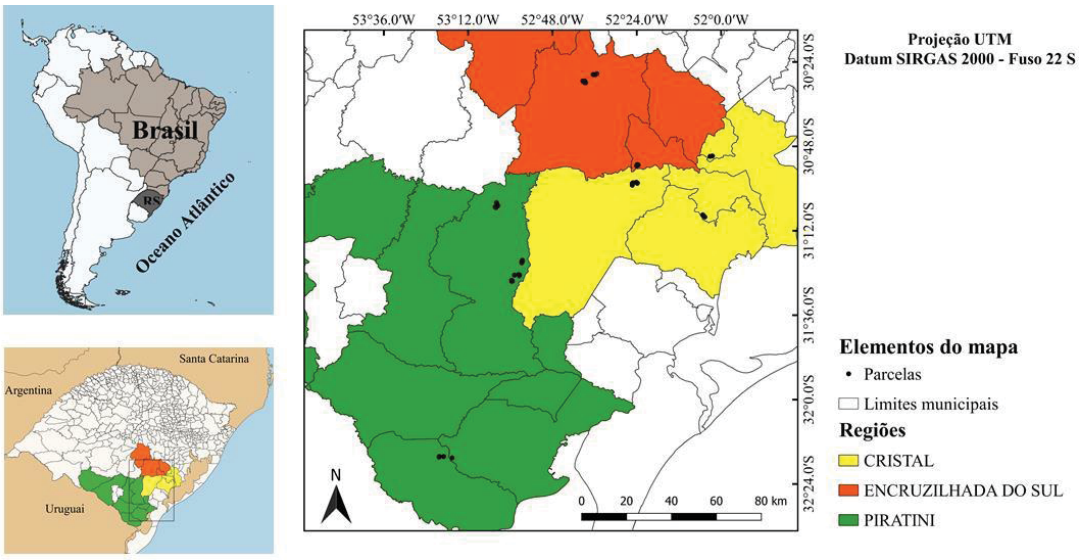
Adicionalmente, um comando denominado MÉTODO pode ser adicionado. O método de estimativa a ser usado, máxima verossimilhança (ML) ou máxima verossimilhança restrita (REML) depende principalmente do foco da pesquisa, e as diferenças entre as estimativas de ML e REML ocorrem devido ao modo como os componentes de variância são estimados. Com o ML, os efeitos fixos e os componentes de variância são estimados simultaneamente, o que pode produzir estimativas de componentes de variância enviesadas. O REML, por outro lado, estima os componentes de variância e os efeitos fixos separadamente; estimando primeiro os componentes de variância e depois estimando os efeitos fixos, então o REML permite a maximização de uma função de verossimilhança baseada apenas nos componentes de variância, o que elimina o problema de viés. O SAS apresenta o REML como padrão.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Origem dos dados

Os dados utilizados neste trabalho foram oriundos de plantios comerciais de *Acacia mearnsii* De Wild. (acácia-negra), no estado do Rio Grande do Sul. Optou-se por dividir a coleta em três regiões denominadas de município de Piratini, Cristal e Encruzilhada do Sul (Figura 2), caracterizadas em relação ao relevo, clima e solo por Mochiutti (2007).

FIGURA 2 – ÁREA DE CULTIVO DE ACÁCIA-NEGRA NAS REGIÕES DE CRISTAL, ENCRUZILHADA DO SUL E PIRATINI, NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL



FONTE: Adaptado de Behling (2016).

Duas etapas de medições foram utilizadas, as quais foram estabelecidas para as mesmas regiões de cultivo da espécie, porém em épocas diferentes, com o tamanho de 670 árvores e 79 árvores. As duas etapas de medições foram separadas com o objetivo de garantir a independência dos dados e captar a variabilidade entre os povoamentos em épocas diferentes.

A primeira etapa de medição é composta por 670 árvores e os dados foram coletados nos meses de junho e julho em 2014. A amostragem abrangeu 12 povoamentos com idades variando de 1 a 10,75 anos. Em cada povoamento foram instaladas aleatoriamente quatro parcelas circulares com área de 78,54 m² (Figura 3). Em Cristal foram amostrados povoamentos com 1,75, 2,75, 5,00 e 10,08 anos, em Encruzilhada do Sul com 1,83, 3,08, 5,75 e 10,75 anos e em Piratini com 1, 2,33, 5,25 e 9,83 anos.

FIGURA 3 – PARCELA CIRCULAR DA ETAPA DE MEDIÇÃO DE 670 ÁRVORES INSTALADA NOS POVOAMETNOS DE ACÁCIA-NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL

Fonte: Behling (2016).

A segunda etapa de medição é composta de 79 árvores com dados coletados em dois municípios do Rio Grande do Sul: Cristal e Piratini, com idades de 2 a 7 anos, abrangendo toda a rotação da cultura, estabelecida no ano de 2012. Em cada povoamento, três parcelas foram localizadas no terço superior, médio e inferior da encosta de exposição norte. O tamanho das parcelas foi de 9 x 14 metros, equivalendo a quatro linhas de plantio e 10 plantas em cada linha. As árvores para a avaliação da biomassa foram selecionadas proporcionalmente a quantidade de árvores ao longo da distribuição diamétrica (Tabela 1).

TABELA 1 – NÚMERO DE ÁRVORES AMOSTRADAS (n) PARA A SEGUNDA ETAPA DE MEDIÇÃO (79 ÁRVORES) DE ACÁCIA-NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL

Classe	Idade	n
Jovem – Avançado	2 – 3	23
Média – Inicial	4 – 5	28
Média – Avançada	6 – 7	28

Fonte: A autora (2022).

Para as duas etapas de medições, o diâmetro à altura do peito (dap) foi mensurado utilizando uma fita dendrométrica e a altura total (h) foi mensurada com uma trena. A mensuração da biomassa (b) foi realizada para o componente do fuste (madeira do fuste + casca) e da copa (galhos vivos e mortos, folhas, flores e frutos), tomando as concepções definidas em Picard, Saint-André e Henry (2012). Esses componentes foram separados e pesados para a determinação da biomassa úmida com balança digital (*Portable Eletronic*

Scale) com precisão de 5 g. Para a determinação da biomassa seca da copa e do fuste, foram retiradas amostras e suas massas foram pesadas imediatamente, utilizando uma balança digital (*Hoyle*) com precisão de 1 g.

Na primeira etapa de medição, foram retirados no tronco, 5 discos de 2 centímetros de espessura nas posições: 0%, 25%, 50%, 75% e 95% em relação à altura total, para a determinação da biomassa do fuste e da casca. Para a copa foram retiradas amostras de aproximadamente 1.500 gramas ao longo das posições: 0%, 25%, 50%, 75% e 95% em relação ao comprimento total da copa (distância do primeiro galho, independentemente de estar vivo ou morto, até o ápice da copa).

As amostras foram secas em estufa de circulação e renovação de ar a 100°C e após a constatação de massa constante, por meio de sucessivas tomadas de massas, o material foi pesado com uma balança digital de precisão de 1 g. A biomassa seca foi obtida conforme (1).

$$b_i = \frac{MU_i * MS_{Ai}}{MU_{Ai}} \quad (1)$$

em que:

b_i é a biomassa seca de um dado compartimento, em kg;

MU_i é a massa fresca de um dado compartimento, em kg;

MS_{Ai} é a massa seca da amostra, em kg;

MU_{Ai} é a massa fresca da amostra, em kg.

Para a determinação da biomassa do fuste e da casca na segunda etapa de medição (79 árvores), foram retirados 5 discos de 2 centímetros de espessura ao longo do fuste de forma a abranger 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial (considerada como diâmetro de topo de 4 cm). Para a biomassa da copa, foram retiradas aproximadamente 200 gramas dos compartimentos folhas, flores + frutos e galhos mortos e vivos. Essas amostras foram imediatamente pesadas para a determinação da massa úmida e posteriormente, secas em estufa de circulação e renovação de ar a 75ºC e, após a constatação de massa constante, o material foi novamente pesado, obtendo o teor de umidade e, consequentemente, a biomassa seca por meio da expressão acima (1).

A biomassa total foi determinada por meio da somatória da biomassa seca de todos os componentes (madeira do tronco + casca, galhos vivos, galhos mortos, folhas e flores + frutos).

4.2 Silvicultura dos povoamentos de acácia-negra

Nas duas etapas de medições (671 árvores e 79 árvores), os plantios foram classificados em áreas novas e em áreas de reformas da plantação (segunda rotação), com mudas produzidas a partir de sementes provenientes de pomares da empresa TANAC S.A. Durante o plantio foram adicionados 50 gramas de NPK (5-30-15) por planta. O espaçamento do plantio para a etapa com 671 árvores foi de 3 m entre linhas por 1,75 m entre plantas na linha. A operação de plantio foi efetuada manualmente e o preparo do solo foi efetuado somente na linha de plantio. Para a etapa com 79 árvores, os plantios foram realizados com espaçamento de 3 m x 1,5 m, o preparo do solo foi efetuado na linha de plantio (cultivo mínimo), com uma subsolagem com três hastes a 40 centímetros de profundidade e duas gradagens.

Na primeira etapa de medição, variáveis meteorológicas como a precipitação anual acumulada (mm), a temperatura máxima, média e mínima (ºC), a umidade relativa (%) e o número de horas de insolação foram obtidas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) da Estação Climatológica do município de Pelotas - RS, a mais próxima dos locais de estudo para o período em avaliação dos povoamentos.

Outra avaliação realizada nas parcelas foi das características químicas do horizonte superficial do solo (0-20 cm). As variáveis coletadas foram pH do solo, Índice SMP (ISMP), argila, matéria orgânica (M.O), fósforo (P), potássio (K), alumino (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg), hidrogênio + alumínio, CTC a pH 7, saturação da CTC por base e saturação da CTC por alumínio. As amostras foram coletadas e encaminhadas ao Laboratório de Análises de Solos e Tecidos Vegetal da Universidade Regional Integrada do Alto-Uruguai e das Missões no município de Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul.

Na coleta das variáveis de solo, os povoamentos foram agrupados para facilitar a coleta em que 1 ano representa os povoamentos com idades de 1, 1,75 e 1,83 anos, 3 anos representa os povoamentos com idades de 2,33, 2,75 e 3,08 anos, 5 anos representa os povoamentos de 5, 5,25 e 5,75 anos e 7 anos representa os povoamentos com 9,83, 10,08 e 10,75 anos.

Os resultados dos dados meteorológicos (Tabela 18) e das variáveis de solo (Tabela 19) estão apresentadas no Anexo 1.

4.3 Análise do domínio dos dados

A análise do domínio dos dados foi obtida por meio de estatísticas descritivas das variáveis dap, h e b, e também por meio de gráficos de dispersão das variáveis para os dados agrupados em idades. A correlação (r) das variáveis diâmetro à altura do peito e altura total com a biomassa observada foi obtida utilizando o modelo de potência (*power law*), já que os dados apresentam uma correlação não linear.

4.4 Modelo de biomassa ajustado por meio do método tradicional (testemunha)

O método tradicional de ajuste foi considerado a testemunha e permitiu avaliar o resultado da calibração do modelo. Esse método se caracteriza como o ajuste do modelo para um único povoamento e exige a mensuração das variáveis dependente (b) e independentes ($dap,\ h$). No presente trabalho foram mensuradas em média 50 árvores por povoamento.

Péllico Netto e Behling (2019a) para um estudo utilizando a mesma base de dados, recomendaram modelo de Schumacher e Hall (1933), conforme (2).

$$b_i = \beta_0\, dap_i^{\beta 1} h_i^{\beta 2} \qquad (2)$$

A previsão de efeitos aleatórios é mais conveniente para funções lineares, então, mantendo as condições para a testemunha, o modelo 2 foi linearizado conforme (3).

$$\ln b_i = \beta_0 + \beta_1 \ln dap + \beta_2 \ln h \qquad (3)$$

Devido à discrepância logarítmica, as estimativas de b_i foram corrigidas somando-se a constante em (4) no valor de β_0 do modelo (3).

$$fc = \frac{QME}{2} \quad (4)$$

em que:

QME é a variância do erro.

O ajuste do modelo em (3) foi efetuado para cada condição de teste por meio do método dos mínimos quadrados ordinários (OLS), que assume a seguinte forma:

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (5)$$

em que:

y é uma matriz de $n \cdot 1$ observações da variável dependente.

X é uma matriz de $n \cdot p$ das observações das variáveis independentes.

β é um vetor $(p + 1) \cdot 1$ desconhecido da população.

ε é um vetor $n \cdot 1$ de erro aleatório.

n é o número de observações e p o número de variáveis.

A solução para estimar β é a minimização da soma das diferenças quadradas entre os valores observados e estimados da variável dependente, conforme (6):

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (6)$$

O modelo tradicional foi ajustado para cada povoamento, conforme as respectivas abordagens do trabalho. Para comparação dos resultados com o efeito fixo do modelo misto e com o modelo calibrado, o coeficiente de determinação, o erro padrão da estimativa e o coeficiente de variação foram calculados conforme Sanquetta et al. (2018) e recalculados para toda a base de dados (valores gerais). Foi definido um valor médio de 50 árvores cubadas por povoamento no método tradicional, sendo que esse valor foi usado para comparação com o modelo misto calibrado.

4.5 Modelo de biomassa ajustado por efeitos mistos e calibração de equações

As fórmulas apresentadas são derivadas de Pinheiro e Bates (2000) e Littell et al. (2006), sendo adaptadas para a presente modelagem. A forma básica do modelo misto é descrita em (7):

$$E[Y_k] = X_k \beta \quad (7)$$

em que: Y_k é o vetor das observações de y para o cluster k, sendo $k = 1,2, \ldots, K$; X_k é uma matriz que contém os valores das variáveis independentes para o cluster K e β é o vetor de coeficientes de efeito fixo, aplicáveis a todos os β clusters; esses coeficientes não variam para os agrupamentos da modelagem.

Nesse modelo assume-se que a reposta média de Y em função de X é a mesma para todos os K cluster.

O problema que requer a adição de um efeito aleatório em (7) para estabelecer uma equação alométrica de biomassa consiste em acomodar as diferentes relações que a forma das árvores possuem com as variáveis dap e h. Então, quando se assume uma gama de parcelas distribuídas em diferentes povoamentos, sítios e regimes de manejo, as estimativas dos modelos fixos não são apropriadas, porque a alometria das árvores com as variáveis independentes é afetada por esses fatores (IKONEN et al., 2006; SOCHA;

KULEJ, 2007; AVERY; BURKHART, 2015). Para superar isso, pode-se adicionar parâmetros de cluster específico (efeitos aleatórios) no modelo de efeito fixo, obtendo-se uma resposta média mais apropriada e que varia de cluster para cluster, conforme (8).

$$E[Y_k|b_k] = X_k\beta + Z_k b_k + \varepsilon \quad (8)$$

$$b_k \sim \mathcal{N}(0, D)$$

$$\varepsilon \sim \mathcal{N}(0, R)$$

em que: Z_k é a matriz para os componentes aleatórios do modelo, $X_k = Z_k$, que são as variáveis independentes do modelo; b_k é o vetor de efeitos aleatórios, o qual carrega a variação da resposta média de cluster para cluster, podendo ser dividido em sub-vetores para incluir componentes aleatórios de níveis desejados, é um vetor multivariado com média zero e matriz de variância-covariância D, conforme (9), que explica a variabilidade aleatória entre os níveis; ε é o resíduo, com distribuição normal e matriz de variância-covariância R_k, conforme (10).

$$Var[b_k] = D = \begin{bmatrix} var(b_0) & cov(b_0, b_1) & cov(b_0, b_2) \\ cov(b_0, b_1) & var(b_1) & cov(b_1, b_2) \\ cov(b_0, b_2) & cov(b_1, b_2) & var(b_2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Var[\varepsilon] = R = \begin{bmatrix} var(\varepsilon_{1i}) & cov(\varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}) & cov(\varepsilon_{1i}, \varepsilon_{ni}) \\ cov(\varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}) & var(\varepsilon_{2i}) & cov(\varepsilon_{2i}, \varepsilon_{ni}) \\ cov(\varepsilon_{1i}, \varepsilon_{ni}) & cov(\varepsilon_{2i}, \varepsilon_{ni}) & var(\varepsilon_{ni}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

O vetor de efeito fixo (β) do modelo 8 é obtido por mínimos quadrados generalizados (GLS) e são avaliados na estimativa REML dos parâmetros de covariância:

$$\hat{\beta} = \left(\sum_{k=1}^{K} X_k' V_k^{-1} X_k\right)^{-1} \sum_{k=1}^{K} X_k' V_k^{-1} Y_k \quad (11)$$

em que: V_k^{-1} é uma matriz de pesos, obtida por $V_k^{-1} = [X_k\, D\, X_k' + R_k]^{-1}$.

Para efetuar a predição de efeitos aleatórios em um modelo misto, utiliza-se o estimador EBLUP (*Estimated Best Linear Unbiased Predictor*) que consiste em estimar os preditores da equação selecionada (HENDERSON, 1963). Para a aplicação do EBLUP, são necessárias estimativas confiáveis dos componentes de variância, utilizando a máxima verossimilhança residual ou restrita (REML) (RESENDE, 2016).

Os parâmetros de cluster específico (b_k) são estimados por REML/EBLUP, dado por:

$$\hat{b}_k = DZ_k{}' \, (Z_k \, DZ_k{}' + R)^{-1} res \qquad (12)$$

em que: res é um vetor de resíduo da diferença entre a biomassa observada e a biomassa estimada usando-se a parte fixa do modelo misto.

O primeiro nível foi representado pelo efeito fixo do modelo misto e o segundo nível (cluster) como os povoamentos representados pelas idades, devido ao interesse econômico e prático de ajustar modelos para povoamentos (dado que um povoamento é composto por talhões com a mesma idade). Ao adicionar o povoamento como um cluster (efeito aleatório) se deseja acomodar os efeitos das condições ambientais nas relações de biomassa com as variáveis independentes (dap e h). Esses povoamentos com idades distintas poderão ser usados para calibrar equações em novos povoamentos.

Nos povoamentos do estudo, as parcelas instaladas estão distribuídas em áreas com pequena variação de sítio com tratos silviculturais e condições de plantio semelhantes. Portanto, adicionalmente, para a etapa de medição de 670 árvores, os modelos foram ajustados, considerando ainda um terceiro nível e assumindo dentro de cada povoamento a variação entre parcelas.

Assim, o modelo (3) pode ser reescrito em termos de efeitos fixos (β_j) e aleatórios (b_k), conforme (13) e (14).

$$\ln b_{ik} = \beta_0 + \beta_1 \ln dap_{ik} + \beta_2 \ln h_{ik} + b_{0k} + b_{1k} \ln dap_{ik} + b_{2k} \ln h_{ik} \qquad (13)$$

$$\ln b_{ik} = \beta_0 + \beta_1 \ln dap_{ik} + \beta_2 \ln h_{ik} + b_{0k} + b_{1k} \ln dap_{ik} + b_{2k} \ln h_{ik} + b_{0jk} + b_{1jk} \ln dap_{ik} + b_{2jk} \ln h_{ik} \qquad (14)$$

em que: b_{ik} é a biomassa total da i-ésima árvore na k-ésimo povoamento (em kg); dap_{ik} é o diâmetro à altura do peito da i-ésima árvore na k-ésimo povoamento (em cm); h_{ik} é a altura da i-ésima árvore na k-ésimo povoamento (em m); β_0, β_1 e β_2 são os coeficientes de efeito fixo; b_{0k}, b_{1k} e b_{2k} são os coeficientes de efeito aleatório para o cluster no povoamento k e b_{0jk}, b_{1jk} e b_{2jk} são os coeficientes de efeito aleatório para o cluster na parcela j.

O processamento dos dados foi realizado por meio do *Software* SAS Studio (*ondemand for academics*) e Microsoft Excel (2013).

4.6 Calibração do modelo de biomassa por povoamento

A calibração em nível de povoamento tem o intuito de acomodar as variações ambientais por meio da predição dos efeitos aleatórios. Observa-se usando os coeficientes (β_0, β_1 e β_2), que não há uma variação sistemática entre os povoamentos, portanto ao adicionar a idade como um cluster, o objetivo é acomodar os efeitos ambientais de onde as florestas estavam plantadas sobre a alometria do dap e h com a biomassa.

A calibração, utilizada por meio do EBLUP, consiste na obtenção de uma equação que estime a biomassa das árvores de forma semelhante ao método tradicional, com uma redução amostral considerável, ou seja com uma pequena amostragem de árvores em um novo povoamento se torna possível estimar com acurácia a biomassa total das árvores.

Nessa abordagem, os modelos mistos foram ajustados para a etapa de medição de 670 árvores. A calibração dos modelos foi testada na etapa de medição de 79 árvores, garantindo a independência dos dados.

Para tanto, estimou-se b_{1k} e b_{2k} da equação 13 e 14 por meio da equação em (12). O processo de calibração requereu a amostragem de árvores e mensuração das variáveis dependentes e independentes. A calibração de equações em nível de povoamento foi testada observando-se as seguintes abordagens de seleção das árvores:

I. 1A: calibração utilizando a maior árvore da variável dap para cada povoamento;
II. 2A: calibração utilizando as duas maiores árvores da variável dap para cada povoamento;
III. 3A: calibração utilizando as três maiores árvores em dap para cada povoamento;
IV. 4A: calibração utilizando as quatro maiores árvores em dap para cada povoamento;
V. 5A: calibração utilizando as cinco maiores árvores em dap para cada povoamento;
VI. 6A: calibração utilizando a árvore mediana para a variável dap em cada povoamento;
VII. 7A: calibração utilizando uma árvore aleatória em cada povoamento;
VIII. 8A: calibração utilizando três árvores, sendo a menor árvore, a árvore média e a maior da variável dap para cada povoamento;

IX. 9A: calibração utilizando três árvores, sendo a árvore média, a árvore média menos dois desvios padrões e a árvore média mais dois desvios padrões para a variável dap em cada povoamento.

A variável definida para a escolha das árvores na calibração foi o dap pois, nos povoamentos em que há o maior interesse prático em conhecer a biomassa da floresta (idade de rotação), grande quantidade da biomassa total está alocada no fuste e o dap é uma variável que estima de forma satisfatória a biomassa do fuste.

4.7 Calibração do modelo de biomassa para o nível povoamento e parcela

De forma semelhante à adição do nível povoamento, também pode-se adicionar dentro do cluster povoamento, as parcelas. O objetivo é acomodar as variações das relações alométricas entre dap e h com a biomassa que ocorrem entre as parcelas dos povoamentos e reduzir as árvores amostradas.

Nessa abordagem foi utilizada somente a base com 670 árvores, coletadas em 48 parcelas. A alocação da biomassa nos componentes varia de acordo com a idade do povoamento, ou seja, quanto maior for a idade do povoamento, maior será a proporção de biomassa do fuste em relação à biomassa total. Sendo assim, a melhor divisão dos estratos para a presente base de dados incluiu uma diferença de até 2 anos de idade, pois, dessa maneira, foram evidenciados os efeitos de tais proporções. Assim, foram estabelecidos dados em grupos de idades, definidos na Tabela 2.

TABELA 2 – GRUPOS DE IDADES DOS POVOAMENTOS DE ACÁCIA-NEGRA AMOSTRADOS NO RIO GRANDE DO SUL, CLASSIFICADOS POR IDADE E MATURIDADE DOS POVOAMENTOS

Grupos de idades	Idade do povoamento (anos)	Idade do povoamento (qualitativa)
1	1	Muito jovem
2	1,75 – 1,83	Jovem – Inicial
3	2 – 3,08	Jovem – Avançada
4	4 – 5,75	Média – Inicial
5	6 – 7	Média – Avançada
6	9 – 10,75	Madura

FONTE: Adaptada de Behling (2016).

Os ajustes foram repetidos 4 vezes, considerando 3 parcelas selecionadas aleatoriamente para o ajuste e uma parcela para a calibração, em relação aos grupos de idades (Tabela 2). A calibração dessas parcelas foi efetuada conforme o item 4.6 do presente estudo.

Os resultados apresentados são referentes à primeira rodada das quatro (selecionada aleatoriamente), em que as parcelas de calibração foram: parcela 36 (1 ano); parcela 42 (1,83 anos); parcela 27 (2,75 anos); parcela 23 (5,25 anos) e parcela 3 (10,08 anos), totalizando 71 árvores. As demais parcelas foram utilizadas no ajuste da equação (600 árvores).

Para a calibração das equações, os coeficientes b_{0k} , b_{1k} e b_{2k} e b_{0jk}, b_{1jk} e b_{2jk} foram estimados usando-se a equação 12 e valendo-se dos procedimentos testados para seleção das árvores (1A, 2A, 3A, 4A, 5A, 6A, 7A, 8A, 9A).

4.8 Avaliação das equações de biomassa

A estimativa da biomassa para os métodos testados (tradicional, efeito fixo e pela equação calibrada) foi avaliada por meio das estatísticas:

i) Erro padrão da estimativa (m³): $Syx = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(b_i - \bar{b}_i)^2}}{n-p}$

ii) Coeficiente de variação (%): $S\bar{y}x = \frac{Syx}{\bar{b}_i} * 100$

iii) Coeficiente de determinação: $R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(b_i - \hat{b}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(b_i - \bar{b}_i)^2}$

iv) Medida de concordância (ρ): $\rho = 1 - \frac{MSE}{S_b^2 + S_{\hat{b}}^2 + (\bar{b}_i - \bar{\hat{b}}_i)^2}$

em que: b_i é o valor da biomassa observada na árvore i, em kg; $\bar{b}_i$ é o valor da biomassa média observada por povoamento, em kg; $\hat{b}_i$ é o valor da biomassa estimada pelas equações na árvore i, em kg; MSE é o erro quadrático médio definido por $\sum(\bar{b} - \hat{b})^2/n$; $S_{\hat{b}}^2$ é a variância da biomassa estimada pelo método tradicional, efeito fixo e modelo misto calibrado; S_b^2 é a variância da biomassa observada; $\hat{b}$ é o valor da biomassa média estimada pelo método tradicional, efeito fixo e modelo misto calibrado em kg e n é o número de observações.

A medida de concordância (ρ) varia de -1 a 1, em que -1 implica nos valores de $\hat{b}$ e $\bar{b}$ em perfeita discordância e 1 implica nos valores de $\hat{b}$ e $\bar{b}$ em perfeita concordância (HUANG et al., 2019).

Os resultados gerais foram apresentados, em que a equação para cada povoamento foi utilizada para o cálculo das biomassas estimadas e essas foram comparadas com as

biomassas observadas, para os quais foram calculadas as estatísticas para cada povoamento e recalculadas para o conjunto geral dos dados.

Adicionalmente, gráficos de dispersão das biomassas foram construídos, sobrepondo à resposta dos ajustes em função da variável combinada (d^2h; dap em m e h em m), para facilitar a visualização dos resultados. Também, gráficos de resíduos para o modelo tradicional (testemunha), efeito fixo do modelo misto e modelo calibrado em cada uma das abordagens foram apresentados, abrangendo todos os dados de validação.

Os gráficos de limites de concordância (análise de Bland-Altman) foram construídos, conforme proposto por Huang et al., 2019. A transformação logarítmica foi efetuada nos valores de biomassa observada e estimada devido a dispersão dos resíduos. Os limites de intervalo do gráfico (linhas pontilhadas) são estabelecidos por Bland e Altman (1986). No presente trabalho, foi estabelecido que 90% das diferenças entre os valores da biomassa observada e da biomassa estimada pelos métodos deveriam estar dentro dos limites de concordância.

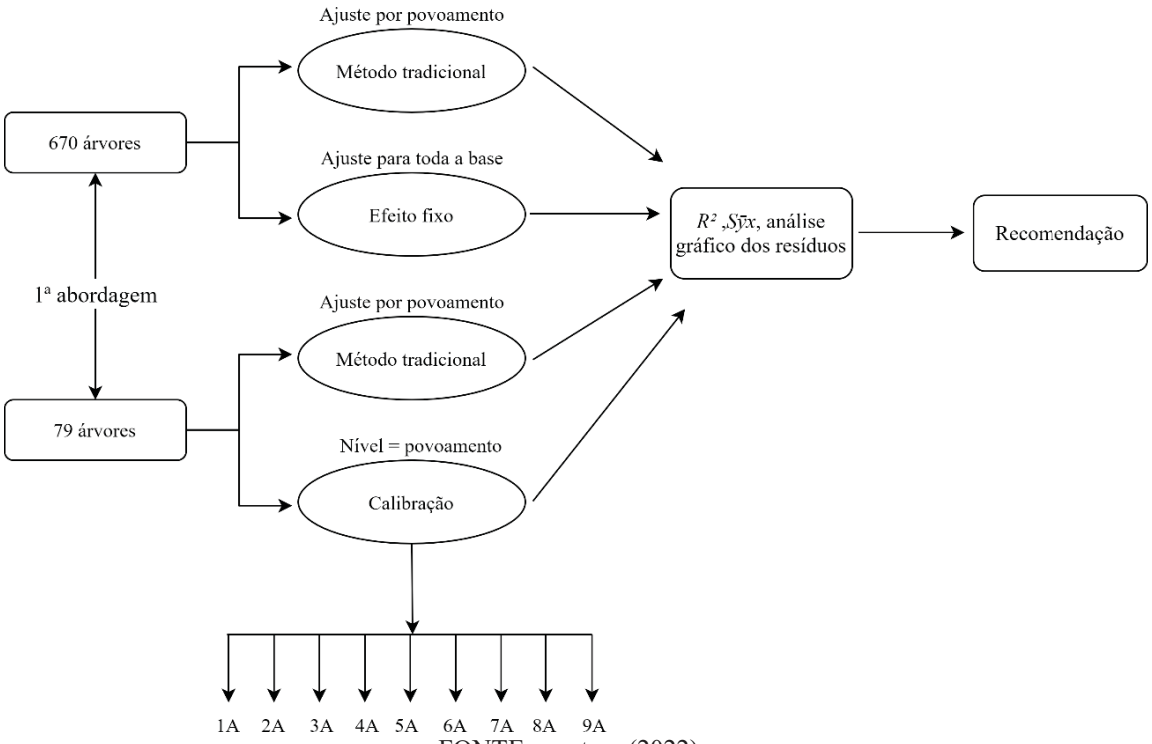
Os resíduos para a avaliação das condicionantes são referentes à diferença entre o logaritmo da biomassa observada e o logaritmo da biomassa estimada e não foram apresentados no trabalho. Os resíduos apresentados no trabalho são referentes à diferença entre os valores na forma original (diferença entre a biomassa observada e a biomassa estimada), para facilitar o entendimento do erro médio na unidade absoluta da biomassa.

Os gráficos com as variações dos coeficientes das equações tradicionais (β_0, β_1 e β_2) e das equações mistas calibradas em nível de povoamento e parcela (b_{1k}, b_{2k}, b_{1jk} e b_{2jk}) ao longo dos povoamentos foram construídos.

O seguinte critério foi adotado para verificar se as calibrações das equações foram apropriadas: os resultados das estatísticas das equações calibradas não deveriam se afastar mais do 5% em relação as estatísticas obtidas por meio do método tradicional.

Um resumo dos métodos testados em nível de povoamento está apresentado na Figura 4, em que o modelo tradicional (específico por povoamento) foi ajustado para ambas as etapas de medições e o modelo misto foi ajustado para a primeira etapa de medição (670 árvores) e calibrado para a segunda etapa de medição (79 árvores). Para o nível em povoamento e parcela, os métodos utilizados são semelhantes ao apresentado na Figura 4.

FIGURA 4 – RESUMO DOS MÉTODOS UTILIZADAS NA PRIMEIRA ABORDAGEM (EM NÍVEL DE POVOAMENTO), APRESENTANDO A DIVISÃO DOS DADOS E OS MÉTODOS DE AJUSTES DAS EQUAÇÕES DE BIOMASSA PARA PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL



FONTE: a autora (2022).

Para garantir a independência dos dados de ajuste e validação, ocorreu a separação dos dados, sem perder a estrutura do efeito dos níveis hierárquicos nas relações das variáveis dap e altura total (h) com a biomassa total (b).

5 RESULTADOS

5.1 Estatísticas descritivas das variáveis e suas associações

As estatísticas descritivas das variáveis dap (cm), h (m) e b (kg) para as duas etapas de medições (670 árvores e 79 árvores) estão apresentadas na Tabela 3. A correlação das variáveis: dap, h e d^2h (m³) com a biomassa (b) para os grupos de povoamentos (Figura 5 e 6) foram confiáveis, variando entre 0,88 a 0,99 para a variável dap, entre 0,77 a 0,97 para h e entre 0,89 a 0,99 para a variável combinada d^2h.

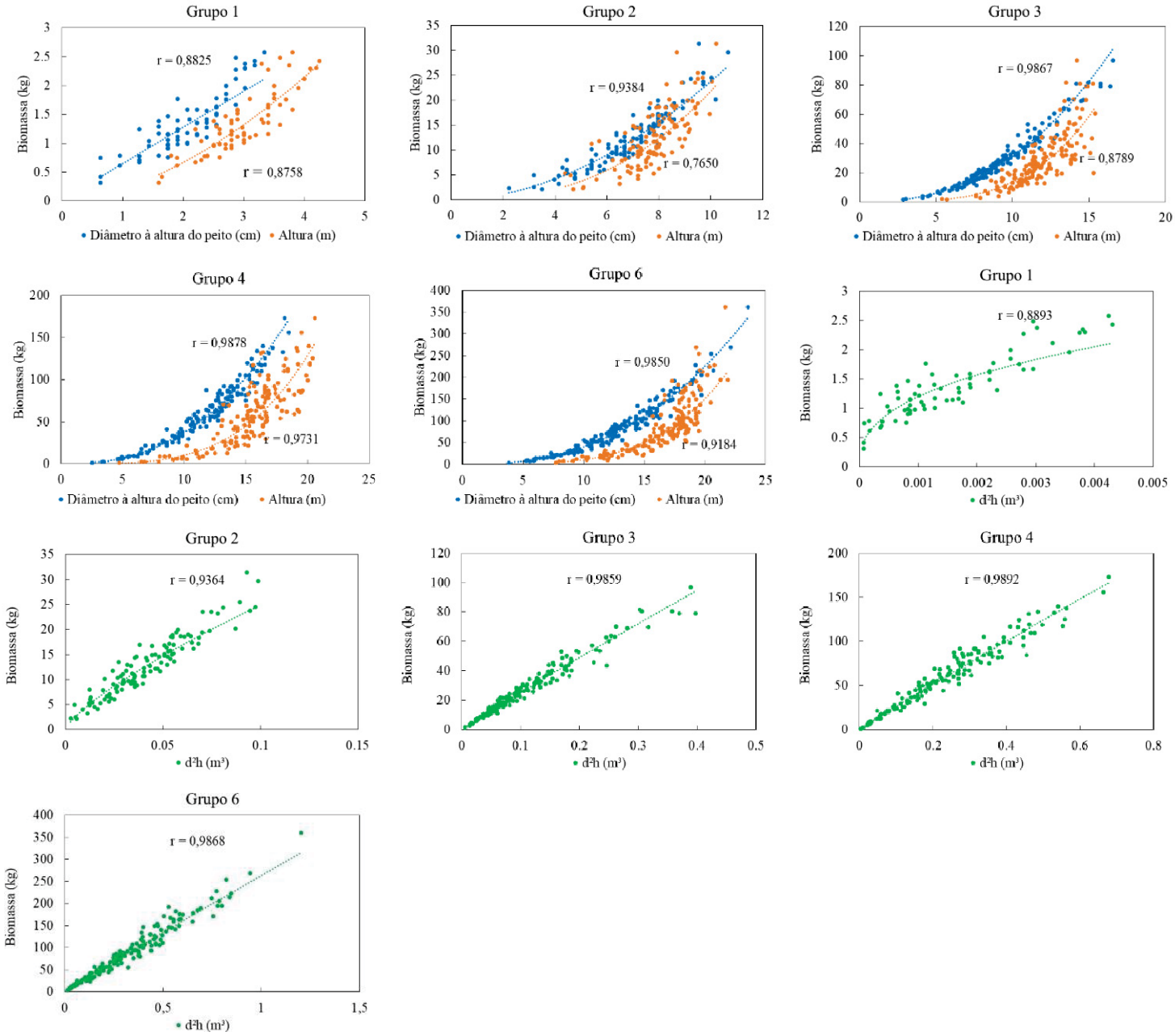
A correlação da biomassa é maior com o dap do que com a altura e a variável combinada d^2h tornou-a linear. A correlação do dap aumentou da floresta mais jovem para a floresta mais velha e a correlação da altura total aumentou da floresta mais jovem até determinada idade (grupo 4), estabilizando-se até a floresta mais velha. Nas Figuras 5 e 6 ficou claro que, dentro de um determinado povoamento, a dispersão dos valores da biomassa estimada foi proporcional ao aumento de d^2h.

TABELA 3 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA AS VARIÁVEIS DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO (dap, cm), ALTURA (h, m) E BIOMASSA (b, kg), ORIUNDAS DE POVOAMENTOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA NO ESTADO RIO GRANDE DO SUL

	Etapa com 670 árvores				Etapa com 79 árvores			
	Média	Min	Max	Desvio padrão	Média	Min	Max	Desvio padrão
dap (cm)	9,5	0,6	23,6	4,4	11,1	3,8	21,5	4,7
h (m)	12,2	1,6	21,9	4,9	14,4	6,1	21,6	4,3
b (kg)	45,5	0,3	361,1	48,1	74,1	3,7	273,2	68,8

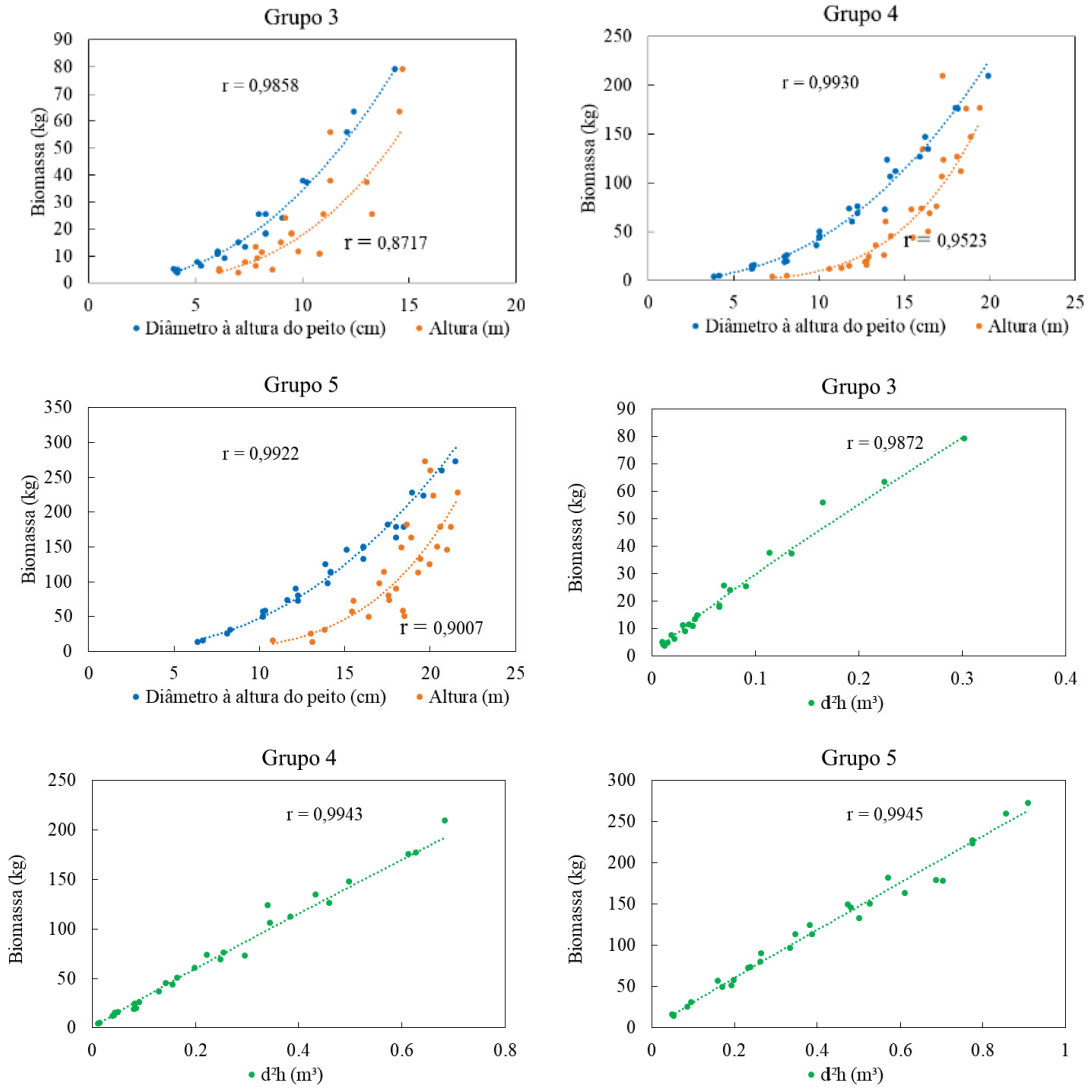
FONTE: A autora (2022).

FIGURA 5 – RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS dap (cm), h (m) E d^2h (m³) COM OS GRUPOS DE IDADE E DISPERSÃO DA BIOMASSA NOS GRUPOS DE IDADE COM A VARIÁVEL COMBINADA (d^2h), PARA A PRIMEIRA ETAPA DE MEDIÇÃO (670 ÁRVORES), ORIUNDOS DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL



FONTE: a autora (2022).

FIGURA 6 – RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS dap (cm), h (m) E d^2h (m³) COM AS IDADES E DISPERSÃO DA BIOMASSA NAS IDADES COM A VARIÁVEL COMBINADA (d^2h), PARA A SEGUNDA ETAPA DE MEDIÇÃO (79 ÁRVORES), ORIUNDOS DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL



FONTE: a autora (2022).

5.2 Modelagem tradicional (testemunha)

5.2.1 Equação por povoamento

Os valores dos coeficientes β_0, β_1 e β_2 da primeira etapa de medição (670 árvores) apresentaram alta variação (70%, 74% e 87%, respectivamente) (Tabela 4), porém essa variação não foi sistemática entre os povoamentos (Figura 7). Os valores das estatísticas de ajuste foram confiáveis, apresentando uma variação do coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,784 a 0,977. O erro padrão da estimativa (Syx) variou de 0,245 a 14,798kg e o coeficiente de variação ($S\bar{y}x$) variou de 10,94 a 18,08%, com valores gerais de R^2=

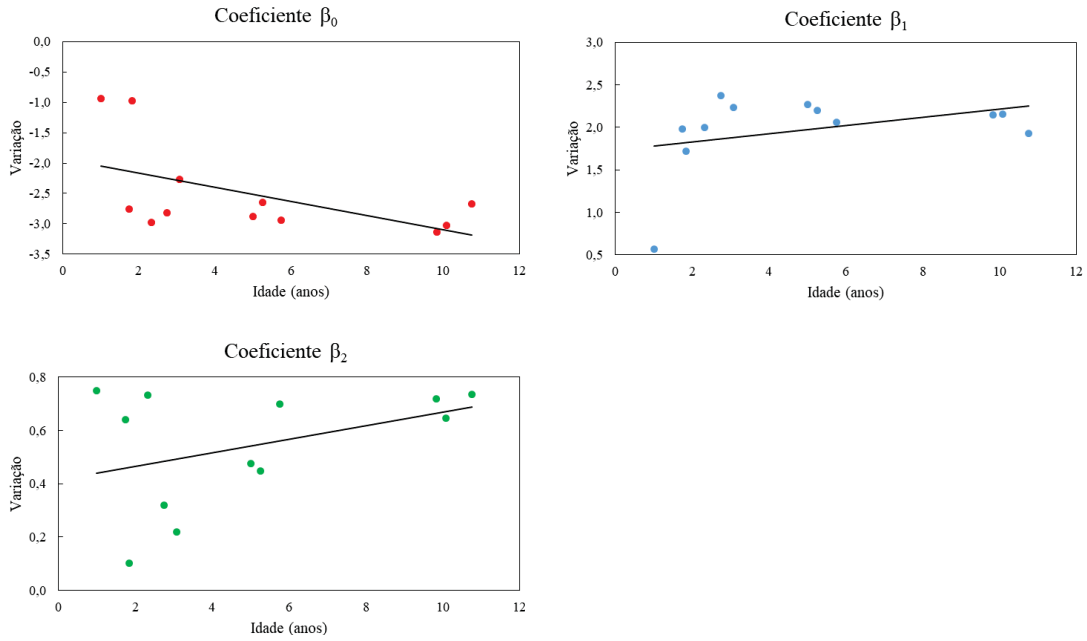
0,977, Syx= 7,248kg e $S\bar{y}x$= 15,92%, sendo as melhores estatísticas obtidas nos povoamentos mais velhos.

TABELA 4 – EQUAÇÕES AJUSTADAS NA ETAPA DE MEDIÇÃO DE 670 ÁRVORES, PELO MÉTODO TRADICIONAL NOS POVOAMENTOS E AS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS PARA COMPARAÇÃO (R^2, Syx E $S\bar{y}x$) NOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL

Povoamento	Idade	β_0	β_1	β_2	R^2	Syx	$S\bar{y}x$
1	1,00	-0,941	0,572	0,750	0,784	0,245	18,08
2	1,75	-2,753	1,980	0,641	0,933	1,680	12,90
3	1,83	-0,977	1,718	0,101	0,905	1,675	13,54
4	2,33	-2,981	1,998	0,733	0,947	5,085	11,27
5	2,75	-2,819	2,376	0,320	0,965	2,398	10,94
6	3,08	-2,269	2,234	0,220	0,928	2,778	12,80
7	5,00	-2,883	2,270	0,477	0,956	6,273	11,67
8	5,25	-2,646	2,197	0,448	0,948	7,217	14,08
9	5,75	-2,941	2,060	0,700	0,949	9,785	12,94
10	9,83	-3,133	2,145	0,719	0,959	14,798	13,91
11	10,08	-3,029	2,158	0,646	0,973	9,784	11,98
12	10,75	-2,675	1,932	0,735	0,948	11,291	13,81
	Geral				0,977	7,248	15,92

FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: β_0, β_1 e β_2 são os coeficientes da equação, R^2 é o coeficiente de determinação, Syx é o erro padrão da estimativa (kg) e $S\bar{y}x$ é o coeficiente de variação (%).

FIGURA 7 – VARIAÇÃO DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO TRADICIONAL (β_0, β_1 E β_2) AO LONGO DOS POVOAMENTOS PARA A PRIMEIRA ETAPA DE MEDIÇÃO (670 ÁRVORES) DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL



FONTE: a autora (2022).

A variação do coeficiente β_1 (Tabela 5) da segunda etapa de medição (79 árvores) foi baixa (15%), enquanto que os valores para os coeficientes β_0 e β_2 revelaram alta variação (61% e 85%, respectivamente). Os valores das estatísticas de ajuste foram confiáveis, o coeficiente de determinação (R^2) variou de 0,967 a 0,991, o Syx variou de 1,243 a 9,999kg e o $S\bar{y}x$ variou de 5,36 a 15,00% com valores gerais de R^2 = 0,991, Syx = 6,656kg e $S\bar{y}x$= 8,99%.

TABELA 5 – EQUAÇÕES AJUSTADAS PELO MODELO TRADICIONAL E AS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS PARA COMPARAÇÃO (R^2, Syx E $S\bar{y}x$) EM CADA POVOAMENTO E PARA O GERAL DA SEGUNDA ETAPA DE MEDIÇÃO (79 ÁRVORES), NOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL

Povoamento	Idade	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	R^2	Syx	$S\bar{y}x$
1	2	-1,813	2,115	0,136	0,967	1,243	10,33
2	3	-1,237	2,342	-0,214	0,991	2,441	7,93
3	4	-2,261	2,076	0,451	0,974	7,024	15,00
4	5	-3,195	1,982	0,913	0,986	7,962	8,56
5	6	-2,576	2,137	0,544	0,981	9,999	10,35
6	7	-1,714	2,012	0,388	0,988	7,808	5,36
	Geral				0,991	6,656	8,99

FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: β_0, β_1 e β_2 são os coeficientes da equação, R^2 é o coeficiente de determinação, Syx é o erro padrão da estimativa (kg) e $S\bar{y}x$ é o coeficiente de variação (%).

5.2.2 Equação para o nível povoamento e parcela

Os coeficientes β_0, β_1 e β_2 e as estatísticas de ajuste para o método tradicional (testemunha) estão apresentados na Tabela 6 (600 árvores) e na Tabela 7 (71 árvores). A variação do β_0 nas duas bases de dados foi alta (75% e 99%, respectivamente), para o coeficiente β_1 a variação foi alta (73%) na base de dados de 600 árvores e na base de dados de 71 árvores foi baixa (17%) e para o β_2 a variação foi alta nas duas bases de dados, de 96% e 67% respectivamente, porém essas variações não foram sistemáticas ao longo dos povoamentos (Figura 8).

Os valores de R^2, Syx e $S\bar{y}x$ foram confiáveis. Na base de dados de 600 árvores, o R^2 variou de 0,806 a 0,969 e o $S\bar{y}x$ variou de 11,40 a 17,86% e na base de dados de 71 árvores, o R^2 variou de 0,889 a 0,980 e o $S\bar{y}x$ variou de 7,15 a 19,86%, sendo o maior valor de R^2 (0,980) e o menor valor de $S\bar{y}x$ (7,15%), encontrados no povoamento com idade próxima a rotação da cultura, aos 10,08 anos, quando há interesse na estimativa de biomassa com maior acurácia.

TABELA 6 – EQUAÇÕES AJUSTADAS PARA A BASE DE DADOS DE AJUSTE (600 ÁRVORES), PELO MÉTODO TRADICIONAL E AS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS PARA COMPARAÇÃO (R^2, Syx E $S\bar{y}x$), PARA OS GRUPOS DE POVOAMENTOS E PARCELAS, E PARA O GERAL DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL

Povoamento	Idade	β_0	β_1	β_2	R^2	Syx	$S\bar{y}x$
1	1,00	-0,766	0,675	0,473	0,806	0,222	17,86
2	1,75	-2,654	2,016	0,559	0,924	1,790	13,75
3	1,83	-1,234	1,485	0,449	0,888	1,650	14,60
4	2,33	-2,881	2,011	0,681	0,945	5,164	11,44
5	2,75	-2,500	2,489	0,094	0,958	2,672	12,85
6	3,08	-1,989	2,383	-0,028	0,924	2,859	13,17
7	5,00	-3,120	2,227	0,603	0,958	6,128	11,40
8	5,25	-2,161	2,411	0,071	0,960	6,098	11,67
9	5,75	-2,675	2,154	0,523	0,947	10,045	13,28
10	9,83	-3,104	2,152	0,702	0,959	14,746	13,86
11	10,08	-2,813	2,329	0,419	0,969	8,770	12,87
12	10,75	-2,023	2,224	0,242	0,948	11,292	13,81
	Geral				0,976	7,310	15,82

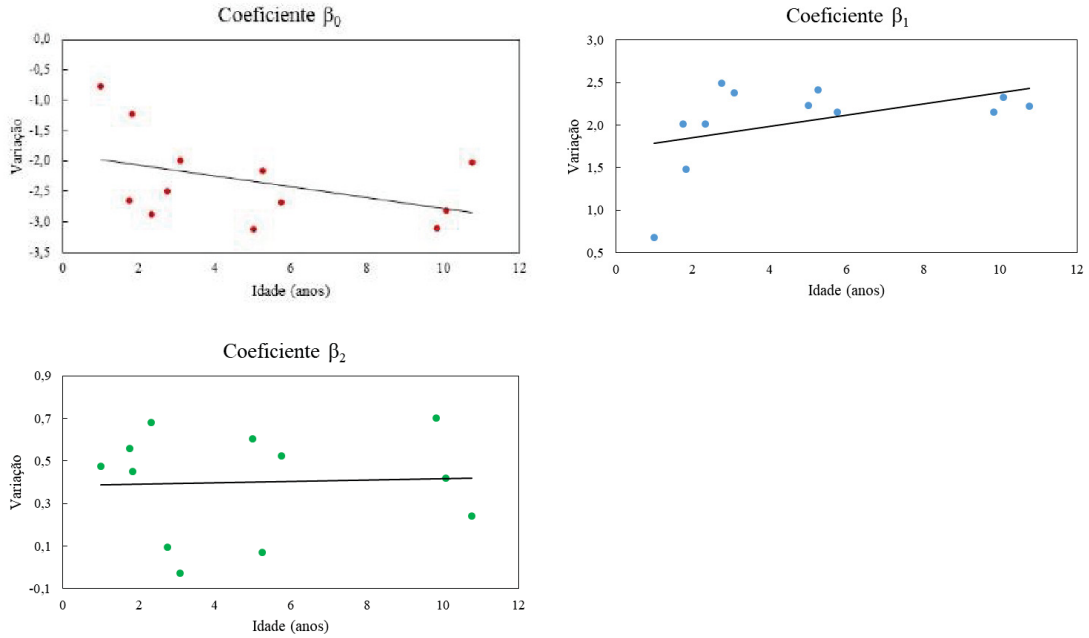
FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: β_0, β_1 e β_2 são os coeficientes da equação, R^2 é o coeficiente de determinação, Syx é o erro padrão da estimativa (kg) e $S\bar{y}x$ é o coeficiente de variação (%).

TABELA 7 – EQUAÇÕES AJUSTADAS PARA A BASE DE DADOS DE CALIBRAÇÃO (71 ÁRVORES), PELO MÉTODO TRADICIONAL E AS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS PARA COMPARAÇÃO (R^2, Syx E $S\bar{y}x$), PARA OS GRUPOS DE POVOAMENTOS E PARCELAS, E PARA O GERAL DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL

Povoamento	Parcela	Idade	β_0	β_1	β_2	R^2	Syx	$S\bar{y}x$
1	36	1,00	0,051	1,857	-1,052	0,894	0,170	11,48
2	42	1,83	-2,549	2,077	0,472	0,889	2,005	13,27
3	27	2,75	-3,471	2,238	0,690	0,972	2,140	8,61
4	23	5,25	-3,139	1,979	0,838	0,934	9,542	19,86
5	3	10,08	-4,774	2,044	1,344	0,980	9,852	7,15
Tradicional						0,990	5,595	14,13

FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: β_0, β_1 e β_2 são os coeficientes da equação, R^2 é o coeficiente de determinação, Syx é o erro padrão da estimativa (kg) e $S\bar{y}x$ é o coeficiente de variação (%).

FIGURA 8 – VARIAÇÃO DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO TRADICIONAL (β_0, β_1 E β_2) AO LONGO DOS GRUPOS DE POVOAMENTOS E PARCELAS PARA A BASE DE DADOS DE AJUSTE (600 ÁRVORES) DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL



FONTE: a autora (2022).

Os valores encontrados na equação tradicional das duas abordagens revelaram que o ajuste tradicional efetuado por povoamento foi apropriado, porém com um alto custo, pois para a estimativa de biomassa em um novo povoamento se torna necessária a mensuração de 50 árvores.

5.3 Equação de biomassa ajustada por efeitos mistos

5.3.1 Efeito fixo da equação mista por povoamento

As matrizes de variância/covariância (D) e o erro (E) foram utilizados para a calibração da equação mista (Tabela 8). As estatísticas de ajuste para as duas etapas de medições (Tabela 9), obtidas pelo efeito fixo e pelo método tradicional revelaram que os valores do ajuste efetuado apenas para o efeito fixo (R^2= 0,860 e 0,758, $S\bar{y}x$= 39,58 e 45,97%) foram inferiores aos resultados do ajuste tradicional (R^2= 0,977 e 0,991, $S\bar{y}x$= 15,92 e 8,99%) para as duas etapas de medições, indicando que o ajuste apenas com o efeito fixo não foi adequado, sendo necessária a calibração da equação mista para obter resultados mais acurados e que se aproximem da equação tradicional.

TABELA 8 – MATRIZES DE VARIÂNCIA/COVARIÂNCIA E ERRO PARA A PARTE FIXA DA EQUAÇÃO MISTA PARA A PRIMEIRA ETAPA DE MEDIÇÃO (670 ÁRVORES) DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL

Variância/Covariância (D)			Erro (R)
0,5311	−0,2692	−0,0426	0,0186
−0,2692	0,2224	−0,0312	
−0,0426	−0,0312	0,0371	

FONTE: A autora (2022).

TABELA 9 – EQUAÇÕES AJUSTADAS COM EFEITO FIXO PARA TODA A BASE E AS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS PARA SUA COMPARAÇÃO COM A EQUAÇÃO TRADICIONAL GERAL, NOS DADOS DA PRIMEIRA E SEGUNDA ETAPA DE MEDIÇÃO NOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL

		$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	R^2	Syx	$S\bar{y}x$
670 árvores	Tradicional				0,977	7,248	15,92
	Fixo	-2,500	1,967	0,544	0,860	18,020	39,58
79 árvores	Tradicional				0,991	6,656	8,99
	Fixo				0,758	34,045	45,97

FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: β_0, β_1 e β_2 são os coeficientes da equação, R^2 é o coeficiente de determinação, Syx é o erro padrão da estimativa (kg) e $S\bar{y}x$ é o coeficiente de variação (%).

5.3.2 Efeito fixo da equação mista para o nível povoamento e parcela

As matrizes de variância/covariância (D) e o erro (R) utilizados na calibração da equação mista, em função dos dois níveis de agrupamentos (povoamento e parcela), estão apresentadas na Tabela 10. Os valores da matriz de variância/covariância do cluster povoamento, de maneira geral, são maiores que os valores da variância/covariância do cluster parcela, indicando que a calibração com parcela não resulta em grandes melhorias dos dados.

As estatísticas do ajuste pelo efeito fixo e pelo método tradicional revelaram que os valores do ajuste tradicional (R^2= 0,976 e 0,990, $S\bar{y}x$= 15,82 e 14,13%) foram superiores aos obtidos no efeito fixo (R^2= 0,869 e 0,917, $S\bar{y}x$= 37,09 e 39,86%) para ambas as bases de dados (Tabela 11) indicando, que o ajuste apenas com o efeito fixo não foi apropriado, sendo necessária a calibração da equação mista para a obtenção de resultados próximos da equação tradicional.

TABELA 10 – MATRIZES DE VARIÂNCIA/COVARIÂNCIA E ERRO PARA O AJUSTE DA PARTE FIXA DA EQUAÇÃO MISTA PARA A BASE DE DADOS DE 600 ÁRVORES DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL

	Variância/Covariância (D)			Erro (R)
Povoamento	0,4373	−0,2575	0,0031	0,0156
	−0,2575	0,2014	−0,0234	
	−0,0031	−0,0234	0,0123	
Parcela	0,0065	−0,0122	0,0076	
	−0,0122	0,0185	−0,0129	
	0,0076	−0,0129	0,0104	

FONTE: A autora (2022).

TABELA 11 – EQUAÇÕES AJUSTADAS PELO EFEITO FIXO PARA TODA A BASE E AS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS PARA SUA COMPARAÇÃO COM A EQUAÇÃO TRADICIONAL GERAL DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL

		$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	R^2	Syx	$S\bar{y}x$
600 árvores	Tradicional				0,976	7,310	15,82
	Fixo	-2,472	2,013	0,502	0,869	17,136	37,09
71 árvores	Tradicional				0,990	5,595	14,13
	Fixo				0,917	15,779	39,86

FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: β_0, β_1 e β_2 são os coeficientes da equação, R^2 é o coeficiente de determinação, Syx é o erro padrão da estimativa (kg) e $S\bar{y}x$ é o coeficiente de variação (%).

5.4 Calibração da equação de biomassa

5.4.1 Calibração da equação por povoamento

A calibração em nível de povoamento foi efetuada com a segunda etapa de medição (79 árvores). Os melhores valores do coeficiente de determinação e do coeficiente de variação foram obtidos no ajuste tradicional (R^2= 0,991 aos 3 anos e $S\bar{y}x$= 5,36% aos 7 anos) e os valores inferiores foram no ajuste da equação mista calibrada 9A (R^2= 0,598 aos 3 anos e $S\bar{y}x$= 57,34% aos 4 anos). De maneira geral, os coeficientes de determinação (R^2) e o coeficiente de variação ($S\bar{y}x$) apresentaram resultados satisfatórios.

As diferenças em porcentagem relativa entre as estatísticas utilizadas em cada calibração e do efeito fixo da equação mista em relação ao método tradicional de ajuste, revelaram que todos os valores de R^2 se mantiveram abaixo de 5% de diferença e os valores de $S\bar{y}x$, em alguns casos foram maiores que 5%, como nos efeitos fixos de 3 a 7 anos e nos calibrados 6A (povoamentos de 3, 6 e 7 anos), 7A (povoamentos de 3, 5 e 7 anos), 8A (povoamentos de 6 e 7 anos) e em todos os povoamentos na calibração 9A.

O método de calibração que apresentou os melhores resultados gerais, considerando as estatísticas de ajuste e o custo benefício da prática de mensuração, foi o método de calibração 2A, em que as duas maiores árvores em dap por povoamento são utilizadas na calibração da equação mista (Tabela 12). O coeficiente de determinação (R^2) variou de 0,963 a 0,984 e o coeficiente de variação ($S\bar{y}x$) variou de 8,97 a 13,17%, sendo adequados em todos os povoamentos (Tabela 13).

TABELA 12 – DUAS MAIORES ÁRVORES EM dap SELECIONADAS NA CALIBRAÇÃO DOS POVOAMENTOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, NO RIO GRANDE DO SUL

Povoamento	Idade (anos)	Árvore	$\boldsymbol{dap}$ $(\boldsymbol{cm})$	$\boldsymbol{h}$ $(\boldsymbol{m})$	$\boldsymbol{b}$ $(\boldsymbol{kg})$
1	2	1	18,15	8,28	9,50
		2	24,06	9,07	9,20
2	3	1	63,61	12,41	14,55
		2	79,35	14,32	14,70
3	4	1	112,49	14,48	18,30
		2	135,09	16,39	16,10
4	5	1	176,03	18,14	18,60
		2	210,23	19,89	17,25
5	6	1	178,90	18,46	20,60
		2	260,53	20,69	20,00
6	7	1	224,32	19,58	20,20
		2	273,17	21,49	19,70

FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: dap é o diâmetro à altura do peito em cm; h é a altura em m e b é a biomassa em kg.

As estatísticas da calibração 2A apresentaram valores melhores que o efeito fixo da equação mista e semelhantes aos valores apresentados na abordagem tradicional. Os valores calibrados foram R^2= 0,986 e $S\bar{y}x$= 10,95%, os valores do efeito fixo da equação mista foram R^2= 0,758 e $S\bar{y}x$= 45,97% e os valores das estatísticas de ajuste da equação tradicional foram R^2= 0,991 e $S\bar{y}x$= 8,99%. Esses resultados evidenciam a necessidade da calibração da equação mista, revelando que a calibração da equação com apenas duas árvores possibilitou estimar valores próximos aos obtidos com a equação tradicional.

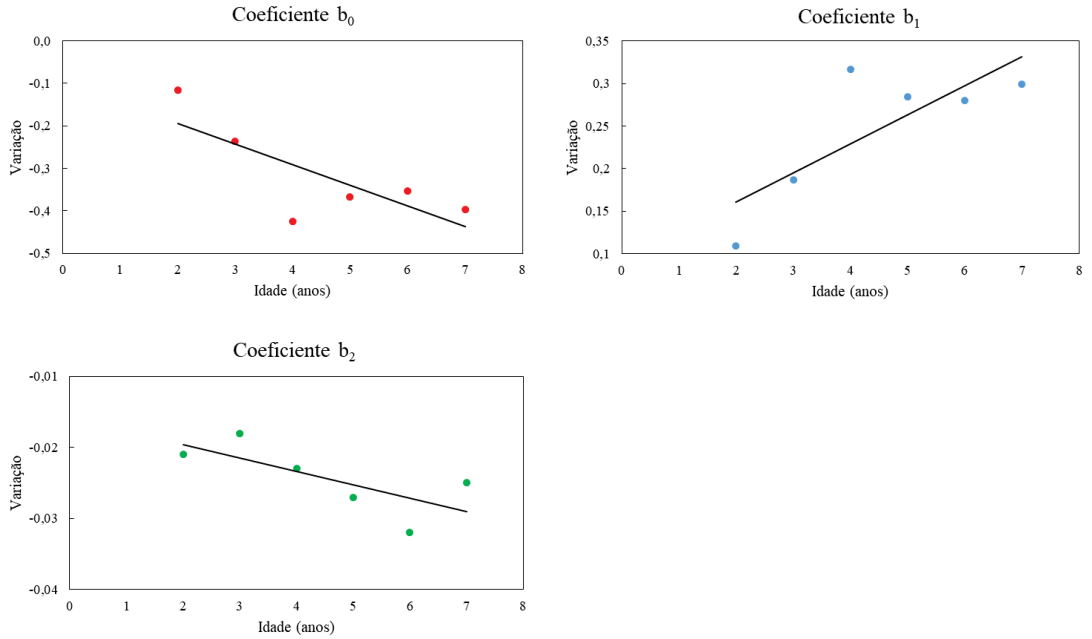
TABELA 13 – EQUAÇÕES AJUSTADAS PELA EQUAÇÃO MISTA CALIBRADA (2A) NOS POVOAMENTOS, PELA PARTE FIXA DA EQUAÇÃO MISTA E AS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS PARA COMPARAÇÃO (R^2, Syx E $S\bar{y}x$) PARA CADA POVOAMENTO, PELO MÉTODO TRADICIONAL, PARA A PARTE FIXA DA EQUAÇÃO MISTA E PARA TODA A BASE CALIBRADA DA SEGUNDA ETAPA DE MEDIÇÃO (79 ÁRVORES), DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL

Povoamento	Idade	β_0	β_1	β_2	$\hat{b}_0$	$\hat{b}_1$	$\hat{b}_2$	R^2	Syx	$S\bar{y}x$
1	2	-2,500	1,967	0,544	-0,116	0,109	-0,021	0,963	1,309	10,88
2	3	-2,500	1,967	0,544	-0,236	0,187	-0,018	0,984	3,220	10,47
3	4	-2,500	1,967	0,544	-0,425	0,317	-0,023	0,980	6,169	13,17
4	5	-2,500	1,967	0,544	-0,367	0,284	-0,027	0,980	9,536	10,25
5	6	-2,500	1,967	0,544	-0,353	0,280	-0,032	0,979	10,606	10,97
6	7	-2,500	1,967	0,544	-0,396	0,299	-0,025	0,968	13,070	8,97
Tradicional								0,991	6,656	8,99
Fixo		-2,500	1,967	0,544				0,758	34,045	45,97
Calibrada								0,986	8,107	10,95

FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: β_0, β_1 e β_2 são os coeficientes fixos da equação, $\hat{b}_0$, $\hat{b}_1$ e $\hat{b}_2$ são os coeficientes aleatórios da equação, R^2 é o coeficiente de determinação, Syx é o erro padrão da estimativa (kg) e $S\bar{y}x$ é o coeficiente de variação (%).

Os valores de $\hat{b}_0$, $\hat{b}_1$ e $\hat{b}_2$ variaram 27%, 64% e 44%, respectivamente. Embora os valores do coeficiente $\hat{b}_1$ aumentassem, as variações dos três coeficientes não apresentaram uma relação definida e sistemática nos povoamentos (Figura 9).

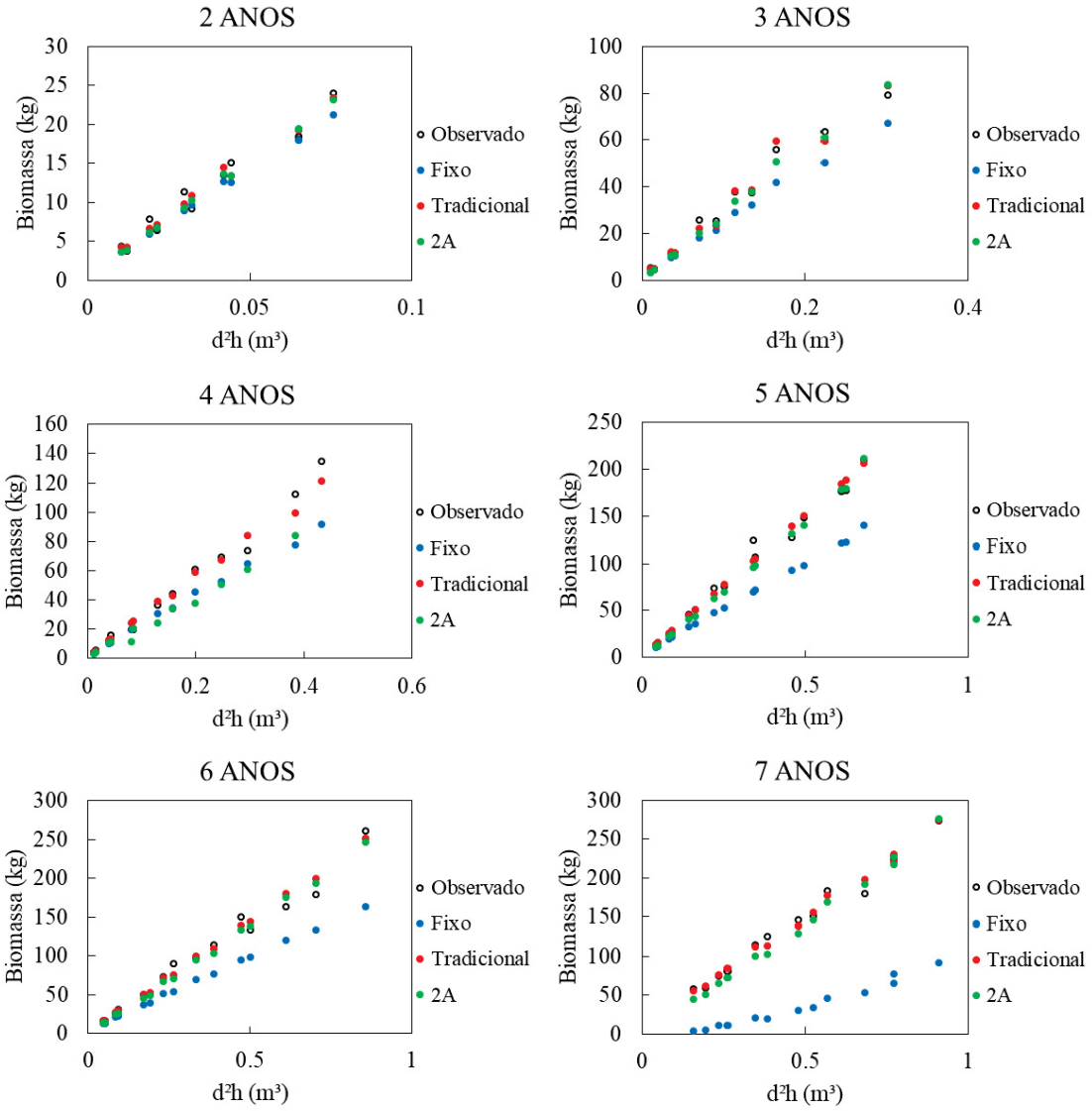
FIGURA 9 – VARIAÇÃO DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO MISTA CALIBRADA 2A ($\hat{b}_0$, $\hat{b}_1$ E $\hat{b}_2$) NOS POVOAMENTOS PARA A PRIMEIRA ETAPA DE MEDIÇÃO (670 ÁRVORES) DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL



FONTE: a autora (2022).

Os gráficos de dispersão para cada povoamento relacionaram a variável combinada d^2h (m³) com a biomassa observada e estimada em kg, pelo efeito fixo, método tradicional e pela calibração da equação mista (2A) (Figura 10). Os valores da biomassa estimada pelo efeito fixo se afastaram dos valores do ajuste tradicional, principalmente à medida que a idade do povoamento aumenta (5, 6 e 7 anos) e as biomassas estimadas pela equação calibrada se aproximam dos valores ajustados pelo método tradicional. Em cada povoamento, a dispersão dos valores da biomassa estimada foi proporcional ao tamanho das árvores (d^2h).

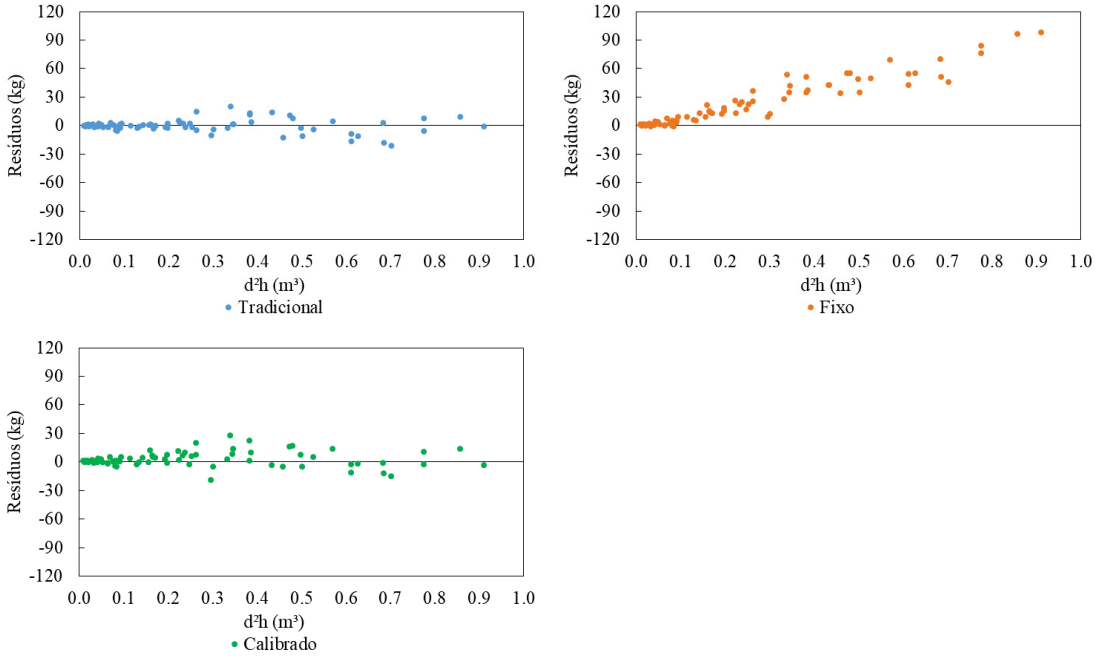
FIGURA 10 – DISPERSÃO DA BIOMASSA OBSERVADA (kg) E DAS BIOMASSAS ESTIMADAS (kg) PELO MÉTODO TRADICIONAL, PELO EFEITO FIXO E PELA EQUAÇÃO MISTA CALIBRADA COM A VARIÁVEL COMBINADA d^2h (m³) DA SEGUNDA ETAPA DE MEDIÇÃO (79 ÁRVORES) EM CADA POVOAMENTO DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL.



FONTE: a autora (2022).

Nos gráficos de resíduos (Figura 11) estão apresentados os resíduos dos ajustes da equação tradicional, efeito fixo e da equação calibrada, com valores variando de -120 a 120kg. Os resíduos da equação tradicional e da equação mista calibrada apresentaram valores semelhantes, enquanto a dispersão do efeito fixo apresentou valores distintos, subestimando os valores de biomassa, principalmente para as maiores árvores.

FIGURA 11 – GRÁFICOS DE RESÍDUOS DAS EQUAÇÕES TRADICIONAL (TESTEMUNHA), DO EFEITO FIXO E DA EQUAÇÃO CALIBRADA PARA OS DADOS DAS 79 ÁRVORES NOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL

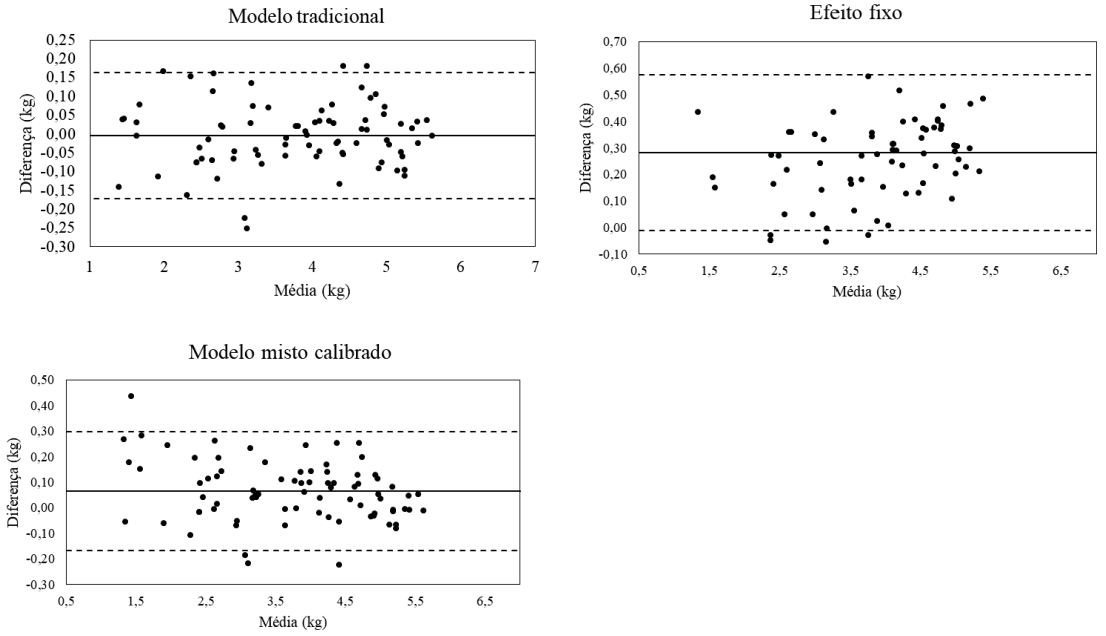


FONTE: a autora (2022).

Os limites de concordância (Figura 12) entre a biomassa observada e a biomassa estimada pelo método tradicional, efeito fixo e modelo misto calibrado apresentaram resultados satisfatórios. Para o efeito fixo e para o modelo misto calibrado, 95% dos valores calculados se mantiveram dentro dos limites e para o método tradicional, essa porcentagem foi de 93%. Os limites apresentados no gráfico do efeito fixo variaram de -0,001 a 0,57, revelando praticamente valores positivos. Esse resultado indica uma subestimativa da biomassa estimada pelo efeito fixo.

A medida de concordância representada por ρ (Tabela 14) revelou resultados satisfatórios (acima de 0,95) para as três comparações, porém observa-se que para o efeito fixo o valor de ρ foi inferior (0,9610), indicando que os modelos tradicionais (0,9973) e o modelo misto calibrado (0,9989) são mais comparáveis com os valores de biomassa observada.

FIGURA 12 – LIMITES DE CONCORDÂNCIA PARA A COMPARAÇÃO ENTRE A BIOMASSA OBSERVADA E ESTIMADA PELO MÉTODO TRADICIONAL, EFEITO FIXO E MODELO MISTO CALIBRADO (2A) NA SEGUNDA ETAPA DE MEDIÇÃO (79 ÁRVORES) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA-NEGRA, NO RIO GRANDE DO SUL



FONTE: a autora (2022).

TABELA 14 – MEDIDA DE CONCORDÂNCIA PARA A COMPARAÇÃO ENTRE A BIOMASSA OBSERVADA E ESTIMADA PELO MÉTODO TRADICIONAL, EFEITO FIXO E MODELO MISTO CALIBRADO (2A) NA SEGUNDA ETAPA DE MEDIÇÃO (79 ÁRVORES) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA-NEGRA, NO RIO GRANDE DO SUL

Comparação	ρ
Método tradicional	0,9973
Efeito fixo	0,9610
Modelo misto calibrado	0,9989

FONTE: A autora (2022).

5.4.2 Calibração da equação pelos grupos: povoamento e parcela

A etapa de medição utilizada nessa calibração foi de 71 árvores, separadas aleatoriamente por grupo de povoamentos e parcelas. Os melhores valores de R^2 e $S\bar{y}x$ (0,98 e 7,15%, respectivamente) foram encontrados no ajuste tradicional no povoamento de 10,08 anos. Os resultados revelaram que todos os valores de R^2 e $S\bar{y}x$ foram melhores, de maneira geral, nos povoamentos mais velhos.

A diferença em porcentagem relativa entre as estatísticas em cada calibração e do efeito fixo em relação ao método tradicional de ajuste, revelaram que todos os valores de R^2 se mantiveram abaixo de 5%. Os valores de $S\bar{y}x$ ficaram acima de 5% no povoamento com 1 ano em todos os métodos, nos povoamentos com 5,25 e 10,08 anos no efeito fixo

e nas equações mistas calibradas 3A, 4A, 5A, 8A e 9A e no povoamento com 10,08 anos nas calibrações 6A e 7A.

O método de calibração selecionado como o mais adequado foi o 2A, em que são utilizadas as duas maiores árvores em dap para a calibração da equação mista por grupo de povoamento (Tabela 15). Os valores gerais apresentados na equação calibrada selecionada 2A (R^2= 0,987 e $S\bar{y}x$= 16,04%) (Tabela 16) foram melhores quando comparados aos obtidos no efeito fixo (R^2= 0,917 e $S\bar{y}x$= 39,86%) e semelhantes ao ajuste tradicional (R^2= 0,990 e $S\bar{y}x$= 14,13%), com uma diferença de apenas 0,3% para o R^2 e 12% para o $S\bar{y}x$.

TABELA 15 – DUAS MAIORES ÁRVORES EM dap SELECIONADAS NA CALIBRAÇÃO DOS POVOAMENTOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, NO RIO GRANDE DO SUL

Povoamento	Parcela	Idade (anos)	Árvore	$\boldsymbol{dap}$ $(\boldsymbol{cm})$	$\boldsymbol{h}$ $(\boldsymbol{m})$	$\boldsymbol{b}$ $(\boldsymbol{kg})$
1	36	1,00	1	3,02	3,30	2,38
			2	3,34	3,80	2,58
2	42	1,83	1	8,91	8,87	23,58
			2	9,71	10,05	23,79
3	27	2,75	1	11,46	11,90	44,21
			2	11,78	12,60	41,05
4	23	5,25	1	14,96	16,80	81,82
			2	17,98	16,40	132,73
5	3	10,08	1	19,74	16,70	159,20
			2	20,69	19,60	215,04

FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: dap é o diâmetro à altura do peito em cm; h é a altura em m e b é a biomassa em kg.

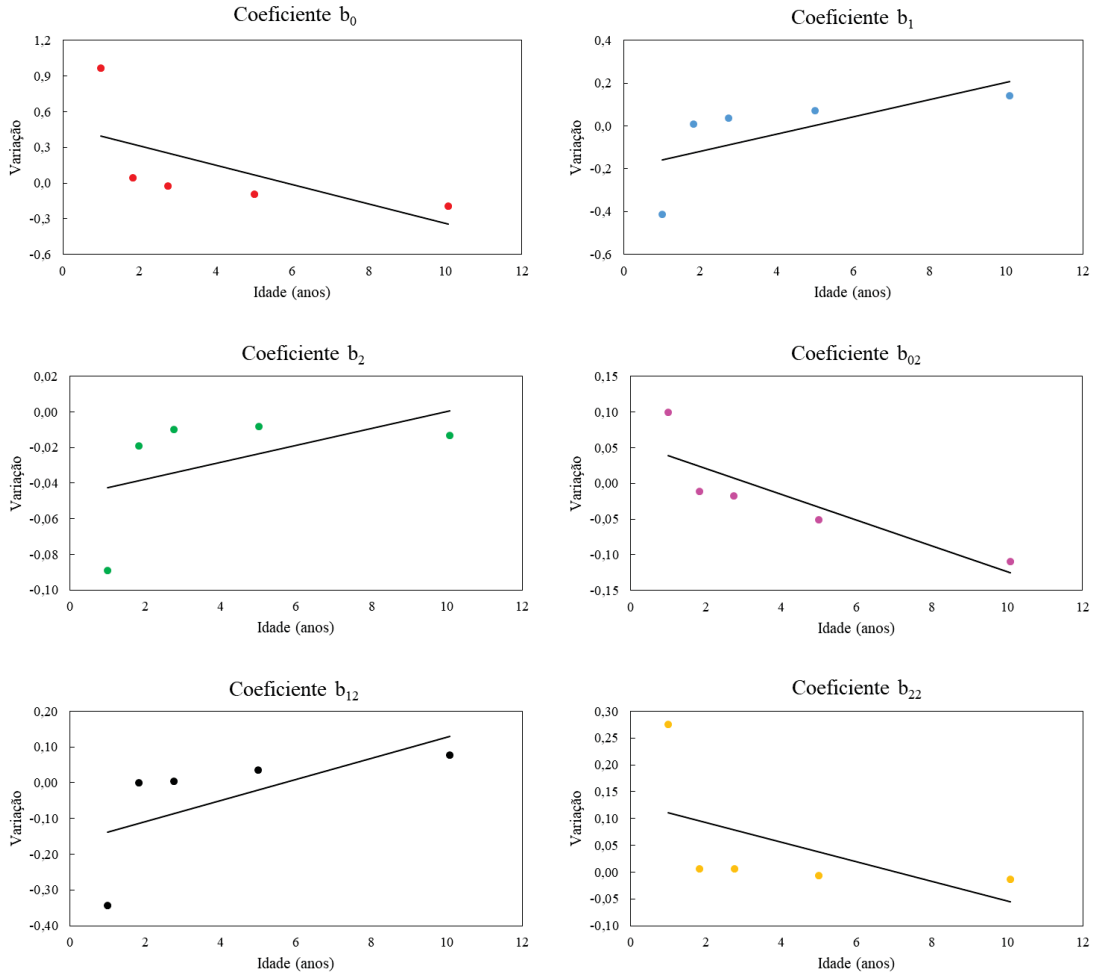
TABELA 16 – EQUAÇÕES AJUSTADAS PELA EQUAÇÃO MISTA CALIBRADA (2A) NOS GRUPOS DE POVOAMENTOS, DA PARTE FIXA E AS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS PARA COMPARAÇÃO, PELO MÉTODO TRADICIONAL, PARA A PARTE FIXA E PARA TODA A BASE CALIBRADA PELO MÉTODO 2A DAS PARCELAS SELECIONADAS PARA CALIBRAÇÃO DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL

Povoamento	Parcela	Idade	β_0	β_1	β_2	$\tilde{b}_0$	$\hat{b}_1$	$\hat{b}_2$	$\tilde{b}_{02}$	$\hat{b}_{12}$	$\hat{b}_{22}$	R^2	Syx	$S\bar{y}x$
1	36	1,00	-2,480	2,013	0,502	0,965	-0,414	-0,089	0,100	-0,344	0,276	0,662	0,304	20,53
2	42	1,83	-2,480	2,013	0,502	0,047	0,007	-0,019	-0,011	0,000	0,006	0,863	2,222	14,71
3	27	2,75	-2,480	2,013	0,502	-0,027	0,035	-0,010	-0,017	0,004	0,006	0,948	2,892	11,64
4	23	5,25	-2,480	2,013	0,502	-0,093	0,072	-0,008	-0,051	0,036	-0,006	0,931	9,801	20,39
5	3	10,08	-2,480	2,013	0,502	-0,196	0,141	-0,013	-0,110	0,078	-0,013	0,969	12,362	8,98
Trad												0,990	5,595	14,13
Fixo			-2,480	2,013	0,502							0,917	15,779	39,86
Calibrado												0,987	6,349	16,04

FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: β_0, β_1 e β_2 são os coeficientes fixos da equação, $\tilde{b}_0$, $\tilde{b}_1$, $\tilde{b}_2$, $\hat{b}_{02}$, $\hat{b}_{12}$ e $\hat{b}_{22}$ são os coeficientes aleatórios da equação, R^2 é o coeficiente de determinação, Syx é o erro padrão da estimativa (kg) e $S\bar{y}x$ é o coeficiente de variação (%).

Os valores do coeficiente $\hat{b}_0$ diminuíram (0,965 a -0,196) e os valores de $\hat{b}_1$ e $\hat{b}_2$ aumentaram com o aumento das idades dos povoamentos (-0,414 a 0,141 e -0,089 a -0,013); já os coeficientes para as parcelas ($\hat{b}_{02}$, $\hat{b}_{12}$ e $\hat{b}_{22}$), de maneira geral, apresentaram valores menores (0,100 a -0,110, -0,344 a 0,078 e 0,276 a -0,013, respectivamente), indicando que esses influenciaram pouco na calibração da equação. Assim como na primeira abordagem (em nível de povoamento), os coeficientes em nível de povoamento e parcela não apresentaram uma variação sistemática entre os povoamentos (Figura 13).

FIGURA 13 – VARIAÇÃO DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO MISTA CALIBRADA 2A ($\hat{b}_0$, $\hat{b}_1$, $\hat{b}_2$, $\hat{b}_{02}$, $\hat{b}_{12}$ E $\hat{b}_{22}$) NOS GRUPOS DE POVOAMENTOS E PARCELAS PARA A BASE DE DADOS DE 600 ÁRVORES DOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL

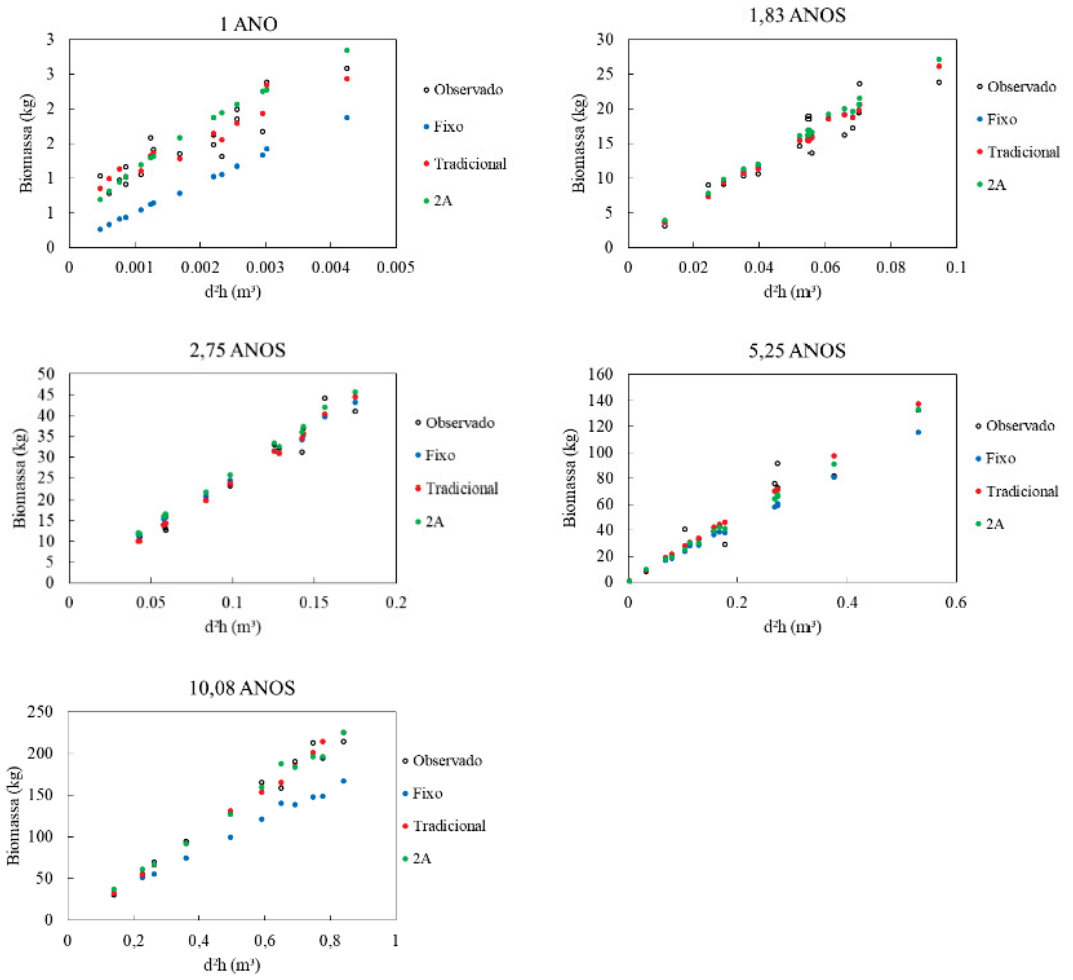


FONTE: a autora (2022).

Os gráficos de dispersão dos valores de biomassa observada e estimada (Figura 14) reforçaram que, a estimativa pela equação tradicional e pela equação calibrada se aproximam à medida que a idade do povoamento aumenta e que os dois permanecem próximos aos dados observados, já no efeito fixo, os valores se afastam da equação

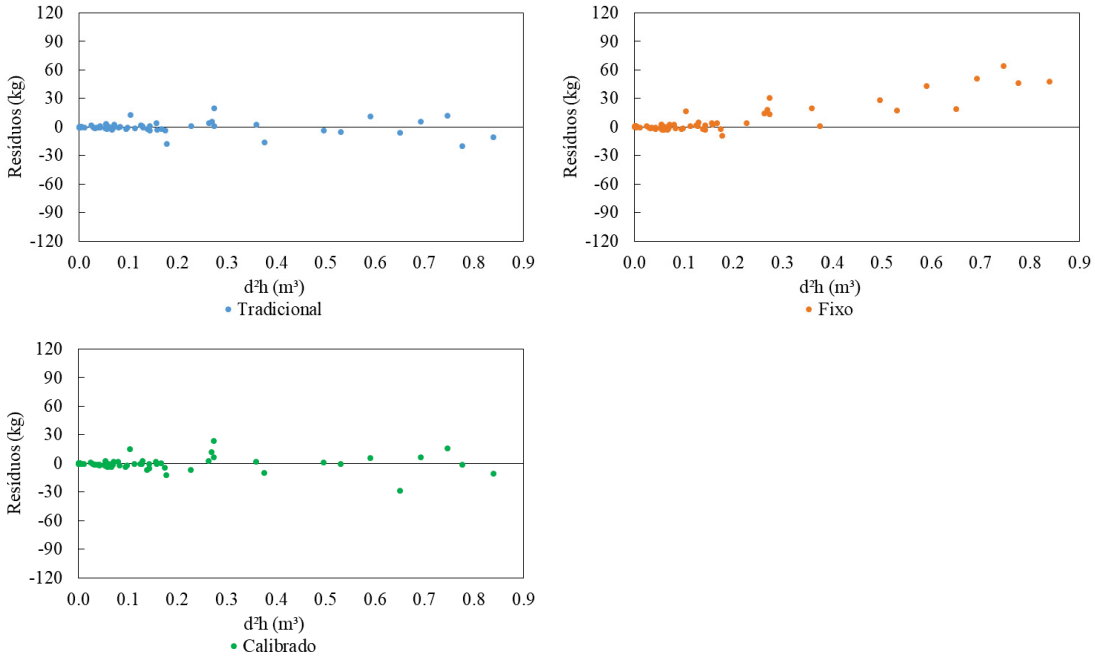
tradicional à medida que o povoamento envelhece. Na Figura 15 estão apresentados os resíduos dos ajustes da equação tradicional, do efeito fixo e da equação calibrada, revelando que a equação tradicional e a equação mista calibrada apresentam a mesma tendência na distribuição de resíduos e que o efeito fixo apresenta resíduos mais dispersos (subestimando os valores).

FIGURA 14 – DISPERSÃO DA BIOMASSA OBSERVADA (kg) E DAS BIOMASSAS ESTIMADAS (kg) PELOS: MÉTODO TRADICIONAL, EFEITO FIXO E EQUAÇÃO MISTA CALIBRADA (2A) EM FUNÇÃO DA VARIÁVEL COMBINADA d^2h (m³) DAS PARCELAS SELECIONADAS PARA CALIBRAÇÃO NOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL



FONTE: a autora (2022).

FIGURA 15 – GRÁFICOS DE RESÍDUOS DAS EQUAÇÕES TRADICIONAL (TESTEMUNHA), DO EFEITO FIXO E DA EQUAÇÃO CALIBRADA PARA OS DADOS DE 71 ÁRVORES NOS PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL



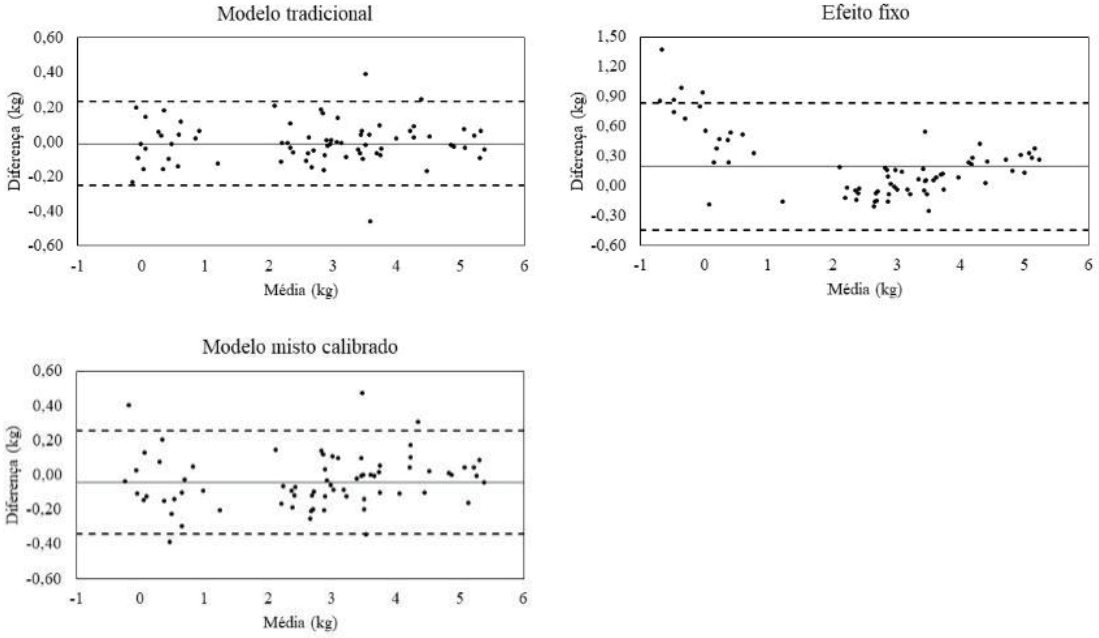
FONTE: a autora (2022).

Semelhante à abordagem em nível de povoamento, os limites de concordância (Figura 16) entre a biomassa observada e a biomassa estimada em nível de povoamento e parcela revelaram resultados satisfatórios. Na comparação da biomassa observada e da biomassa estimada pelo método tradicional e pelo efeito fixo 96% dos valores calculados se mantiveram dentro dos limites de concordância e no modelo misto calibrado, essa porcentagem foi de 94%. Os limites de concordância do efeito fixo apresentaram valores maiores, revelando um viés maior (-0,45 a 0,83) quando comparado aos valores do método tradicional (-0,25 a 0,23) e do modelo misto calibrado (-0,34 a 0,26).

A medida de concordância ρ (Tabela 17) revelou resultados satisfatórios (acima de 0,95) nas três comparações, porém observa-se que para o efeito fixo o valor de ρ foi inferior (0,9759), indicando que os modelos tradicionais (0,9972) e o modelo misto calibrado (0,9953) são mais comparáveis com os valores de biomassa observada.

Os resultados encontrados nas duas abordagens ressaltam que, as medidas de concordância devem ser utilizadas em conjunto com outras estatísticas na avaliação dos ajustes.

FIGURA 16 – LIMITES DE CONCORDÂNCIA PARA A COMPARAÇÃO ENTRE A BIOMASSA OBSERVADA E ESTIMADA PELO MÉTODO TRADICIONAL, EFEITO FIXO E MODELO MISTO CALIBRADO (2A) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA-NEGRA, NO RIO GRANDE DO SUL



FONTE: a autora (2022).

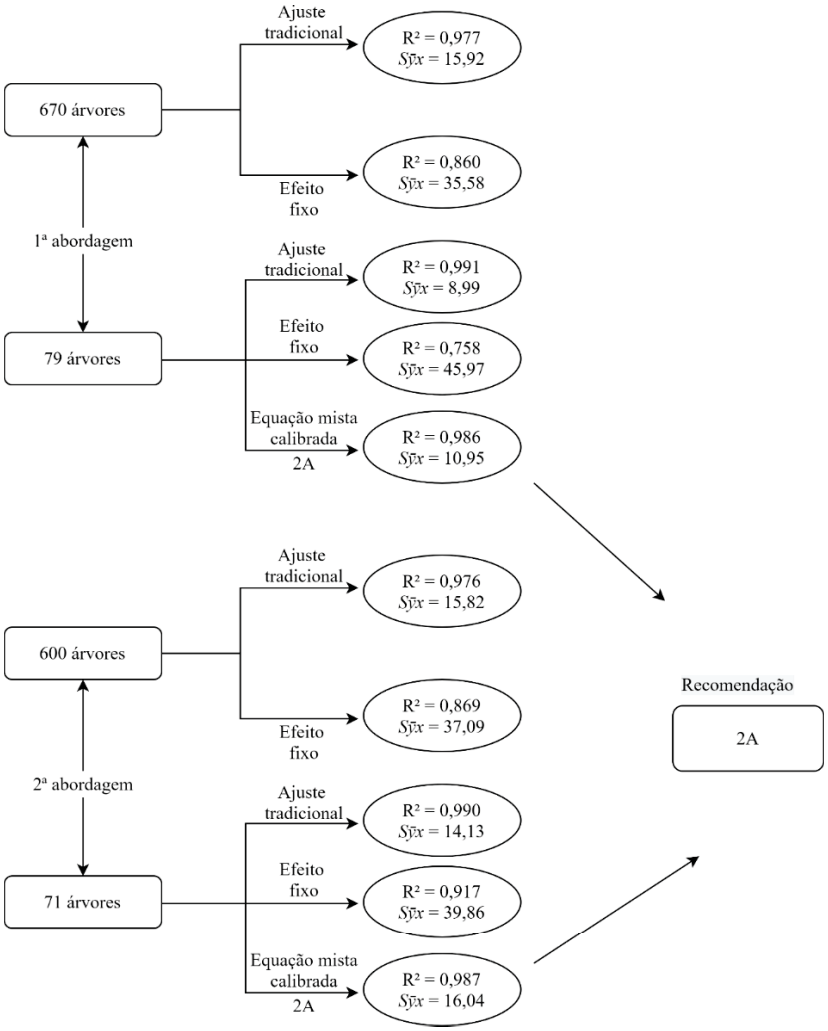
TABELA 17 – MEDIDA DE CONCORDÂNCIA PARA A COMPARAÇÃO ENTRE A BIOMASSA OBSERVADA E ESTIMADA PELO MÉTODO TRADICIONAL, EFEITO FIXO E MODELO MISTO CALIBRADO (2A) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA-NEGRA, NO RIO GRANDE DO SUL

Comparação	ρ
Método tradicional	0,9972
Efeito fixo	0,9759
Modelo misto calibrado	0,9953

FONTE: A autora (2022).

O resumo dos resultados está apresentado na Figura 17, revelando as estatísticas de ajustes e a recomendação das árvores utilizadas na calibração.

FIGURA 17 – PRINCIPAIS RESULTADOS DAS ABORDAGENS PARA ESTIMAR A BIOMASSA TOTAL EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, LOCALIZADOS NO RIO GRANDE DO SUL



FONTE: a autora (2022).

Em que: 2A: é a calibração utilizando as duas maiores árvores da variável dap para cada povoamento.

6 DISCUSSÃO

6.1 Métricas das variáveis biomassa, diâmetro à altura do peito e altura total

As correlações das variáveis dap, altura total (h) e da variável combinada d^2h com a biomassa (b) foram confiáveis estatisticamente. Os valores de correlação da altura (h) com a biomassa foram menores quando comparados com o dap. Esse efeito é esperado, pois geralmente árvores mais jovens tendem a crescer primeiro em altura e o inverso acontece com o dap (MARZILIANO; TOGNETTI; LOMBARDI, 2019), o que explica o poder de influência da variável altura.

A variável combinada d^2h apresentou uma correlação linear confiável estatisticamente com a biomassa, uma vez que o dap e a altura total são variáveis que explicam grande parte da variável dependente (TAEROE et al., 2015). A relação entre o dap e a altura (h) com a biomassa para a espécie acácia-negra já foi evidenciado em trabalhos como o de Sanquetta et al. (2014), Behling et al. (2018) e Costa Junior et al. (2018).

A correlação do dap com a biomassa aumenta para os povoamentos mais velhos da espécie acácia-negra. Isso decorre do fato que em um primeiro momento a biomassa das folhas e dos ramos tende a ser maior nas árvores jovens, pois o crescimento desses componentes é um fator crucial para a interceptação de luz e recursos necessários as atividades fotossintéticas (FATEMI et al., 2011; MENSAH; KAKAÏ; SEIFERT, 2016). Conforme o povoamento envelhece, mais recursos são alocados para o crescimento do caule, aumentando também a alocação de biomassa nesse componente (MENSAH; KAKAÏ; SEIFERT, 2016) até alcançar a estabilidade.

A biomassa total das árvores varia entre as parcelas e os povoamentos por diversos fatores, como clima, sítios, topografia e condições ambientais (WANG et al., 2013; FORTIER et al., 2017; YANG et al., 2019). Então as medições realizadas apenas nas árvores podem não ser suficientes para uma estimativa acurada de biomassa (CHAVE et al., 2005).

O efeito do povoamento na quantificação de biomassa expressa o resultado do crescimento da árvore e do equilíbrio da alocação de recursos entre os componentes, de forma a manter as funções e as atividades fisiológicas da planta (MENSAH; KAKAÏ; SEIFERT, 2016). Uma alternativa pode ser a adição de uma variável que represente o

povoamento como efeito fixo em um modelo, porém essa opção não é a mais apropriada, uma vez as variações nos povoamentos não são sistemáticas (FORTIER et al, 2017; DUTCĂ et al, 2018).

No presente trabalho, foi possível observar que os coeficientes dos modelos tradicionais (β_0, β_1 e β_2) e mistos calibrados em nível de idade e parcela (b_{1k}, b_{2k}, b_{1jk} e b_{2jk}) variaram nos povoamentos, porém essa variação não ocorreu de forma sistemática.

Sendo assim, ao adicionar o povoamento (representado pelas idades) como efeito aleatório deseja-se obter outras variabilidades, como, por exemplo, das condições ambientais em que o povoamento está inserido, ou seja, quando ocorre a calibração do modelo misto com algumas árvores do povoamento de interesse, essas variações ambientais são adicionadas.

Em cada grupo de povoamento, a dispersão da biomassa observada aumenta proporcionalmente ao aumento de d^2h e essa condição acontece devido ao crescimento das árvores, quando elas enfrentam adversidades, como competição, que causam variações na sua forma e, consequentemente, na sua biomassa (LARSON, 1963; BURKHART; TOMÉ, 2012; GEITMANN; GRIL, 2018). Estudos como o de Yang, Zhang e He (2019) revelaram que o crescimento das árvores varia quando elas enfrentam adversidades, como competição, causando variações na sua forma e, por consequência, na biomassa.

6.2 Equações de biomassa – método tradicional

Nas duas abordagens, os valores de β_0, β_1 e β_2 apresentaram variações, revelando a existência de alterações nas associações das variáveis h e dap com a biomassa entre as idades dos povoamentos, devido às interações que ocorrem nas florestas (KÖHL; NEUPANE; LOTFIOMRAN, 2017; XIANG et al., 2021). Embora os valores dos coeficientes oscilem, aumentando e diminuindo, essa variação não apresenta uma relação sistemática, ou seja, povoamentos diferentes sofrem a influência de fatores externos que não podem ser adicionados aos modelos como efeitos fixos, pois variam de forma aleatória dentro dos povoamentos, parcelas, sítios, entre outros.

As estatísticas R^2, Syx e $S\bar{y}x$ apresentaram resultados confiáveis estatisticamente, principalmente nos povoamentos com maiores idades (próxima à idade de rotação), revelando que os modelos tradicionais ajustados por povoamento são eficientes para

representar os povoamentos, conforme já demonstrados em Chave et al. (2004) e Basuki et al. (2009), portanto são adequados para comparação dos resultados do modelo misto. Porém na modelagem tradicional, para o cálculo das estimativas de biomassa em novos povoamentos é necessário a mensuração de 50 árvores, elevando o custo e o tempo dessa operação.

Harrell et al. (1997), revelaram que a regressão linear simples foi adequada para a estimativa de biomassa acima do solo em povoamentos de *Pinus*. Zheng et al. (2015), revelaram que a estimativa do modelo tradicional e do modelo misto produziram gráficos de resíduos muito semelhantes e ambos os ajustes foram adequados na estimativa de biomassa em povoamentos de *Quercus variabilis*. Porém alguns autores relatam que a qualidade do ajuste utilizando o método dos mínimos quadrados ordinários (OLS) depende principalmente do tamanho e da variabilidade da amostra utilizada (SILESHI, 2014).

6.3 Equações de biomassa – efeito fixo do modelo misto

As estatísticas de ajuste do efeito fixo da equação mista não foram consideradas confiáveis estatisticamente, quando comparadas com às obtidas para a equação tradicional nas duas abordagens, revelando que apenas o efeito fixo apresentou menor acurácia que a equação tradicional. A variação da biomassa estimada pelo efeito fixo nas duas abordagens foi maior nas maiores árvores e nos povoamentos mais velhos, comprovando que as relações nos povoamentos mudam conforme as árvores crescem e a idade do povoamento aumenta (SANQUETTA et al., 2014).

Esse resultado revela a existência dos grupos nos povoamentos em que, apenas uma equação ajustada para todos os povoamentos não foi adequada para as estimativas. Outros trabalhos também obtiveram resultados semelhantes como De Miguel, Mehtätalo e Durkaya (2014) que encontraram valores de estimativas superestimadas e subestimadas em modelos generalizados de biomassa apenas com o efeito fixo da equação mista de biomassa. Valbuena et al. (2016) observaram, que modelos de efeitos fixos não foram acurados quando comparados a modelos mistos calibrados.

Os valores encontrados na matriz de variância/covariância do cluster parcela foram menores, quando comparados aos valores encontrados no cluster povoamento. Esse resultado revela que não há a necessidade de inclusão do cluster parcela para os dados do presente trabalho, indicando que as condições onde as parcelas foram alocadas são

similares, pois as parcelas nos povoamentos estão distribuídas em uma variação de sítio pequena e as condições de plantios e os tratos silviculturais são as mesmas entre as parcelas para um mesmo povoamento.

Resultados distintos foram encontrados por Valbuena et al. (2016) que utilizaram as parcelas como clusters em um estudo de modelo misto hipsométrico e de biomassa acima do solo e apresentaram resultados satisfatórios. O trabalho desses autores sugeriu que, a utilização do modelo de efeito misto adicionando parcelas como efeito aleatório corrigiu algumas variações relevantes entre as parcelas causadas por diferentes solos e produtividades locais, refletindo em uma melhor estimativa das variáveis.

6.4 Calibração das equações

6.4.1 Calibração em nível de povoamento

Na primeira abordagem do trabalho, a melhor calibração foi a 2A, na qual a calibração foi realizada com as duas maiores árvores com relação ao dap para cada povoamento. Em todas os povoamentos, os valores das estatísticas obtidas na calibração 2A foram semelhantes as estatísticas obtidas na abordagem tradicional. As estatísticas da equação tradicional (testemunha), do efeito fixo e da equação mista calibrada (2A), revelaram que a equação mista calibrada se assemelha à equação tradicional e que há um ganho elevado em relação ao efeito fixo da equação mista, ou seja, mensurando as duas maiores árvores em dap em um novo povoamento foi possível calibrar uma equação já existente para outro povoamento e obter resultados semelhantes ao método tradicional, em que são mensuradas cerca de 50 árvores por povoamento.

Os valores dos coeficientes $\hat{b}_0$, $\hat{b}_1$ e $\hat{b}_2$, revelaram as relações existentes nos povoamentos. O coeficiente $\hat{b}_1$ aumentou conforme o aumento da idade do povoamento, essa relação foi esperada pois esse coeficiente está associado ao dap, então à medida que as árvores crescem e maior proporção da biomassa está presente no fuste, essa variável passa a explicar mais da biomassa total da árvore (KING, 2011). Embora a variação do $\hat{b}_1$ aumentasse, ela não apresentou uma relação sistemática entre os povoamentos, o mesmo aconteceu com os coeficientes $\hat{b}_0$ e $\hat{b}_2$, realçando que ocorrem variações nos povoamentos que são aleatórias.

6.4.2 Calibração em nível de povoamento e parcela

A calibração utilizada como a mais adequada na segunda abordagem foi a 2A (as duas maiores árvores em relação ao diâmetro à altura do peito por povoamento). Nessa abordagem os valores da equação calibrada foram semelhantes aos valores obtidos na equação tradicional, reafirmando que as equações mistas calibradas utilizando informações de um povoamento estabelecido e algumas árvores do novo povoamento de interesse resultam em estimativas semelhantes aos da equação ajustada tradicionalmente (em que ocorre a mensuração de muitas árvores). Os melhores resultados da calibração foram obtidos para os povoamentos mais velhos.

Os valores dos coeficientes associados ao cluster parcela ($\hat{b}_{02}$, $\hat{b}_{12}$ e $\hat{b}_{22}$) foram consideravelmente menores que os coeficientes associados ao cluster povoamento ($\hat{b}_0$, $\hat{b}_1$ e $\hat{b}_2$), indicando que a inserção desse cluster provoca ganhos pequenos em acurácia nas estimativas de biomassa dos presentes dados, podendo então ser excluído da calibração. Esse fato acontece porque as parcelas do presente estudo estão em condições de plantios semelhantes, com pouca variação de sítio entre as parcelas (VISMARA; MEHTÄTALO; BATISTA, 2016). Resultados contrários foram encontrados por Bouriaud, Stefan e Saint-André (2019) em que, a utilização da modelagem mista em nível de parcela foi satisfatória, pois as parcelas usadas na calibração foram amostradas em locais com condições de cultivo muito diferentes.

6.5 Comparação das abordagens

A calibração do modelo misto comprova a existência de clusters em nível de povoamento e revela que há variabilidade causada por esse agrupamento. As variações de dap e h com a biomassa nos povoamentos não ocorrem de forma sistemática e por isso não é apropriado adicionar a variável idade do povoamento, quando o objetivo é obter a variação entre os povoamentos decorrentes das condições ambientais, como um efeito fixo no modelo. A variação dos coeficientes das equações tradicionais (β_0, β_1 e β_2) e mistas calibradas em nível de povoamento e parcela ($\hat{b}_0$, $\hat{b}_1$, $\hat{b}_2$, $\hat{b}_{02}$, $\hat{b}_{12}$ e $\hat{b}_{22}$) demonstraram essa variabilidade entre os povoamentos.

A calibração em nível de parcela dentro do nível povoamento no presente estudo não foi eficiente pois, as parcelas dentro dos povoamentos estavam alocadas em

condições de plantios semelhantes e os tratamentos silviculturais eram os mesmos para as parcelas dentro de um povoamento.

Observa-se também que, o modelo misto apenas com o efeito fixo não estima a biomassa com acurácia em todas os povoamentos. Esse fato acontece porque o efeito fixo não considera a variação dos valores de biomassa entre os povoamentos.

Nas duas abordagens apresentadas a melhor calibração foi a 2A, ou seja, utilizando dados de ajuste de um povoamento já estabelecido e calibrando esse ajuste usando-se as duas maiores árvores em dap no novo povoamento de interesse foi possível obter resultados semelhantes do que com a abordagem tradicional, em que seriam mensuradas 50 árvores no novo povoamento, resultando em uma redução de custos e tempo (YANG et al. 2020).

A acurácia da calibração depende do número e tamanho das árvores escolhidas (SHARMA et al., 2017). Assegurando uma maior acurácia na previsão, trabalhos como o de Trincado, Vanderschaaf e Burkhart (2007) e Sharma e Breidenbach (2015), revelaram que utilizar uma ou duas árvores podem funcionar adequadamente para a calibração em povoamentos homogêneos. Outros trabalhos como Sharma et al. (2017), Özçelik et al. (2018), Kalbi et al. (2018), Sharma et al. (2019) e Chapaign e Sharma (2021), utilizaram quatro árvores para calibrar uma equação mista, aumentando a acurácia da estimativa e Bronisz e Mehtätalo (2020), encontraram ganhos significativos na predição quando árvores extremas da faixa de diâmetro foram utilizadas em uma calibração de modelo hipsométrico de efeito misto.

Pelos resultados obtidos, recomenda-se a utilização das duas maiores árvores em relação do dap uma vez que, nos povoamentos mais velhos em que há o maior interesse prático em conhecer a biomassa florestal (idade de rotação), grande quantidade da biomassa total está alocada no fuste e o dap é uma variável que estima de forma satisfatória a biomassa do fuste. Sanquetta et al., (2014) revelaram que, 80% da biomassa de acácia-negra estava estocada na madeira e na casca das árvores com idades de 7 anos (idade de rotação).

Foi possível observar que a calibração dos modelos melhorou as estimativas de biomassa total, especialmente quando foram selecionadas mais árvores para calibrar os modelos, porém a mensuração consiste em uma prática demorada e onerosa, sendo necessária uma avaliação de custos, pois o ganho em acurácia ao mensurar mais árvores pode ser pequeno (YANG et al. 2020). Por exemplo, na primeira abordagem, a calibração 5A apresentou uma diferença relativa média entre a equação tradicional e a equação mista

de R^2= 0,0013 e $S\bar{y}x$= 0,34% enquanto na calibração escolhida (2A), a diferença relativa média foi de R^2= 0,0025 e $S\bar{y}x$= 0,71%, entretanto cubar três árvores a mais, aumenta o tempo e os custos nos inventários florestais.

Resultados semelhantes relacionados à calibração de equações foram encontrados por de Miguel, Mehtätalo e Durkaya (2014) revelando que, a utilização de uma a quatro árvores pode ser suficiente para calibrar um modelo de biomassa e reduzir drasticamente o erro na previsão para um determinado local. Fu et al. (2014) também mencionaram que, um modelo de efeitos mistos não linear de biomassa é mais aplicável e acurado que um modelo tradicional. Bronisz et al. (2021), utilizaram duas árvores para a previsão dos efeitos mistos em um modelo de biomassa. Miao et al. (2021), verificaram que a modelagem mista calibrada aumentou a acurácia na estimativa do crescimento dos galhos de *Larix olgensis* comparados com o efeito fixo da modelagem mista e com o método dos quantis, relevando também que a acurácia aumenta à medida que a quantidade de galhos para calibração também aumenta, porém, os ganhos no desempenho diminuem gradativamente. Sendo assim, a modelagem mista é uma técnica aplicada com sucesso em vários locais e espécies, assim como também observado no presente trabalho.

Com relação às perguntas formuladas no início, obteve-se as seguintes respostas:

- As estimativas das equações mistas calibradas são comparáveis com os valores obtidos pelo método tradicional? Sim, a calibração da equação de biomassa gerou estimativas muito próximas do método tradicional.
- Quais são os níveis de cluster que devem ser estabelecidos? A calibração em nível de povoamento e parcela não apresentou ganhos significativos na acurácia. Sendo assim, apenas o cluster povoamento gerou resultados satisfatórios.
- Quantas e quais árvores são necessárias na calibração? A calibração com apenas duas árvores, sendo elas as duas maiores em relação do dap por povoamento revelaram estimativas apropriadas de biomassa.

7 CONCLUSÃO

Conclui-se que, a modelagem mista aplicada para calibração de equações de biomassa é uma técnica apropriada e com potencial para aplicações práticas em inventários florestais e a recomendação é calibrar para novos povoamentos, equações de biomassa já estabelecidas, usando as duas maiores árvores em dap por povoamento e promovendo uma redução amostral nesse novo povoamento de 96%.

a) O ajuste do modelo misto apenas com o efeito fixo não revelou ganhos satisfatórios na estimativa de biomassa, principalmente nos povoamentos com maiores idades.
b) As equações mistas de biomassa calibradas com apenas duas árvores forneceram estimativas próximas das obtidas pelo método tradicional (mensuração de uma amostra maior do que a utilizada na predição dos efeitos aleatórios), diminuindo consideravelmente a amostragem de árvores, principalmente nos povoamentos com maiores idades, próximos da idade de rotação. Portanto, a recomendação para a utilização dessa modelagem é que se mensure das duas maiores árvores em dap no povoamento.
c) A calibração em nível de povoamento e parcela não gera ganhos significativos, recomendando-se a calibração somente ao nível de povoamento.

REFERÊNCIAS

ADAMEC, Z.; ADOLT, R.; DRÁPELA, K.; ZÁVODSKÝ, J. Evaluation of different calibration approaches for merchantable volume predictions of Norway spruce using nonlinear mixed effects model. **Forests**, v. 10, n. 12, p. 1104, 2019.

ARIAS-RODIL, M.; CASTEDO-DORADO, F.; CÁMARA-OBREGÓN, A.; DIÉGUEZ-ARANDA, U. Fitting and calibrating a multilevel mixed-effects stem taper model for maritime pine in NW Spain. **PloS One**, v. 10, n. 12, p. e0143521, 2015.

AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. **Forest measurements**. 5th ed. Waveland Press: Long Grove: IL, USA, 2015, p. 448.

BARICHELLO, L. R.; SCHUMACHER, M. V.; VOGEL, H. L. M. Quantificação da biomassa de um povoamento de *Acacia mearnsii* De Wild. na região sul do Brasil. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 2, p. 129-135, 2005.

BASUKI, T. M.; VAN, L. P. E.; SKIDMORE, A. K.; HUSSIN, Y. A. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. **Forest ecology and management**, v. 257, n. 8, p. 1684-1694, 2009.

BEHLING, A. **Modelagem da biomassa de árvores para assegurar aditividade dos seus componentes.** 117 f. Tese (Doutorado em Manejo Florestal) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

BEHLING, A.; PÉLLICO NETTO, S.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; AFFLECK, D. L.; RODRIGUES, A. L.; BEHLING, M. Critical analyses when modeling tree biomass to ensure additivity of its components. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, p. 1759-1774, 2018.

BEHLING, A.; PÉLLICO NETTO, S.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; SIMON, A. A.; RODRIGUES, A. L.; CARON, B. O Additive and non-additive biomass equations for Black wattle. **Floresta e Ambiente**, v. 26, 2019.

BEHLING, A.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P.; SIMON, A.; NUNES, G. Equações simultâneas para estimativa da biomassa em plantios comerciais de Acácia-negra. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, n. 15, 2012.

BELL, B. A.; ENE, M.; SMILEY, W.; SCHOENEBERGER, J. A. A multilevel model primer using SAS PROC MIXED. In: **SAS global forum**. 2013. p. 1-19.

BI, H.; TURNER, J.; LAMBERT, M. J. Additive biomass equations for native *Eucalyptus* forest trees of temperate Australia. **Trees**, v. 18, n. 4, p. 467-479, 2004.

BLAND, J. M.; ALTMAN, D. G. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. **The lancet**, v. 327, n. 8476, p. 307-310, 1986.

BOLAND, D. J. Genetic resources and utilization of Australian bipinnate acacias (Botrycephalae). **Proceedings of Australian Centre for International Agricultural Research**, v. 16, p. 29-37, 1987.

BOURIAUD, O.; STEFAN, G.; SAINT-ANDRÉ, L. Comparing local calibration using random effects estimation and bayesian calibrations: a case study with a mixed effect stem profile model. **Annals of Forest Science**, v. 76, n. 3, p. 65, 2019.

BRONISZ, K.; BIJAK, S.; WOJTAN, R.; TOMUSIAK, R.; BRONISZ, A.; BARAN, P.; ZASADA, M. Seemingly unrelated mixed-effects biomass models for Black locust in West Poland. **Forests**, v. 12, n. 3, p. 380, 2021.

BRONISZ, K.; MEHTÄTALO, L. Mixed-effects generalized height–diameter model for young silver birch stands on post-agricultural lands. **Forest Ecology and Management**, v. 460, p. 117901, 2020.

BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling Forest Trees and Stands**. Springer: Dordrecht, The Netherlands; New York, NY, USA, 2012, p. 457.

BURNS, S.; AMIN, A.; NOVAK, E. How to Build a Hierarchical Mixed Model in SAS. *In:* **MIDWEST SAS USERS GROUP**, 2015, Omaha. Proceedings. 2015.

CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; RONDON, R. M.; WATZLAWICK, L. F.; SANTOS, E. M. D Quantificação da biomassa acima do solo de *Acacia mearnsii* De Wild., procedência Batemans Bay-Austrália. **Ciência Florestal**, v. 11, p. 79-91, 2001.

CAO, Q. V.; WANG, J. Calibrating fixed-and mixed-effects taper equations. **Forest Ecology and Management**, v. 262, n. 4, p. 671-673, 2011.

CHAN, J. M.; DAY, P.; FEELY, J.; THOMPSON, R.; LITTLE, K. M.; NORRIS, C. H. *Acacia mearnsii* industry overview: current status, key research and development issues. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 77, n. 1, p. 19-30, 2015.

CHAPAIGN, T. R.; SHARMA, R. P. Modeling form factors for sal (*Shorea robusta* Gaertn.) using tree and stand measures, and random effects. **Forest Ecology and Management**, v. 482, p. 118807, 2021.

CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIRNS, M.A.; CHAMBERS, J.Q.; EAMUS, D.; FÖLSTER, H.; FROMARD, F.; HIGUCHI, N.; KIRA, T.; LESCURE, J.P. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, v. 145, n. 1, p. 87-99, 2005.

CHAVE, J.; CONDIT, R.; AGUILAR, S.; HERNANDEZ, A.; LAO, S.; PEREZ, R. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**. Series B: Biological Sciences, v. 359, n. 1443, p. 409-420, 2004.

COSTA JUNIOR, S.; DA SILVA, D. A.; SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; SIMON, A. A.; TRAUTENMÜLLER, J. W.; FERRAZ, F. A. Quantificação dos estoques de biomassa de *Acacia mearnsii* de Wild. em diferentes idades e locais de cultivo. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 120, p. 614-625, 2018.

DA SILVA, F. C. L.; DE FARIAS, J. A. Análise econômica da produção de *Acacia mearnsii* De Wild e carvão vegetal no Vale do Caí e Taquari, Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 45, p. 927-932, 2015.

DANTAS, D.; CALEGARIO, N.; JÚNIOR, F. W. A.; CARVALHO, S. D. P. C.; JÚNIOR, M. A. I.; MELO, E. de. A. Multilevel nonlinear mixed-effects model and machine learning for predicting the volume of *Eucalyptus* spp. trees. **Cerne**, v. 26, n. 1, p. 48-57, 2020.

DE-MIGUEL, S.; MEHTÄTALO, L.; DURKAYA, A. Developing generalized, calibratable, mixed-effects meta-models for large-scale biomass prediction. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 44, n. 6, p. 648-656, 2014.

DONG, L.; ZHANG, L.; LI, F. Developing two additive biomass equations for three coniferous plantation species in Northeast China. **Forests**, v. 7, n. 7, p. 136, 2016.

DUTCĂ, I.; MATHER, R.; BLUJDEA, V. N.; IORAS, F.; OLARI, M.; ABRUDAN, I. V. Site-effects on biomass allometric models for early growth plantations of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). B**iomass and bioenergy**, v. 116, p. 8-17, 2018.

FANG, Z.; BAILEY, R. L. Nonlinear mixed effects modeling for slash pine dominant height growth following intensive silvicultural treatments. **Forest Science**, v. 47, n. 3, p. 287-300, 2001.

FATEMI, F. R. YANAI, R. D.; HAMBURG, S. P.; VADEBONCOEUR, M. A.; ARTHUR, M. A.; BRIGGS, R. D.; LEVINE, C. R. Allometric equations for young northern hardwoods: the importance of age-specific equations for estimating aboveground biomass. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 41, n. 4, p. 881-891, 2011.

FOELKEL C. 2008. The Eucalyptus and the Leguminosae. Part 1. *A. mearnsii*. *Eucalyptus* Online Book and Newsletter. Available at: http://www.eucalyptus.com.br [accessed 25 June 2021].

FORTIER, J. TRUAX, B.; GAGNON, D.; LAMBERT, F. Allometric equations for estimating compartment biomass and stem volume in mature hybrid poplars: General or site-specific? **Forests**, v. 8, n. 9, p. 309, 2017.

FOWLER, J. A. P.; CURCIO. G. R.; RACHWAL, M. F. G.; DEDECEK, R. A.; SIMON, A. A. Germinação e vigor de sementes de *Acacia mearnsii* De Wild coletadas em diferentes povoamentos do Estado do Rio Grande do Sul. **Comunicado Técnico**. Colombo: EMBRAPA – CNPF, n. 39, p.1-4, jun. 2000.

FU, L.; SUN, W.; WANG, G. A climate-sensitive aboveground biomass model for three Larch species in Northeastern and Northern China. **Trees**, v. 31, n. 2, p. 557-573, 2017.

FU, L.; WANG, M.; LEI, Y.; TANG, S. Parameter estimation of two-level nonlinear mixed effects models using first order conditional linearization and the EM algorithm. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 69, p. 173-183, 2014.

GALECKI, A.; BURZYKOWSKI, T. **Linear mixed-effects model**. In: Linear Mixed-Effects Models Using R. Springer, New York, NY, 2013. p. 245-273.

GEITMANN, A.; GRIL, J. **Plant biomechanics:** From structure to function at multiple scales. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018, 450 p.

GOLDSTEIN, H. **Multilevel statistical models**. John Wiley & Sons, 2011.

GOLLOB, C.; RITTER, T.; VOSPERNIK, S.; WASSERMANN, C.; NOTHDURFT, A. A flexible height–diameter model for tree height imputation on forest inventory sample plots using repeated measures from the past. **Forests**, v. 9, n. 6, p. 368, 2018.

HARRELL, P. A.; KASISCHKE, E. S.; BOURGEAU-CHAVEZ, L. L.; HANEY, E. M.; CHRISTENSEN, N. L. Evaluation of approaches aboveground biomass in using SIR-C data to estimating southern pine forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 223-233, 1997.

HENDERSON, C. R. **Selection index and expected genetic advance**. In: HANSON, W. D.; ROBINSON, H. F. Statistical genetics and plant breeding. (Ed.). Washington, DC: National Academy of Sciences and National Research Council, 1963. p. 141–163.

HIGA, R. C. V., WREGE, M. S.; MOCHIUTTI, S.; MORA, A. L.; HIGA, A. R.; SIMON, A. A. **Acácia negra**. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Org.). Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília, DF: Instituto Nacional de Meteorologia, 2009. p. 313 – 319.

HUANG, S.; ZAICHKOWSKY, M.; WEEKS, D.; LI, C.; BROWN, C.; PARLOW, M.; BUCKMASTER, G.; TANSANUL, C.; YANG, Y. **Method Comparison and Method Calibration Applicable to Forest Measurements and Model Predictions**. Ed. Alberta Agriculture and Forestry. 2019. p. 126.

IBA. **Relatório: Indústria brasileira de árvores**. Brasília, 80p, 2017.

IKONEN, V. P.; KELLOMÄKI, S.; VÄISÄNEN, H.; PELTOLA, H. Modelling the distribution of diameter growth along the stem in Scots pine. **Trees**, v. 20, n. 3, p. 391, 2006.

KALBI, S.; FALLAH, A.; BETTINGER, P.; SHATAEE, S.; YOUSEFPOUR, R. Mixed-effects modeling for tree height prediction models of Oriental beech in the hyrcanian forests. **Journal of Forestry Research**, v. 29, n. 5, p. 1195-1204, 2018.

KANNEGIESSER, U. Apuntes sobre algunas acacias australianas: 1. *Acacia mearnsii* De Willd. **Ciencia e Investigación Forestal**, v. 4, n. 2, p. 198-212, 1990.

KING, D. A. **Size-related changes in tree proportions and their potential influence on the course of height growth**. In: MEINZER, F. C.; LACHENBRUCH, B.; DAWSON, T. E. Size-and age-related changes in tree structure and function. Springer, Dordrecht, NY, 2011. p. 165-191.

KÖHL, M.; NEUPANE, P. R.; LOTFIOMRAN, N. The impact of tree age on biomass growth and carbon accumulation capacity: A retrospective analysis using tree ring data of three tropical tree species grown in natural forests of Suriname. **PLoS One**, v. 12, n. 8, p. e0181187, 2017.

LAPPI, J. Calibration of height and volume equations with random parameters. **Forest Science**, v. 37, n. 3, p. 781-801, 1991.

LARSON, P. R. Stem form development of forest trees. **Forest Science**, v. 9, n. suppl_2, p. a0001-42, 1963.

LITTELL, R. C.; MILLIKEN, G. A.; STROUP, W. W.; WOLFINGER, R. D.; SCHABENBERGER, O. **SAS for mixed models** (2ª Ed.). Cary (NC): SAS Institute, 2006. p. 814.

MARINHO, N. P.; KLOCK, U.; LENGOWSKI, E. C.; UMÑIZ, G. I. B. D.; ZAMARIAN, E. H. C. Características da polpa kraft extraída da espécie acácia-negra na produção de papel. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.

MARTIN, A. R.; DORAISAMI, M.; THOMAS, S. C. Global patterns in wood carbon concentration across the world's trees and forests. **Nature Geoscience**, v. 11, n. 12, p. 915-920, 2018.

MARTINS, J. F. C. **Métodos de aprendizagem de máquina aplicados na modelagem de biomassa de árvores usando a linguagem de programação *Julia*.** 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, 2020.

MARZILIANO, P. A.; TOGNETTI, R.; LOMBARDI, F. Is tree age or tree size reducing height increment in *Abies alba* Mill. at its southernmost distribution limit?. **Annals of Forest Science**, v. 76, n. 1, p. 17, 2019.

MEHTÄTALO, L.; LAPPI, J. **Biometry for forestry and environmental data: With examples in R**. Ed. Chapman and Hall/CRC, 2020. p. 426.

MENSAH, S.; KAKAÏ, R. G.; SEIFERT, T. Patterns of biomass allocation between foliage and woody structure: the effects of tree size and specific functional traits. **Annals of Forest Research**, v. 59, n. 1, p. 49-60, 2016.

MIAO, Z.; WIDAGDO, F. R. A.; DONG, L.; LI, F. Prediction of branch growth using quantile regression and mixed-effects models: An example with planted *Larix olgensis* Henry trees in Northeast China. **Forest Ecology and Management**, v. 496, p. 119407, 2021.

Microsoft Excel. Versão 15.0. Redmond, Washington: Microsoft 365, 2013. Disponível em: < https://www.microsoft.com/pt-br/microsoft-365/excel> Acesso em: 27 agosto 2020.

MOCHIUTTI, S. **Produtividade e sustentabilidade de plantações de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) no Rio Grande do Sul.** 270 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

MOERBEEK, M. The consequence of ignoring a level of nesting in multilevel analysis. **Multivariate behavioral research**, v. 39, n. 1, p. 129-149, 2004.

MORA, A. L. **Aumento da produção de sementes geneticamente melhoradas de *Acacia mearnsii* De Wild. (Acácia-negra) no Rio Grande do Sul**. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

MÜLLER, I. **Avaliação da produtividade da *Acacia mearnsii* De Wild. (Acácia negra) em função de diferentes espaçamentos.** 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, 2006.

MURRAY, D. M. **Design and analysis of group-randomized trials**. Oxford University Press, USA, 1998.

OGANA, F. N.; CORRAL-RIVAS, S.; GORGOSO-VARELA, J. J. A new generalized height-diameter model with mixed-effect for *Pinus pinaster* Ait. and *Pinus radiata* d. Don. **Cerne**, v. 26, n. 1, p. 150-161, 2020.

OGAWA, S.; YAZAKI, Y. Tannins from *Acacia mearnsii* de wild. bark: Tannin determination and biological activities. **Molecules**, v. 23, n. 4, p. 837, 2018.

OU, G.; WANG, J.; XU, H.; CHEN, K.; ZHENG, H.; ZHANG, B.; SUN, X.; XU, T; XIAO, Y. Incorporating topographic factors in nonlinear mixed-effects models for aboveground biomass of natural Simao pine in Yunnan, China. **Journal of Forestry Research**, v. 27, n. 1, p. 119-131, 2016.

ÖZÇELIK, R.; CAO, Q. V.; TRINCADO, G.; GÖÇER, N. Predicting tree height from tree diameter and dominant height using mixed-effects and quantile regression models for two species in Turkey. **Forest ecology and management**, v. 419, p. 240-248, 2018.

PARRESOL, B. R. Additivity of nonlinear biomass equations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 31, n. 5, p. 865-878, 2001.

PÉLLICO NETTO, S.; BEHLING, A. Rational volumetric models: tested in forest stands of *Acacia mearnsii* De Wild. in Southern Brazil. **Cerne**, v. 25, n. 4, p. 491-505, 2019a.

PÉLLICO NETTO, S.; BEHLING, Al. Additivity of tree biomass components using ratio estimate. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 91, 2019b.

PICARD, N.; SAINT-ANDRÉ, L.; HENRY, M**.** Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. **Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction, FAO; Food and Agricultural Organization of the United Nations (2012),** 2012.

PINHEIRO, J. C.; BATES, D. M. **Mixed-effects models in S and S-PLUS**. Ed. Nova York: Springer-Verlag, 2000. p. 548.

POWELL, S. L.; COHEN, W. B.; KENNEDY, R. E.; HEALEY, S. P.; HUANG, C. Observation of trends in biomass loss as a result of disturbance in the conterminous US: 1986–2004. **Ecosystems**, v. 17, n. 1, p. 142-157, 2014.

RESENDE, M. D. V. de. Software Selegen-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 16, n. 4, p. 330-339, 2016.

RISI. 2014. **International pulpwood trade review 2014**. Bedford, MA: RISI.

SANQUETTA, C. R. BEHLING, A.; CORTE, A. D.; SIMON, A.; PSCHEIDT, H.; RUZA, M. S.; MOCHIUTTI, S. Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 361-370, 2014.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; DALLA CORTE, A. P.; NETTO, S. P., SCHIKOWSKI, A. B.; Do AMARAL, M. K. Simultaneous estimation as alternative to independent modeling of tree biomass. **Annals of Forest Science**, v. 72, n. 8, p. 1099-1112, 2015.

SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; BEHLING, A.; OLIVEIRA P. de, L. R.; PÉLLICO NETTO, S.; RODRIGUES, A. L.; SANQUETTA, M. N. I. Selection criteria for linear regression models to estimate individual tree biomasses in the Atlantic Rain Forest, Brazil. **Carbon Balance and Management**, v. 13, n. 1, p. 25, 2018.

SANQUETTA, C. R.; MINATTI, M.; COSTA JUNIOR, S.; TRAUTENMÜLLER, J. W.; DALLA CORTE, A. P. Independent and simultaneous modeling of biomass and carbon of *Guinean Elaeis*. **Floresta**, v. 49, n. 3, p. 421-430, 2019.

SAS Studio. SAS ONDEMAND FOR ACADEMICS. Versão 3.8 (Enterprise Edition). Cary, NC, USA: SAS Institute Inc., 2019. Disponível em: < https://www.sas.com/en_us/software/studio.html > Acesso em: 27 agosto 2020.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; GIACOMELLI, V.; SCHNEIDER, P. S. P. Determinação indireta do estoque de biomassa e carbono em povoamentos de Acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). **Ciência Florestal**, v. 15, p. 391-402, 2005.

SCHNEIDER, P. R.; TONINI, H. Utilização de variáveis dummy em equações de volume para *Acacia mearnsii* De Wild. **Ciência Florestal**, v. 13, p. 121-129, 2003.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **J Agric Res**, v. 47, p. 719-734, 1933.

SEARLE, S. R.; CASELLA, G.; MCCULLOCH, C. E. **Variance components**. New Jersey (CA): John Wiley & Sons, 2009. p. 538.

SEIGER, D.S. Economic potential from Western Australian Acacia species: secondary plant products. **Conservation Science**, v. 4, n. 3, p. 109-116, 2002.

SHARMA, R. P.; BREIDENBACH, J. Modeling height-diameter relationships for Norway spruce, Scots pine, and Downy birch using Norwegian national forest inventory data. **Forest Science and Technology**, v. 11, n. 1, p. 44-53, 2015.

SHARMA, R. P.; VACEK, Z.; VACEK, S.; KUCERA, M. A Nonlinear mixed-effects height-to-diameter ratio model for several tree species based on Czech national forest inventory data. **Forests**, v. 10, n. 1, p. 70, 2019.

SHARMA, R. P.; VACEK, Z.; VACEK, S.; PODRÁZSKÝ, V.; JANSA, V. Modelling individual tree height to crown base of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.). **PloS One**, v. 12, n. 10, p. e0186394, 2017.

SILESHI, G. W. A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. **Forest Ecology and Management**, v. 329, p. 237-254, 2014.

SOCHA, J.; KULEJ, M. Variation of the tree form factor and taper in European larch of Polish provenances tested under conditions of the Beskid Sądecki mountain range (Southern Poland). **Journal of Forest Science**, v. 53, n. 12, p. 538-547, 2007.

TAEROE, A.; NORD-LARSEN, T.; STUPAK, I., RAULUND-RASMUSSEN, K. Allometric biomass, biomass expansion factor and wood density models for the OP42 hybrid poplar in Southern Scandinavia. **BioEnergy Research**, v. 8, n. 3, p. 1332-1343, 2015.

TANAC. **Ciclo da industrialização da Acácia negra**. 6 p. Publicidade. [198-]

TAYLOR, D.; PAWAR, V.; KRUZIKAS, D. T.; GILMORE, K. E.; SANON, M.; WEINSTEIN, M. C. Incorporating calibrated model parameters into sensitivity analyses. **Pharmacoeconomics**, v. 30, n. 2, p. 119-126, 2012.

TIAN, X.; SOHNGEN, B.; KIM, J. B.; OHREL, S.; COLE, J. Global climate change impacts on forests and markets. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 3, p. 035011, 2016.

TRAUTENMÜLLER, J. W. PÉLLICO NETTO, S., BALBINOT, R.; WATZLAWICK, L. F., DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A. Regression estimators for aboveground biomass and its constituent parts of trees in native southern Brazilian forests. **Ecological Indicators**, v. 130, p. 108025, 2021.

TRINCADO, G.; VANDERSCHAAF, C. L.; BURKHART, H. E. Regional mixed-effects height–diameter models for Loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations. **European Journal of Forest Research**, v. 126, n. 2, p. 253-262, 2007.

VALBUENA, R.; HEISKANEN, J.; AYNEKULU, E.; PITKÄNEN, S.; PACKALEN, P. Sensitivity of above-ground biomass estimates to height-diameter modelling in mixed-species West African woodlands. **PloS One**, v. 11, n. 7, p. e0158198, 2016.

VANDERSCHAAF, C. L. Predictive ability of mixed-effects height–diameter models fit using one species but calibrated for another species. **Forest Science**, v. 66, n. 1, p. 14-24, 2020.

VISMARA, E. de. S.; MEHTÄTALO, L.; BATISTA, J. L. F. Linear mixed-effects models and calibration applied to volume models in two rotations of *Eucalyptus grandis* plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 46, n. 1, p. 132-141, 2016.

WANG, F.; XU, X.; ZOU, B.; GUO, Z.; LI, Z.; ZHU, W. Biomass accumulation and carbon sequestration in four different aged *Casuarina equisetifolia* coastal shelterbelt plantations in south China. **PloS one**, v. 8, n. 10, p. e77449, 2013.

XIANG, W.; LI, L.; OUYANG, S.; XIAO, W.; ZENG, L.; CHEN, L.; LEI, P.; DENG, X.; ZENG, Y.; FANG, J.; FORRESTER, D. I. Effects of stand age on tree biomass partitioning and allometric equations in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations. **European Journal of Forest Research**, v. 140, n. 2, p. 317-332, 2021.

XIANG, W.; ZHOU, J.; OUYANG, S.; ZHANG, S.; LEI, P.; LI, J.; DENG, X.; FANG, X.; FORRESTER, D. I. Species-specific and general allometric equations for estimating tree biomass components of subtropical forests in Southern China. **European Journal of Forest Research**, v. 135, n. 5, p. 963-979, 2016.

YANG, B.; XUE, W.; YU, S.; ZHOU, J.; ZHANG, W. Effects of stand age on biomass allocation and allometry of *Quercus acutissima* in the central loess plateau of China. **Forests**, v. 10, n. 1, p. 41, 2019.

YANG, X. Z.; ZHANG, W. H.; HE, Q. Y. Effects of intraspecific competition on growth, architecture and biomass allocation of *Quercus liaotungensis*. **Journal of Plant Interactions**, v. 14, n. 1, pág. 284-294, 2019.

YANG, Z.; LIU, Q.; LUO, P.; YE, Q.; SHARMA, R. P.; DUAN, G.; ZHANG, H.; FU, L. Nonlinear mixed-effects height to crown base model based on both airborne LiDAR and field datasets for *Picea crassifolia* Kom trees in Northwest China. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118323, 2020.

ZANG, H.; LEI, X.; ZENG, W. Height–diameter equations for larch plantations in Northern and Northeastern China: a comparison of the mixed-effects, quantile regression and generalized additive models. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, v. 89, n. 4, p. 434-445, 2016.

ZENG, W. S. Using nonlinear mixed model and dummy variable model approaches to develop origin-based individual tree biomass equations. **Trees**, v. 29, n. 1, p. 275-283, 2015.

ZHENG, C.; MASON, E. G.; JIA, L.; WEI, S.; SUN, C.; DUAN, J. A single-tree additive biomass model of Quercus variabilis Blume forests in North China. **Trees**, v. 29, n. 3, p. 705-716, 2015.

ANEXO 1 – CARACTERÍSTICAS METEROLÓGICAS E QUÍMICAS DE SOLO NOS POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA

TABELA 18 – VALORES METEOROLÓGICOS OBSERVADOS NA ESTAÇÃO CLIMATOLÓGICA DE PELOTAS, RIO GRANDE DO SUL E ASSOCIADOS AOS POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA AMOSTRADOS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Idade	Precac	Tmax	Tmin	Tmed	UR	Ins
			Cristal			
1,75	2683,20	23,80	14,28	18,37	82,11	6,88
2,75	3647,90	23,87	14,00	18,23	81,69	7,01
5,00	6833,70	23,32	13,76	17,88	82,10	6,72
10,08	12890,70	23,39	13,82	17,93	81,80	6,72
			Encruzilhada do Sul			
1,83	1990,70	23,00	13,08	17,17	75,60	6,06
3,08	3571,90	22,78	12,73	16,84	74,81	6,30
5,75	8000,80	23,41	13,41	17,45	75,66	5,72
10,75	15426,50	23,38	13,45	17,48	75,44	5,78
			Piratini			
1,00	1711,50	23,43	14,33	18,19	83,37	6,59
2,33	5119,00	23,33	13,59	17,77	81,79	6,87
5,25	7005,30	23,21	13,62	17,74	82,18	6,70
9,83	12616,40	23,49	13,91	18,03	81,76	6,74

FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: Idade = expressa em anos; Precac = precipitação acumulada, em mm; Tmax = temperatura média máxima do ar, em °C; Tmin = temperatura média mínima do ar, em °C; Tmed = temperatura média do ar, em °C; UR = umidade relativa do ar, em %; e Ins = número de horas de insolação, em horas.

TABELA 19 – CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO HORIZONTE SUPERFICIAL DO SOLO PARA A PRIMEIRA ETAPA DE MEDIÇÃO EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA SITUADOS NOS MUNICÍPIOS DE CRISTAL, ENCRUZILHADA DO SUL E PIRATINI NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Idade Anos	pH	IND. SMP	M. O.	Argila	P	K	Ca	Mg	Al	H+ Al	CTC pH7	% Sat. Da CTC		Classificação do solo
			------- % -------		-- mg/dm³--		---------- $cmol_c/dm^3$ ----------					Al	Bases	
Cristal														
1	4,2	5,6	1,5	24,0	5,3	76,0	1,3	0,4	1,7	7,5	9,3	48,0	19,6	AVM
3	4,3	5,6	2,0	22,5	5,9	105,0	1,4	0,6	1,6	7,5	9,8	41,3	24,2	ABA
5	4,1	5,4	1,9	23,0	2,1	45,0	0,8	0,2	1,9	8,9	10,0	61,0	11,5	ABA
7	4,2	5,6	2,6	17,8	5,2	85,0	1,4	0,3	1,6	7,2	9,1	51,8	19,0	AVAD
Encruzilhada do Sul														
1	4,0	4,8	3,1	21,0	5,7	80,0	1,4	0,3	2,1	18,6	20,5	55,0	9,2	NRD
3	4,1	4,9	3,0	27,8	3,9	124,0	1,1	0,4	2,3	15,5	17,3	55,8	10,3	PHE
5	4,1	5,0	2,0	33,8	3,0	21,0	1,3	0,5	2,3	13,9	15,6	58,8	12,6	AVAE
7	3,9	5,0	2,5	32,8	4,3	54,0	0,6	0,2	3,0	15,1	16,1	76,4	7,2	NRD
Piratini														
3	5,1	5,8	3,0	26,8	20,2	214,0	5,8	1,0	1,1	7,6	14,9	20,2	47,5	AVAD
5	4,6	5,2	2,8	25,8	4,3	82,0	5,1	1,5	1,7	12,1	18,8	21,4	37,7	AVAD
7	4,5	5,3	2,4	27,0	6,3	109,0	4,1	1,1	1,6	10,2	15,5	24,9	34,1	NL

FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: pH = concentração de íons de H+; IND. SMP = índice SMP; M.O. = matéria orgânica; P = fósforo; K = potássio; Al = Alumínio; Ca = Cálcio; Mg = Magnésio; H+Al = hidrogênio + alumínio; CTC pH 7 = capacidade de troca de cátions; e % Sat. da CTC = porcentagem da saturação da CTC; AVM = Argissolo Vermelho-Amarelo; ABA = Argissolo Bruno-Acizentado; AVAD = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico; NRD = Neossolo Regolítico Distrófico; PHE = Planossolo Háplico Eutrófico; AVAE = Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico.