

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

LARYSSA DEMÉTRIO

MODELAGEM DE VARIÁVEIS DENDRO/MORFOMÉTRICAS DE
ARAUCÁRIA COM USO DE GEOTECNOLOGIAS

LAGES

2024

LARYSSA DEMÉTRIO

**MODELAGEM DE VARIÁVEIS DENDRO/MORFOMÉTRICAS DE
ARAUCÁRIA COM USO DE GEOTECNOLOGIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal, área de concentração em Produção Florestal.

Orientador: Prof. Dr. André Felipe Hess.

Coorientador: Prof. Dr. Veraldo Liesenberg.

LAGES

2024

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Universitária Udesc,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Demétrio, Laryssa
Modelagem de variáveis dendro/morfométricas de Araucária
com uso de geotecnologias / Laryssa Demétrio. -- 2024.
128 p.

Orientador: André Felipe Hess
Coorientador: Veraldo Liesenberg
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2024.

1. Nuvem de pontos. 2. Morfometria. 3. Diâmetro de copa. 4.
Drone. I. Felipe Hess, André. II. Liesenberg, Veraldo. III.
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Florestal. IV. Título.

LARYSSA DEMÉTRIO

**MODELAGEM DE VARIÁVEIS DENDRO/MORFOMÉTRICAS DE ARAUCÁRIA
COM USO DE GEOTECNOLOGIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal, área de concentração em Produção Florestal.

BANCA EXAMINADORA

André Felipe Hess, Dr.

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membros:



André Felipe Hess, Dr.

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC



Julio Eduardo Arce, Dr.

Universidade Federal do Paraná – UFPR



Leonardo José Biffi, Dr.

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Lages, 28 de fevereiro de 2024.

À Deus, aos meus pais, irmão e
namorado, Dedico-lhes!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pelo dom da vida, por ser minha fortaleza e luz na minha vida.

Aos meus pais, Neuza Basquerote Souza Demétrio e Antônio Carlos Demétrio que sempre me incentivaram mostrando a importância dos estudos para a minha vida profissional e pessoal, pelo amor, carinho e apoio. Ao meu irmão Jefferson Souza Demétrio pelo incentivo e toda minha família, gratidão.

Ao meu namorado Rodrigo Godoy da Silva, pelo amor, companheirismo, incentivo, paciência e compreensão nos momentos de estudo.

Ao meu Orientador Dr. André Felipe Hess, pela orientação desde a graduação até o mestrado. Agradeço pela troca de conhecimentos, ensinamentos, sugestões de melhoria no estudo e pela confiança na minha capacidade.

Ao Professor e coorientador Dr. Veraldo Liesenberg pelo empréstimo dos equipamentos GNSS RTK do laboratório de Geo, pelo computador disponibilizado para realizar o processamento das imagens, e pela coorientação neste estudo.

Ao colega de mestrado e amigo Leandro Silva Lemos, pelo auxílio com a instalação da base GNSS RTK e levantamento dos pontos de controle nas áreas de Urubici e Bom Retiro, sua contribuição foi de grande valia neste estudo.

Ao Professor e membro da banca, Dr. Leonardo Josoé Biffi, pelos ensinamentos para realizar os processamentos das imagens no programa *Agisoft Metashape Professional*, pela paciência e dedicação prestada sempre que foi solicitado, colaborando prontamente sem hesitar, pela indicação do programa *Cloud Compare*, auxílio na utilização da ferramenta, e contribuições no desenvolvimento da pesquisa o meu muito obrigada.

Ao Professor do programa de Pós - Graduação em Engenharia Florestal, Dr. Marcos Benedito Schimalski pela ajuda e auxílio na realização dos processamentos dos pontos de controle no *software Leica Geo Office 8.4*, para as áreas deste estudo e empréstimo dos equipamentos GNSS RTK para realização do trabalho à campo.

Ao Professor e membro da banca, Dr. Julio Eduardo Arce, expresse meu agradecimento por aceitar o convite para avaliar este estudo, bem como pelas considerações e sugestões à dissertação. Muito obrigada.

Aos alunos da graduação e bolsistas do Laboratório de Manejo e Crescimento Florestal (LAMEC) José Guilherme e Elton Moura pelo auxílio nos trabalhos de campo,

na realização das mensurações dos dados em Urubici e Bom Retiro. E a bolsista do Laboratório de Geo, Vitória pela ajuda no trabalho de campo em Urubici, meu agradecimento a todos vocês.

As amigas e colegas de mestrado do curso de Pós-graduação da Ciência Animal, Karoline Cardoso de Vargas, Roberta Farias Veiga e Anna Caroline de Almeida, pela amizade, parceria nos estudos de estatística e companheirismo durante o mestrado.

Aos proprietários das fazendas onde foram realizados os estudos, Sr. Geraldo, Diego e Vinícius, o meu muito obrigada por permitirem realizar o levantamento de Drone, as mensurações e verrumas das árvores dentro das suas propriedades, sem hesitar.

À PROMOP e à CAPES pelo apoio financeiro, por meio da bolsa concedida de estudos durante o período do mestrado.

À universidade do Estado de Santa Catarina, especialmente o Centro de Ciências Agroveterinárias CAV/UDESC pelo ensino público, gratuito e de qualidade. E ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal e corpo docente de professores.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste estudo.

Muito obrigada!

“O conhecimento é o único bem que cresce quando compartilhado”. (Sócrates)

RESUMO

DEMÉTRIO, Laryssa. **Modelagem de variáveis dendro/morfométricas de Araucária com uso de geotecnologias**. 2024. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal – Área: Produção Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2024.

Estimativas precisas das variáveis dendro/morfométricas são essenciais para a conservação e uso sustentável dos recursos florestais. O objetivo do estudo foi mensurar, avaliar e modelar características dendro/morfométricas obtidas em 100 árvores de araucária comparando medidas obtidas pelo método convencional e medidas obtidas de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) em três alturas de voo, 60, 80 e 120 m, em três sítios nos municípios de Urubici e Bom Retiro, SC, sul do Brasil. As áreas do estudo possuem 5,22 ha, 4,78 ha e 5,80 ha. Nas imagens o processamento digital foi feito no *Agisoft Metashape Professional* v.1.6.4 e a medição da variável diâmetro de copa (dc) no *Cloud Compare* v.2.13. Em campo, foram medidos, nas 100 árvores, o diâmetro à altura do peito (d), 4 raios de copa (rc), a altura de inserção da copa (hic) e a altura total (h). As variáveis analisadas nos modelos foram as que obtiveram maiores correlações de Pearson. No ajuste dos modelos os resíduos foram submetidos aos testes de normalidade, homogeneidade da variância e independência do erro. Os testes indicaram que os resíduos não atendem aos condicionantes de regressão e o ajuste dos modelos foi utilizando a técnica dos modelos lineares generalizados. As variáveis morfométricas com maior correlação com o d foram o dc ($r=0,88$); asc ($r=0,75$); h ($r=0,69$); N/ha ($r=-0,67$) e o vc ($r=0,63$). O ajuste indicou que as equações para estimar o dc para cada sítio de estudo com precisão foram: dc = $2,4126 + 0,2015 \cdot d$ (sítio I); dc = $1,6129 + 0,2248 \cdot d$ (sítio II); dc = $1,5278 + 0,0176 \cdot d$ (sítio III), na distribuição Gama e funções, identidade e logarítmica. Os modelos visam incorporar as condições de forma e dimensão das árvores e facilitar medidas e custos de inventário florestal, bem como fornecer subsídios a análise estrutural da floresta em forma, dimensão e densidade. Os dados de dc mostram que há diferença significativa entre as medidas aferidas em campo e pela fotogrametria. O sítio III na altura de 60 m, não apresentou diferença significativa a 5% de significância. Os modelos ajustados mostram que é possível medir o dc nas imagens e assim com precisão estimar o d da árvore dispensando medidas a campo. A validação dos modelos foi realizada em 43 árvores distintas, os modelos ajustados indicaram valor de erro para a variável d, no campo de 0,06 cm, na fotogrametria apresentaram valores de erro de 0,08 cm, 0,03 cm e 0,002 cm nas três alturas respectivamente, corroborando com a precisão dos ajustes. O método convencional apresentou maior tempo de medição da variável dc em comparação a fotogrametria. A eficiência relativa mostrou que a fotogrametria foi mais eficiente. Os resultados mostram a possibilidade do uso de ferramentas da geotecnologia na precisão das estimativas e modelagem de variáveis de referência na tomada de decisão do manejo florestal, visto que o dc é uma variável que indica o número de árvores adequado para ocupação do espaço durante um ciclo de rotação, mantendo a taxa de incremento e disponibilidade de recursos ao crescimento.

Palavras-chave: Nuvem de pontos; Morfometria; Diâmetro de copa; Drone.

ABSTRACT

DEMÉTRIO, Laryssa. **Modeling of dendro/morphometric variables of Araucaria using geotechnologies.** 2024. 128 f. Dissertation (Master in Forest Engineering - Area: Forest Production) - State University of Santa Catarina. Graduate Program in Forest Engineering, Lages, 2024.

Accurate estimates of dendro/morphometric variables are essential for the conservation and sustainable use of forest resources. The aim of the study was to measure, evaluate and model dendro/morphometric characteristics obtained from 100 araucaria trees by comparing measurements obtained by the conventional method and measurements obtained from an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) at three flight heights, 60, 80 and 120 m, at three sites in the municipalities of Urubici and Bom Retiro, SC, southern Brazil. The study areas cover 5.22 ha, 4.78 ha and 5.80 ha. The images were digitally processed using Agisoft Metashape Professional v.1.6.4 and the variable crown diameter (dc) was measured using Cloud Compare v.2.13. In the field, the diameter at breast height (d), 4 crown radii (rc), crown insertion height (hic) and total height (h) were measured on the 100 trees. The variables analyzed in the models were those with the highest Pearson correlations. When the models were adjusted, the residuals were subjected to normality, homogeneity of variance and independence of error tests. The tests indicated that the residuals did not meet the regression conditions and the models were adjusted using the generalized linear model's technique. The morphometric variables with the highest correlation with d were dc ($r=0.88$); asc ($r=0.75$); h ($r=0.69$); N/ha ($r=-0.67$) and vc ($r=0.63$). The fit indicated that the equations for accurately estimating dc for each study site were: $dc = 2.4126 + 0.2015 \cdot d$ (site I); $dc = 1.6129 + 0.2248 \cdot d$ (site II); $dc = 1.5278 + 0.0176 \cdot d$ (site III), using the Gamma distribution and identity and logarithmic functions. The models aim to incorporate tree shape and size conditions and facilitate forest inventory measurements and costs, as well as providing support for structural analysis of the forest in terms of shape, size and density. The dc data shows that there is a significant difference between the measurements taken in the field and by photogrammetry. Site III at a height of 60 m showed no significant difference at a 5% significance level. The adjusted models show that it is possible to measure the dc in the images and thus accurately estimate the d of the tree without the need for field measurements. The models were validated on 43 different trees. The adjusted models showed an error value for the d variable of 0.06 cm in the field, while photogrammetry showed error values of 0.08 cm, 0.03 cm and 0.002 cm at the three heights respectively, corroborating the accuracy of the adjustments. The conventional method took longer to measure the dc variable than photogrammetry. The relative efficiency showed that photogrammetry was more efficient. The results show the possibility of using geotechnology tools to accurately estimate and model reference variables in forest management decision-making, since dc is a variable that indicates the number of trees suitable for occupying space during a rotation cycle, maintaining the rate of increase and availability of resources for growth.

Keywords: Point cloud; Morphometry; Crown diameter; Drone.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Localização dos três sítios de estudo com *Araucaria angustifolia*, nos municípios de Urubici e Bom Retiro, Santa Catarina. (A) Mapa do Brasil com ênfase ao estado de Santa Catarina; (B) Mapa do estado de Santa Catarina com os municípios que abrangem as áreas de estudo; (C) Mapa dos municípios com as respectivas áreas de estudo.....37
- Figura 2 - Localização dos três sítios de estudo com *Araucaria angustifolia*, nos municípios de Urubici e Bom Retiro, Santa Catarina, com destaque para as árvores individuais amostradas e árvores para validação do modelo do diâmetro de copa ajustado.38
- Figura 3 - Caracterização dos remanescentes de Floresta Ombrófila Mista (FOM), das áreas estudadas, imagens obtidas por drone, que mostram a estrutura atual das condições da floresta com araucária. Sendo (A) Urubici (URB), Sítio I, (B) Urubici (URB), Sítio II e (C) Bom Retiro (BRT), Sítio III.39
- Figura 4 - Representação da árvore araucária e suas características dimensionais como altura total e de inserção da copa, comprimento de copa, diâmetro de copa e outros parâmetros como a área de projeção horizontal da copa (APHC) ou também chamada de área de superfície da copa (asc) na Figura 4(a). Representação do diagrama da medição da copa. R é o raio de copa; C é o centroide da árvore que corresponde ao DAP; θ é o ângulo fixo entre os raios, que neste caso é 90° como mostra a Figura 4(b).....44
- Figura 5 - Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), marca DJI modelo *Phantom 4 Pro* V2.0.45
- Figura 6 - Aquisição das imagens obtidas pelo VANT. (A) Voo controlado por operador no Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT); (B) Voo controlado com auxílio de um Tablet iPad mini (5ª geração) com capacidade de 64 GB da marca Apple; (C) VANT sobrevoando a área.50

Figura 7 - Localização dos pontos de controle (GCPs) e das bases nos ortomosaicos gerados nos três sítios florestais estudados (A) URB, (B) URB e (C) BRT.	53
Figura 8 - Levantamento dos pontos de controle em campo. (A) Base receptora de sinais GNSS Leica GS15 RTK; (B) Receptor móvel de sinais (Rover); (C) Ponto alvo artificial.	54
Figura 9 - Imagem 3D gerada pela nuvem de pontos no Software Cloud Compare v2.13 alpha, sendo sítio I – URB (A), sítio II – URB (B) e sítio III BRT (C).	58
Figura 10 - Procedimento para realização das mensurações do diâmetro de copa. Recorte da araucária correspondente à árvore medida em campo (A); Isolamento da araucária de interesse para mensuração da variável diâmetro de copa (B).....	59
Figura 11 - Representação da árvore de araucária individualizada em nuvem de pontos. Perfil do diâmetro de copa das araucárias com as mensurações em quatro sentidos: Leste-Oeste (A) Noroeste-Sudeste (B) e Norte-Sul (C) e Nordeste-Sudoeste (D).....	60
Figura 12 - Imagem das amostras parciais do tronco de <i>A. angustifolia</i> (A) e a mesa de mensuração utilizada na marcação e medição dos anéis de crescimento com a visualização dos anéis com demarcação à lápis (B) para árvores de <i>Araucaria angustifolia</i>	62
Figura 13 - Distribuição diamétrica das árvores de <i>Araucaria angustifolia</i> , caracterizando o padrão estrutural em densidade nos sítios no sul do Brasil. (A) Município de Urubici, SC; (B) Município de Urubici, SC e (C) Município de Bom Retiro, SC.	70
Figura 14 - Incremento periódico anual em diâmetro de 15 anos para o sítio I (URB), 25 anos para o sítio II (URB) e 30 anos para o sítio III (BRT) em comparação ao incremento dos últimos 10 anos para as árvores de <i>Araucaria angustifolia</i> no sul do Brasil.....	78
Figura 15 - Dispersão dos valores ajustados pelos modelos das relações diâmetro de copa, área de superfície de copa e volume de copa com o diâmetro a altura do peito de <i>Araucaria angustifolia</i> para os três sítios no sul do Brasil.	85

Figura 16 - Relação da densidade de árvores e área basal por hectare em função do diâmetro a altura do peito como indicativo para o manejo florestal para os três sítios de estudo no sul do Brasil. (A) URB; (B) URB; (C) BRT.....88

Figura 17 - Representação da estatística descritiva da variável diâmetro de copa, mensuradas pelo método convencional e pela fotogrametria para as três alturas distintas de 60, 80 e 120 m, para cada sítio florestal de estudo nos municípios de Urubici e Bom Retiro/SC. (A) Sítio I (URB); (B) Sítio II (URB) e (C) Sítio III (BRT).103

Figura 18 - Dispersão dos valores de diâmetro a altura do peito (d) em função do diâmetro de copa (dc) observado (A) e estimado para a altura de 60 m (B) o que mostra a precisão na estimativa da variável e (C) dispersão do erro entre a medida a campo e na imagem da variável d.105

Figura 19 - Dispersão dos valores de diâmetro a altura do peito (d) em função do diâmetro de copa (dc) observado (A) e estimado para a altura de 80 m (B) o que mostra a precisão na estimativa da variável e (C) dispersão do erro entre a medida a campo e na imagem da variável d.105

Figura 20 - Dispersão dos valores de diâmetro a altura do peito (d) em função do diâmetro de copa (dc) observado (A) e estimado para a altura de 120 m (B) o que mostra a precisão na estimativa da variável e (C) dispersão do erro entre a medida a campo e na imagem da variável d.106

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fluxo de trabalho da metodologia do mapeamento das Araucárias.....	47
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição das especificações técnicas do equipamento e características de voo do <i>Phantom 4 Pro</i> V2.0.....	45
Tabela 2 - Informação de data, e horários de início e fim das aquisições das imagens para os três sítios florestais e diferentes alturas de 60, 80 e 120 m.	51
Tabela 3 - Estatísticas descritivas das variáveis dendrométricas, morfométricas, copa, incremento periódico anual em diâmetro e densidade para <i>Araucaria angustifolia</i> para os três sítios florestais no sul do Brasil.	73
Tabela 4 - Matriz de correlação de Pearson e probabilidades para as variáveis dendrométricas, morfométricas, incremento periódico anual em diâmetro e densidade de <i>Araucaria angustifolia</i> , para os três sítios de estudo, no sul do Brasil.	80
Tabela 5 - Coeficientes e critérios de precisão das equações para as variáveis dendro/morfométricas e densidade de araucária em três sítios no sul do Brasil.	84
Tabela 6 - Localização geográfica dos pontos de controle (GCP) distribuídos em cada área e precisão após processamento para os três sítios florestais no sul do Brasil.....	89
Tabela 7 - Informações de erros médios planimétricos e altimétricos dos pontos de controle gerados pelo VANT, em diferentes alturas de 60, 80 e 120 metros para os três sítios florestais no sul do Brasil.....	90
Tabela 8 - Informações de processamento digital de imagens em diferentes alturas de sobrevoo de 60, 80 e 120 metros em três sítios florestais no sul do Brasil.	93
Tabela 9 - Densidade de Nuvem de pontos geradas pelo software <i>Cloud Compare</i> v2.13. alpha.	94

Tabela 10 - Comparação dos dados da variável diâmetro de copa aferidos pelo método convencional e por Fotogrametria nas alturas distintas de 60, 80 e 120 m, no sítio I, no município de Urubici/SC.....	96
Tabela 11 - Comparação dos dados da variável diâmetro de copa aferidos pelo método convencional e por Fotogrametria nas alturas distintas de 60, 80 e 120 m, no sítio II, no município de Urubici/SC.....	97
Tabela 12 - Comparação dos dados da variável diâmetro de copa aferidos pelo método convencional e por Fotogrametria nas alturas distintas de 60, 80 e 120 m, no sítio III, no município de Bom Retiro/SC.	99
Tabela 13 - Comparação dos erros obtidos para as alturas de 60, 80 e 120 m para os três sítios de estudo nos municípios de Urubici e Bom Retiro/SC.....	101
Tabela 14 - Coeficientes e critérios de precisão das equações de campo e imagem para o ajuste das 100 árvores, para os três sítios de estudo no sul do Brasil.....	104
Tabela 15 - Erros dos resíduos padronizados e generalizados dos MLGs, dos modelos ajustados para o campo e imagem, nos dados de ajustes e validação para os três sítios de estudo.....	107
Tabela 16 - Análise estatística dos tempos de medição em minutos/segundos, desvio padrão, coeficiente de variação, e a eficiência relativa dos dois métodos de medição, convencional e fotogrametria, para o diâmetro de copa, nos três sítios no sul do Brasil.	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
3D	Tridimensional
AIC	Critério de Informação de Akaike
BIC	Critério de Informação de Bayesiano
BRT	Bom Retiro, Santa Catarina
cap	Circunferência à altura do peito a 1,30 m do solo
cc	Comprimento de copa
cm	Centímetros
CMOS	<i>Complementary metal-oxide-semiconductor</i>
d	Diâmetro à altura do peito a 1,30 m do solo
dc	Diâmetro de copa
fc	Formal de copa
FOM	Floresta Ombrófila Mista
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
G/ha	Área basal por hectare
hd	Grau de Esbeltez
h	Altura
IA	Índice de Abrangência
IPAd	Incremento periódico anual em diâmetro
IS	Índice de Saliência
m	Metros
MLG	Modelos Lineares Generalizados
N/ha	Número de árvores por hectare
pc	Proporção percentual de copa
PIXEL	<i>Picture element</i>
rc	Raio de copa
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SC	Estado de Santa Catarina
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SÍTIO I	Urubici – Fazenda Maça

SÍTIO II	Urubici – Pousada Rural
SÍTIO III	Bom Retiro – Fazenda das Araucárias
Smartphone	Telefone celular com sistema operacional Android/iOS
TIFF	<i>Tag Image File Format</i>
TSAP	<i>Time Series Analysis Program</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator
URB	Urubici, Santa Catarina
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	20
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	23
1.2	OBJETIVOS.....	24
1.2.1	Objetivo Geral	24
1.2.2	Objetivos Específicos.....	24
1.3	HIPÓTESES	25
1.4	JUSTIFICATIVA	25
	REFERÊNCIAS	27
2	CAPÍTULO I – AVALIAÇÃO DO DIÂMETRO DE COPA DE <i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze PELO MÉTODO CONVENCIONAL E COM USO DE IMAGENS DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT) EM DIFERENTES SÍTIOS FLORESTAIS NO SUL DO BRASIL	32
2.1	RESUMO	32
2.2	ABSTRACT.....	33
2.3	INTRODUÇÃO.....	34
2.4	MATERIAL E MÉTODOS	36
2.4.1	Localização e caracterização da área de estudo	36
2.4.2	Mensuração dos dados	40
2.4.2.1	Unidade amostral	40
2.4.2.2	Suficiência amostral	40
2.4.3	Obtenção das variáveis dendrométricas e morfométricas de <i>Araucaria angustifolia</i> pelo método convencional	41
2.4.3.1	Variáveis dendrométricas.....	41
2.4.3.2	Variáveis morfométricas e de copa.....	42
2.4.4	Levantamento dos dados de copa com uso de geotecnologia (VANT).....	45
2.4.4.1	Mapeamento das Araucárias.....	46
2.4.4.2	Planejamento de Voo e Aquisição das Imagens.....	49
2.4.4.3	Levantamento e processamento dos Pontos de Controle (GCPs)	52
2.4.4.4	Processamento Digital de Imagens (PDI)	55
2.4.4.5	Medição do diâmetro de copa de Araucárias por Fotogrametria.....	57
2.4.5	Dendrocronologia- Incremento periódico anual em diâmetro.....	61
2.4.5.1	Análise dendrocronológica do crescimento.....	62
2.4.6	Agrupamento de dados em classes de diâmetro	63

2.4.7	Modelagem das variáveis relações forma – dimensão – densidade para <i>Araucaria angustifolia</i>	63
2.4.7.1	Modelagem das variáveis de copa e densidade	63
2.4.8	Processamento dos dados e análise estatística	64
2.4.8.1	Análise da comparação dos dados Convencionais vs Fotogrametria	66
2.4.9	Modelagem com uso de geotecnologias para diâmetro à altura do peito em função do diâmetro de copa	67
2.4.9.1	Modelagem dos dados de Ajuste	67
2.4.9.2	Validação dos modelos	67
2.4.10	Eficiências Relativas do tempo de medição para diâmetro de copa	68
2.4.10.1	Cálculo da eficiência relativa.....	68
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	69
2.5.1	Número de árvores e distribuição diamétrica	69
2.5.2	Características dendrométricas, morfométricas, incremento periódico anual em diâmetro e densidade de <i>Araucaria angustifolia</i>	73
2.5.2.1	Incremento periódico anual em diâmetro – Taxa de Redução	78
2.5.3	Correlação de Pearson para as variáveis dendro/morfométricas, incremento periódico anual em diâmetro e densidade com o diâmetro à altura do peito (d)	79
2.5.4	Modelagem das variáveis relações forma – dimensão – densidade para <i>Araucaria angustifolia</i>	83
2.5.4.1	Ajuste das equações entre as variáveis dendro/morfométricas, densidade e o diâmetro à altura do peito.....	83
2.5.5	Levantamento e processamento dos Pontos de Controle (GCPs)	89
2.5.6	Processamento Digital de Imagens (PDI).....	92
2.5.7	Comparação dos dados Convencionais vs Fotogrametria	95
2.5.8	Modelagem com uso de geotecnologias para diâmetro à altura do peito em função do diâmetro de copa	104
2.5.8.1	Modelagem dos dados de Ajustes e Validação.....	104
2.5.8.2	Avaliação dos resíduos dos Ajustes e Validação.....	106
2.5.9	Avaliação do tempo de medição e eficiência relativa – Diâmetro de copa..	107
2.6	CONCLUSÃO.....	110
2.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	112
	REFERÊNCIAS.....	113
	ANEXOS	123

1 INTRODUÇÃO GERAL

A Floresta Ombrófila Mista (FOM), Floresta com Araucária, ou Mata de Araucária (IBGE, 2012), é a fitofisionomia do Planalto Meridional na Região Sul do Brasil, entre 500 a 1700 m de altitude e compreende uma área de 250 mil km² distribuída, principalmente, no Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Carvalho, 2011). Essa floresta é caracterizada pela presença dominante da *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze.

A *A. angustifolia* conhecida como pinheiro brasileiro ou araucária, apresenta importância madeireira, social e econômica e pertencente à família *Araucariaceae*, sendo a única espécie do gênero que apresenta ocorrência natural no Brasil (Zechini, 2012). *A. Angustifolia* é uma espécie dióica, apresenta copa cônica na juventude e assume formato de umbela na maturidade. Esta espécie de árvore é caracterizada por troncos cilíndricos e retos, agulhas (folhas) aciculifoliadas perenes e pela produção de sementes comestíveis (pinhões) nas estruturas reprodutivas femininas (Mantovani, A.; Morellato, P.C.; Reis, M.S., 2004; Zanon, M.L.B.; Finger, C.A.G.; Schneider, P.R., 2009; Anselmini, J.I.; Zanette, F., 2012; Wendling, I.; Zanette, F., 2017). A dispersão bem sucedida da espécie é atribuída aos grãos de pólen transportados pelo vento (Ferri, G.K.).

Em virtude da robustez desta árvore e das características superiores de sua madeira, a exploração desta espécie impulsionou a economia do Sul do país na 2ª metade do século XX por meio do segmento madeireiro (Ferracioli, 2013). Posteriormente, a pecuária no Rio Grande do Sul e a agricultura nos estados do Paraná e Santa Catarina deram sequência a este processo de redução, enquanto o desenvolvimento de novas pesquisas e tecnologia para a espécie foram limitadas (Carvalho, 2011).

O auge da exploração na década de 70, a ausência de conhecimento para o manejo sustentável e o incentivo à plantios, encerrou este importante ciclo econômico da região Sul do Brasil (Stuepp et al., 2017). Desde o final do século passado, é proibido todo e qualquer aproveitamento comercial madeireiro de araucária provenientes de populações naturais, (Portaria nº. 37, IBAMA, 1992; Resolução CONAMA nº. 278, 2001). Passados mais de 20 anos da restrição ao uso da madeira de araucária, a conservação da espécie continua preocupante: comprometimento da estrutura dos ecossistemas em florestas nativas, ausência de plantios, insuficiente regeneração natural da espécie, áreas remanescentes fragmentadas, redução na taxa de crescimento e desinteresse do produtor rural com a espécie (Gasper et al., 2017; Eisfeld, 2020). Além de propiciar alta

competição, baixa taxa de regeneração, estagnação do incremento e menor ingresso e mortalidade (Becker et al., 2014; Silveira et al., 2018; Hess et al., 2018a; Hess et al., 2018b).

Assim, são necessários estudos e pesquisas que visem obter informações dendro/morfométricas, da estrutura, diversidade, estabilidade e produção da floresta para elaboração de manejo florestal sustentável. Informações dendro/morfométricas e de densidade são de extrema importância, pois atributos da copa envolvem processos fisiológicos que influenciam na taxa de incremento, crescimento em diâmetro, produção de frutos e sementes, entre outros (Kozłowski e Pallardy, 1996). O crescimento depende da quantidade de luz absorvida pelas folhas, também da eficiência da conversão da luz absorvida na biomassa e alocação de fotoassimilados nos tecidos (Binkley et al., 2013). Em geral, a competição entre árvores tem um efeito negativo sobre a disponibilidade de recursos para árvores individuais, o que se reflete em um declínio no crescimento com um aumento na competição intra e interespecífica (Coates et al., 2009).

Dessa forma, a formulação de modelos usando variáveis das relações dendro/morfométricas, densidade, dinâmica, estrutura, competição e produção podem indicar às autoridades legais que é necessária intervenção silvicultural para reduzir a competição, favorecer o crescimento, o rendimento, estabilidade, diversidade e produção das espécies florestais. Para garantir a eficiência e eficácia das atividades florestais, é crucial o emprego de tecnologias avançadas, e nesse cenário, às geotecnologias têm se destacado como ferramentas indispensáveis.

Às geotecnologias constituem numa ferramenta capaz de efetuar mensuração de dados, processamento e análises de informação georreferenciada (Campos et al., 2015). Sua utilização tem abrangência global com o intuito de gerenciamento e suporte para questões ambientais e tomadas de decisão (Albuquerque, 2009; Santos et al., 2000; Cândido et al., 2014), fazendo parte da rotina e planejamento das atividades de campo, buscando estratégias de conservação e preservação dos recursos naturais (Mendonça et al., 2011). Ela permite uma análise integrada do ambiente, relacionado como um todo (Pires et al., 2012).

O uso de imagens digitais aliadas à geotecnologia é uma relevante ferramenta para avaliar o desenvolvimento e arquitetura de plantas em diferentes tipologias florestais ou em plantios (Morgan et al., 2010). Advindo deste princípio, VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) ou drones vêm sendo empregados no desdobramento de atividades em diversas áreas, incluindo o ramo florestal, por apresentarem primazias técnicas e

econômicas (Ferreira et al., 2013), rapidez na aquisição de dados (Pereira e Tamamaru, 2013), maior flexibilidade (Casseiro e Pinto, 2014), e sistemas de automação de voo complexos e bem desenvolvidos que aprimoram a realização de diversas atividades (Santos et al., 2015).

O termo fotogrametria é etimologicamente derivado de três palavras em grego: *photos* que significa luz, *gramma*, que se refere à descrição gráfica e *metron*, que significa medir. Desse modo, analisando a origem da palavra, fotogrametria consiste em realizar medições graficamente através da análise da luz (Marchetti; Garcia, 1986). Por esse motivo, a Sociedade Americana de Fotogrametria (1998) apud Tomaselli et. al (1999, p.1) definiu-a como sendo:

A arte, ciência e tecnologia de obtenção de informação confiável sobre objetos físicos e o meio ambiente através de processos de registro, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética irradiada e outras fontes.

A fotogrametria, impulsionada pelo avanço tecnológico e o uso de sensores como imageamento digital, laser scanners e fenômenos eletromagnéticos, destaca-se na aquisição eficiente de dados espaciais em diversas situações. Essa ciência, através de investigação quantitativa, visa localizar pontos, medir distâncias, áreas, volumes, elevações e formas de objetos por meio de medições precisas em fotografias. Sua aplicação abrange a produção de mapas topográficos, planimétricos e ortofotos (Moffit e Mikhail, 1980; Wolf e Wilkinson, 2014).

De acordo com Faria e Costa (2015), a utilização de VANTs está em pleno crescimento, com aumento progressivo nas suas formas de utilização, com uma gama de modelos que podem variar no grau de inteligência sendo capaz de gerar comunicação, por intermédio de dispositivos acoplados, entre o drone e o operador como: localização via GPS, dados de câmeras de visão termal, informações sobre a velocidade, altura, dados coletados por fotografias ou vídeos, sendo esta difundida em estudos sobre a dinâmica das florestas.

Portanto, o presente estudo visa avaliar o potencial dos VANTs para mapeamento de florestas nativas, tendo em vista a crescente utilização desses equipamentos em mapeamentos rurais e urbanos, na qual essas tecnologias oferecem uma abordagem mais holística e precisa, possibilitando a tomada de decisões no manejo florestal. Além disso, o acesso às tecnologias e a disponibilidade de dados atualizados também são desafios que devem ser enfrentados para maximizar o potencial dessas ferramentas no manejo sustentável das florestas.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Araucaria angustifolia (Bertol.) Kuntze é a espécie dominante da Floresta Ombrófila Mista. As condições atuais dos fragmentos desta tipologia e da espécie no estado de Santa Catarina mostram que o desenvolvimento da espécie nesses remanescentes está comprometido pela falta de manejo (Hess, AF. et al., 2016; Klein, Danieli Regina et al., 2017; Hess, AF. et al., 2018(b)). O manejo florestal sustentável ou intervenções florestais sustentáveis é a ferramenta capaz de promover a conservação das espécies em tipologias florestais nativas. Em termos de manejo o problema é mensurar qual tratamento silvicultural deve ser aplicado para manter as espécies desejadas em toda rotação da floresta (Wadsworths e Zweede., 2006; Azevedo, C.P. et al., 2008; Hess, A.F. et al., 2010; Ávila et al., 2017).

Em um estudo sobre variáveis morfométricas e índices de competição, Hess et al., (2016) afirmaram que os remanescentes de floresta com *A. angustifolia* no sul do Brasil estão em competição e necessitam de intervenções silviculturais para estimular o crescimento das árvores remanescentes. Esses autores concluíram que a competição provoca mudanças na morfometria da copa e está correlacionada com o diâmetro à altura do peito, sítio, nível de competição entre as árvores e os recursos do ambiente.

Estudos de variáveis dendro/morfométricas de araucária podem ser aferidos com uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) e posterior validação com as medidas realizadas em campo. Como o método de medição a campo são demorados e de maior custo, as variáveis dendro-morfométricas podem validar métodos com o uso de ferramentas tecnológicas atuais, pois em algumas áreas da ciência florestal e para algumas espécies esses estudos são escassos e em desenvolvimento.

Com base nos estudos, o problema atual para a floresta é a considerar que a conservação sem intervenção, irá manter o crescimento, incremento, a regeneração natural, a estrutura e diversidade, a sustentabilidade da espécie, bem como estabilidade do ecossistema florestal. A extinção da espécie em número de árvores e diversidade genética também não é um problema para seu uso sustentável, pois estudos mostram que sua diversidade está assegurada, mesmo após exploração passada (Steffenon et al., 2008; Costa et al., 2015).

Identifica-se como problema que a legislação atual não é garantia de conservação e manutenção da estrutura da Floresta Ombrófila Mista. Deveras, sua aplicabilidade causa efeito contrário em proprietários de florestas naturais, devido ao desestímulo e

desvalorização deste recurso e da espécie araucária pelo seu não uso. Não estimula o reflorestamento com a espécie, não gera benefícios sociais e econômicos, indicando os recursos florestais como um empecilho ao desenvolvimento sustentável.

Salienta-se que conservar os recursos naturais da Floresta com Araucária exige conhecimento de sua estrutura, crescimento e dinâmica, indicando a intensidade de intervenções silviculturais que favoreçam sua conservação, estabilidade e produtividade. O comportamento da dinâmica e estrutura da floresta, aliado à integração com variáveis dendro/morfométricas possibilita aos gestores florestais e órgãos reguladores dos recursos naturais, reconhecer e visualizar em conjunto características da floresta, possibilitando o desenvolvimento de ferramentas para a tomada de decisão para conservação dos recursos florestais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral constituiu em mensurar, modelar e aferir variáveis dendro/morfométricas com o uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) medidas em imagens obtidas de sobrevoo com as medidas do inventário convencional em árvores de araucária em três diferentes sítios florestais no sul do Brasil, como ferramenta de auxílio para viabilizar planos de manejo florestal.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste estudo são:

- a) Ajustar modelos para as variáveis dendro/morfométricas e suas inter-relações para a espécie *Araucaria angustifolia*;
- b) Ajustar modelos com os dados medidos nas imagens como o diâmetro a altura do peito em função do diâmetro de copa, a fim de estimar a variável de interesse, dispensando medidas à campo;
- c) Estudar as correlações das relações dendro/morfométricas, incremento e densidade da floresta com a variável (d);
- d) Viabilizar a elaboração de planos de manejo sustentável e conservação da espécie;

- e) Verificar se há diferenças estatísticas nas medições da variável diâmetro de copa (dc) nas alturas de 60, 80 e 120 metros de sobrevoos com a do inventário convencional;
- f) Comparar os resultados com a mensuração dos dados pelo inventário convencional com as mensurações extraídas das imagens de nuvem de pontos;
- g) Auxiliar na precisão de medidas dendro/morfométricas com rapidez e precisão.

1.3 HIPÓTESES

Assim, as hipóteses deste estudo são:

- I) O emprego de geotecnologias possui a rapidez e precisão em substituição à métodos de campo;
- II) Relações da forma da copa respondem as mudanças de densidade e estrutura da floresta;
- III) As diferentes alturas de sobrevoos têm influência no processamento e aferição de medidas de árvores nas imagens.

1.4 JUSTIFICATIVA

Entrou em vigor no dia 27 de janeiro de 2022, a Lei n. 18.350, que altera o Código Estadual do Meio Ambiente de Santa Catarina (Lei 14.675/09), onde o capítulo VII do projeto conservacionista da araucária, Art. 255 sofreu alterações, dentre eles foi incluído na redação o manejo florestal sustentável da espécie. Onde o principal objetivo da implantação deste tema é a reversão no processo de extinção da espécie por meio de inserção de planos de manejo adequados à agregação de valor à exploração sustentável da espécie, para que se evite a extinção da espécie.

A *A. angustifolia* é uma árvore com alto potencial econômico e uma espécie abundantemente encontrada na Floresta Ombrófila Mista, porém a partir da criação da lei o manejo da espécie não está mais autorizado pelos órgãos licenciadores, o que impossibilita o uso múltiplo da espécie de forma sustentável.

Em décadas passadas, a araucária foi explorada sem aplicação de manejo, mas garantiu o desenvolvimento econômico na sua área de ocorrência. Essa exploração não foi efetuada de maneira correta, isto é, visando à manutenção do crescimento, produção

e ecologia das florestas, e sim de forma irregular sem considerar o conhecimento dos elementos e variáveis do manejo sustentável.

Assim, atributos da copa permitem auxiliar o manejador a aplicação do manejo sustentável. Esse conhecimento quando associado à posição que cada árvore ocupa no estrato é importante para compreender a estrutura atual e futura do ecossistema florestal, pois fornece informações adicionais sobre o espaço vital para o crescimento, a disponibilidade de recursos, a densidade ideal e a conservação das espécies.

Atualmente, novas ferramentas auxiliam as medições da copa, como por exemplo o sensoriamento remoto, pois possibilita obter informações de forma rápida e precisa e com menor custo, quando comparado ao levantamento direto a campo, principalmente porque em florestas mistas aumenta a dificuldade de visualização da copa devido à cobertura do dossel ou posição que a árvore ocupa no estrato. Ao mesmo tempo, medições em florestas com alta densidade e árvores não isoladas, dificultam visualização em imagens orbitais, sendo necessários estudos que validem o uso destas novas ferramentas e tecnologias. Com o sensoriamento remoto é possível se obter novas informações, que se assemelham ao levantamento realizado diretamente no campo, entretanto, tem-se a possibilidade de realizar a amostragem do ambiente de uma maneira rápida (Silva, 2016).

Nesse contexto, para fortalecer a sinergia entre os processos de manejo florestal já concebido e o emprego de tecnologias inovadoras, as empresas e as instituições estão cada vez mais investindo em pesquisas com o uso de drones que, atualmente integram um novo cenário no setor florestal possibilitando a realização de inventários a partir do uso de ferramentas de alta precisão, aperfeiçoando as avaliações quantitativas das florestas que auxiliam na interpretação do manejo sustentável, e assim, contribuir com a ciência, com os gestores florestais e com aqueles que trabalham diretamente com a espécie e dependem do sucesso de sua produção.

Com base nas justificativas as principais contribuições do estudo são:

- ✓ Indicar intervenções silviculturais sustentáveis como forma de promover a conservação, a diversidade e a estrutura da floresta;
- ✓ Subsidiar o uso sustentável da espécie, com elaboração de técnicas de manejo sustentado e oferecer treinamento técnico para elaboração dos planos de manejo;
- ✓ Aprimorar o uso de geotecnologias, mensuração de florestas para controle do manejo e utilização da araucária.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, E.R. **Aplicação de geotecnologias na gestão ambiental do município de Salinas**. 2009. 75 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente). Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2009.
- ANSELMINI, J.I.; ZANETTE, F. Polinização controlada em *Araucaria angustifolia*. **Cerne**, Lavras, v. 18, n.2, p. 247-255, abr./jun.2012.
- AVILA, A.L. et al., Recruitment, Growth and recovery of comercial tree species over 30 years following logging and thinning in a tropical rain forest. **Forest Ecology and Management**, 385, 2017. p.225-235.
- AZEVEDO, C.P. et al. Efeito de diferentes níveis de exploração e de tratamentos silviculturais sobre a dinâmica da Floresta remanescente. **Revista Floresta**, v. 38, n.2, abr./jun.,2008. p. 277-293.
- BRASIL. **Lei nº 18.350, de 27 de janeiro de 2022**. Dispõe sobre o projeto conservacionista da Araucária. Diário Oficial da União, Poder Legislativo, Brasília, DF, 27 de janeiro de 2022, Seção 1, p. 1-3, 2022.
- BECKERT, S.M.; ROSOT, M.A.D.; ROSOT, N.C., 2014. Crescimento e dinâmica de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. em fragmento de Floresta Ombrófila Mista. **Sci. For.**, Piracicaba, (42)102:209-218.
- BINKLEY D. et al. Light absorption and use efficiency in forests: why patterns differ for trees and stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 288, p. 5-13, 2013.
- CAMPOS, S.; PISSARRA, T.C.T.; CAMPOS, M. **Geotecnologia aplicada no planejamento ambiental de bacias hidrográficas**. 1 ed. Tupã: ANAP, 2015. V.1. 199p.
- CÂNDIDO, A.K.A.A et al., Modelo Digital de Superfície gerado a partir de imagens de VANT. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 5., 2014. Campo Grande, **Anais...** Campo Grande: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2014. p. 296-303. Disponível em: <https://geopantanal.cnptia.embrapa.br/2014/cd/p48.pdf>. Acesso em 18 de maio de 2022.
- CASSEMIRO, G.H.M.; PINTO, H.B. **Composição e Processamento de Imagens Aéreas em Alta Resolução Obtidas com Drones**. 2014. 80 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014.
- CARVALHO, M. M. X. Os fatores do desmatamento da floresta com araucária: agropecuária, lenha e indústria madeireira. **Revista Esboços**, v. 18, n. 25, p. 32-52, 2011. DOI: [10.5007/2175-7976.2011v18n25p32](https://doi.org/10.5007/2175-7976.2011v18n25p32).
- CERTI. **Análise integrada das cadeias produtivas de espécies nativas da Floresta Ombrófila Mista e seu impacto sobre o ecossistema**. Volume I - Relatório Final:

Diagnóstico das Cadeias Produtivas do Pinhão e da Erva-Mate. Curitiba, PR, p. 154, 2012.

COATES, K. D.; CANHAM, C. D.; LEPAGE, P. T. Above versus below ground competitive effects and responses of a guild of temperate tree species. **Journal of Ecology**, Oxford, v. 97, n. 1, p. 118-30, 2009.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente (Brasil). **Resolução CONAMA 278**, de 24 de maio de 2001. Diário Oficial da União de 18 de julho de 2001. 2001.

COSTA, Emanuel Arnoni; FINGER, César Augusto Guimarães; CUNHA, Thiago Augusto da. Influência da posição social e do número de raios na estimativa da área de copa em Araucária. **Floresta**, [S.l.], v. 43, n. 3, p. 429-438, set. 2013. ISSN 1982-4688. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/30864/21087>. Acesso em: 17 mar. 2022.

COSTA, N. C. F.; GUIDOLIN, A. F.; VARGAS, O. F.; MANTOVANI, A. Efeitos da paisagem de campo e florestamento com Pinus na diversidade e estrutura genética de pequenas populações remanescentes de *Araucaria angustifolia*. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 107, p. 551–560, 2015.

EISFELD, R. L. **Pesquisa, legislação, plantio e manejo de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze: Perspectivas e soluções**. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, 2020. 261 p.

FARIA, R. R. de; COSTA, M.E. A inserção dos veículos aéreos não tripuláveis (DRONES) como tecnologia de monitoramento no combate ao dano ambiental. **Revista Ordem Pública**, v.8, n.1, 2015. Disponível em: <https://rop.emnuvens.com.br/article/view/92/91>. Acesso em: 20 de março de 2023.

FERREIRA, A.M.R et al. Utilização de aeronaves remotamente pilotadas para extração de mosaico georreferenciado multiespectral e modelo digital de elevação de altíssima resolução espacial. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE, 2013, p. 9308-9315. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/rep/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.29.00.37.47>. Acesso em: 18 de maio de 2022.

FERRI, G.K. *Araucaria angustifolia*: milhões de anos de história. Ed. 86.

GASPER, A. L.; OLIVEIRA, L. Z.; LINGNER, D. V.; VIBRANS, A. C. **Inventário Florístico Florestal de Santa Catarina, Volume VII, Espécies arbóreas raras de Santa Catarina**. Blumenau, Edifurb, 2017. 256 p.

HESS, AF; CALGAROTTO, AR; PINHEIRO, R.; WANGINIÁK, TCR Proposta de manejo de *Araucária angustifolia* utilizando o quociente de Liocourt e análise de incremento, em propriedade rural no município de Lages, SC. **Revista Brasileira de Pesquisa Florestal**, v. n. 64, pág. 337–345, 2010.

HESS, A. F., LOIOLA, T., SOUZA, I. A., NASCIMENTO, B. Morphometry of the crown of *Araucaria angustifolia* in natural sites in southern Brazil. **Bosque**, 37(3), p. 603-611, 2016. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000300017>.

HESS, A.F.; SILVEIRA, A.C.DA.; KREFTA, S.M.; SANTOS, D.V.DOS.; FILHO, M.D.H.V.; ATANAZIO, K.A.; SCHORR, L.P.B.; SOUZA, I.A.; BORSOI, G.B.; STEPKA, T.F.; COSTA, E.A.; LIESENBERG, V. Crown dynamics of Brazilian pine (*Araucaria angustifolia*) in Santa Catarina region of Brazil. **Aust. J. Crop Sci.** 2018(a). 12(03):449457.

HESS, A.F.; LOIOLA, T.; SOUZA, I.A.; MINATTI, M.; RICKEN, P.; BORSOI, G. Forest management for the conservation of *Araucaria angustifolia* in southern Brazil. **Floresta**. 2018(b). 49(3): 373-382.

HESS, A. F., da SILVEIRA, A. C., KREFLA, S. M., dos Santos, D. V., VIEIRA FILHO, M. D. H., ATANAZIO, K. A., SCHORR, L. P. B., SOUZA, I. A., BORSOI, G. A., STEPKA, T. F., COSTA, E. A., e LIESENBERG, V. 2018(c). Crown dynamics of Brazilian pine (*Araucaria angustifolia*) in Santa Catarina region of Brazil. **Australian Journal of Crop Science**, 12(3), 449-457. <http://dx.doi.org/10.21475/ajcs.18.12.03.pne928>.

IBAMA. Lista Oficial das Espécies da Flora Brasileira Ameaçadas de Extinção. **Diário Oficial**. Portaria 006/92-N de 15 de janeiro de 1992. 1992.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manuais técnicos em geociências**: técnico da vegetação brasileira, 1. Rio de Janeiro, 2012. 271 p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2023.

KLEIN, Danieli Regina et al. Relações morfométricas para *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em Santa Catarina. **Floresta**, [S.l.], v. 47, n. 4, p. 501-512, dez. 2017. ISSN 1982-4688. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/49667>>. Acesso em: 09 fev. 2024. DOI :<http://dx.doi.org/10.5380/rf.v47i4.49667>.

KOZLOWSKI TT e PALLARDY SG (1996). Physiology of woody plants. 2nd ed. San Diego, Academic Press. 411p.

MANTOVANI, A.; MORELLATO APC; REIS, MS. Fenologia reprodutiva e produção de sementes em *Araucária angustifolia* (Bert.) O. Kuntze. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 27, 2004, pág. 787–796.

MENDONÇA, R. A. M. et al. **Uso das Geotecnologias para Gestão Ambiental - Experiências na Amazônia Meridional**. 1. ed., 2011.

MORGAN, J. L.; GERGEL, S.E.; COOPS, N.C. Aerial photography: a rapidly evolving tool for Ecological management. **BioScience**, v.60, n.1, p.47-59, 2010. Disponível em: <https://academic.oup.com/bioscience/article/60/1/47/315840/Aerial-Photography-A-Rapidly-Evolving-Tool-for>. Acesso em 20 de maio de 2022.

PEREIRA, O.J.R.; TAMAMARU, R. Geração de modelos digitais de elevação com base em técnicas de estereoscopia digital, por meio de imagens VANT: Subsídio a identificação de manchas de desmatamento em áreas de preservação permanente. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE, 2013, p.2113-2119. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p0168.pdf>. Acesso em: 18 de maio de 2022.

PIRES, E. V. R. et al. Geoprocessamento Aplicado a Análise do Uso e Ocupação da Terra para Fins de Planejamento Ambiental na Bacia Hidrográfica do Córrego Prata – Três Lagoas (MS). **Revista Geonorte**, Edição Especial, v. 2, n. 4, p. 1528 – 1538, 2012.

SANTOS, C.A.G et al., Influência do tipo da cobertura vegetal sobre a erosão no semi-árido paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.1, p. 92-96, 2000.

SANTOS, A. A. et al. Uma Automação para transmissão de comandos para um drone de baixo-custo sobre a plataforma MultiWii. In: WORKSHOP DE TRABALHOS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E GRADUAÇÃO DA ESCOLA REGIONAL DE COMPUTAÇÃO, 13., 2015, Salvador. **Anais...** Salvador: ERBASE, 2015. Disponível em: <http://www.lbd.dcc.ufmg.br/bdbcomp/servlet/Evento?id=805>. Acesso em: 16 março. 2022.

SANTOS, H. G. dos; CARVALHO JUNIOR, W. de; DART, R. de O.; AGLIO, M. L. D.; SOUSA, J. S. de; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. da S.; OLIVEIRA, A. P. de. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p.

SILVA, M.B. **Uso do VANT para a adequação ambiental e restauração de áreas degradadas do uso do solo em propriedades rurais:** “estudo de caso em uma propriedade rural no município de Dourados-MS”, Universidade Federal do Paraná, p. 58, 2016.

SILVEIRA, A. C., HESS, A. F., SCHORR, L. P. B., STEPKA, T. F., KREFTA, S. M., ATANAZIO, K. A. (2021). Variáveis de copa na determinação da densidade máxima de florestas de *Araucaria angustifolia* (Bertol) Kuntze. **Scientia Forestalis**, 49(130), e3545. <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n130.16>.

SILVEIRA, A.C., HESS, A.F, SCHORR, L.P.B., KREFTA, S.M., SANTOS, D.V., FILHO, M.D.H.V., ATANAZIO, K.M., COSTA, E.A., STEPKA, T.F., BORSOL, G.A. Management of Brazilian pine *Araucaria angustifolia* (Bertol) Kuntze based on the Liocourt model in a mixed ombrophilous forest in Southern Brazil. **Australian Journal of Crop Science**, Austrália, v. 12, n.02, p. 311-317, 2017.

STEFENON, V. M.; GAILING, O.; FINKELDEY, R. Genetic structure and the conservation of genetic resources of Brazilian pine (*Araucaria angustifolia*). **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, p. 2718 - 2725, 2008.

STUEPP, C.A.; BRAZ, E.M.; ZANETTE, F. et al. **Araucária particularidades, propagação e manejo de plantios**. Brasília: Embrapa Florestas, 2017. 163 p.

WADSWORTH, F.H.; ZWEED, J. C. Liberation: acceptable production of tropical forest timber. **Forest Ecology and Management**, v.233, p.45-51. 2006.

WENDLING, I.; ZANETTE, F. **Araucária: particularidades, propagação e manejo de plantios**. Brasília, DF, Embrapa, 2017.

ZANON, M. L. B.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. Proporção da dióica e distribuição diamétrica de árvores masculinas e femininas de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze trees in implanted stands. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 4, p. 425-431, 2009.

ZECHINI, A. A. **Morfometria, produção, fenologia e diversidade genética: subsídios para conservação da *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze e coleta sustentável do pinhão no planalto catarinense**. Dissertação (mestrado). 191f. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2012.

2 CAPÍTULO I – AVALIAÇÃO DO DIÂMETRO DE COPA DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze PELO MÉTODO CONVENCIONAL E COM USO DE IMAGENS DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT) EM DIFERENTES SÍTIOS FLORESTAIS NO SUL DO BRASIL

2.1 RESUMO

Estimativas precisas das variáveis dendro/morfométricas são essenciais para a conservação e uso sustentável dos recursos florestais. O objetivo do estudo foi mensurar, avaliar e modelar características dendro/morfométricas obtidas em 100 árvores de araucária comparando medidas obtidas pelo método convencional e medidas obtidas de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) em três alturas de voo, 60, 80 e 120 m, em três sítios nos municípios de Urubici e Bom Retiro, SC, sul do Brasil. As áreas do estudo possuem 5,22 ha, 4,78 ha e 5,80 ha. Nas imagens o processamento digital foi feito no *Agisoft Metashape Professional* v.1.6.4 e a medição da variável diâmetro de copa (dc) no *Cloud Compare* v.2.13. Em campo, foram medidos, nas 100 árvores, o diâmetro à altura do peito (d), 4 raios de copa (rc), a altura de inserção da copa (hic) e a altura total (h). As variáveis analisadas nos modelos foram as que obtiveram maiores correlações de Pearson. No ajuste dos modelos os resíduos foram submetidos aos testes de normalidade, homogeneidade da variância e independência do erro. Os testes indicaram que os resíduos não atendem aos condicionantes de regressão e o ajuste dos modelos foi utilizando a técnica dos modelos lineares generalizados. As variáveis morfométricas com maior correlação com o d foram o dc ($r=0,88$); asc ($r=0,75$); h ($r=0,69$); N/ha ($r=-0,67$) e o vc ($r=0,63$). O ajuste indicou que as equações para estimar o dc para cada sítio de estudo com precisão foram: dc = $2,4126 + 0,2015 \cdot d$ (sítio I); dc = $1,6129 + 0,2248 \cdot d$ (sítio II); dc = $1,5278 + 0,0176 \cdot d$ (sítio III), na distribuição Gama e funções, identidade e logarítmica. Os modelos visam incorporar as condições de forma e dimensão das árvores e facilitar medidas e custos de inventário florestal, bem como fornecer subsídios a análise estrutural da floresta em forma, dimensão e densidade. Os dados de dc mostram que há diferença significativa entre as medidas aferidas em campo e pela fotogrametria. O sítio III na altura de 60 m, não apresentou diferença significativa a 5% de significância. Os modelos ajustados mostram que é possível medir o dc nas imagens e assim com precisão estimar o d da árvore dispensando medidas a campo. A validação dos modelos foi realizada em 43 árvores distintas, os modelos ajustados indicaram valor de erro para a variável d, no campo de 0,06 cm, na fotogrametria apresentaram valores de erro de 0,08 cm, 0,03 cm e 0,002 cm nas três alturas respectivamente, corroborando com a precisão dos ajustes. O método convencional apresentou maior tempo de medição da variável dc em comparação a fotogrametria. A eficiência relativa mostrou que a fotogrametria foi mais eficiente. Os resultados mostram a possibilidade do uso de ferramentas da geotecnologia na precisão das estimativas e modelagem de variáveis de referência na tomada de decisão do manejo florestal, visto que o dc é uma variável que indica o número de árvores adequado para ocupação do espaço durante um ciclo de rotação, mantendo a taxa de incremento e disponibilidade de recursos ao crescimento.

Palavras-chave: Nuvem de pontos; Morfometria; Floresta Ombrófila Mista; Drone.

2 CHAPTER I - EVALUATION OF THE CROWN DIAMETER OF *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze BY CONVENTIONAL METHOD AND WITH THE AID OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV) IN DIFFERENT FOREST SITES IN SOUTHERN BRAZIL

2.2 ABSTRACT

Accurate estimates of dendro/morphometric variables are essential for the conservation and sustainable use of forest resources. The aim of the study was to measure, evaluate and model dendro/morphometric characteristics obtained from 100 araucaria trees by comparing measurements obtained by the conventional method and measurements obtained from an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) at three flight heights, 60, 80 and 120 m, at three sites in the municipalities of Urubici and Bom Retiro, SC, southern Brazil. The study areas cover 5.22 ha, 4.78 ha and 5.80 ha. The images were digitally processed using Agisoft Metashape Professional v.1.6.4 and the variable crown diameter (dc) was measured using Cloud Compare v.2.13. In the field, the diameter at breast height (d), 4 crown radii (rc), crown insertion height (hic) and total height (h) were measured on the 100 trees. The variables analyzed in the models were those with the highest Pearson correlations. When the models were adjusted, the residuals were subjected to normality, homogeneity of variance and independence of error tests. The tests indicated that the residuals did not meet the regression conditions and the models were adjusted using the generalized linear model's technique. The morphometric variables with the highest correlation with d were dc ($r=0.88$); asc ($r=0.75$); h ($r=0.69$); N/ha ($r=-0.67$) and vc ($r=0.63$). The fit indicated that the equations for accurately estimating dc for each study site were: $dc = 2.4126 + 0.2015 \cdot d$ (site I); $dc = 1.6129 + 0.2248 \cdot d$ (site II); $dc = 1.5278 + 0.0176 \cdot d$ (site III), using the Gamma distribution and identity and logarithmic functions. The models aim to incorporate tree shape and size conditions and facilitate forest inventory measurements and costs, as well as providing support for structural analysis of the forest in terms of shape, size and density. The dc data shows that there is a significant difference between the measurements taken in the field and by photogrammetry. Site III at a height of 60 m showed no significant difference at a 5% significance level. The adjusted models show that it is possible to measure the dc in the images and thus accurately estimate the d of the tree without the need for field measurements. The models were validated on 43 different trees. The adjusted models showed an error value for the d variable of 0.06 cm in the field, while photogrammetry showed error values of 0.08 cm, 0.03 cm and 0.002 cm at the three heights respectively, corroborating the accuracy of the adjustments. The conventional method took longer to measure the dc variable than photogrammetry. The relative efficiency showed that photogrammetry was more efficient. The results show the possibility of using geotechnology tools to accurately estimate and model reference variables in forest management decision-making, since dc is a variable that indicates the number of trees suitable for occupying space during a rotation cycle, maintaining the rate of increase and availability of resources for growth.

Keywords: Point cloud; Morphometry; Mixed Ombrophiles Forest; Drone.

2.3 INTRODUÇÃO

A Floresta Ombrófila Mista (FOM), também conhecida como Floresta com Araucárias possui remanescentes florestais nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo e Minas Gerais (Inoue et al., 1984). O Planalto Catarinense pertence majoritariamente à tipologia Floresta Ombrófila Mista (FOM), também conhecida como Mata ou Floresta com Araucária (Ferreira et al., 2013).

Araucaria angustifolia (Bertol) Kuntze é o principal componente arbóreo do estrato da Floresta Ombrófila Mista – FOM (Valério et al., 2017), tendo essas matas com araucária ocupado, no passado, 20 milhões de ha da paisagem no Sul do Brasil. No entanto, a crescente necessidade de terras para a agricultura e pecuária bem como as amplas possibilidades de uso de sua madeira acarretou, desde a metade do século passado, a exploração dessas matas (Souza et al., 2015).

Devido à exploração sem conhecimento dos elementos necessários ao manejo sustentável, a legislação proibiu a exploração da espécie, como medida de conservar e preservar as áreas remanescentes com floresta de araucária. Contudo, a não intervenção não garante a conservação das florestas, pois ocorre estagnação do crescimento, aumento do ciclo de rotação final, o desinteresse social em áreas de florestas e baixo índice de regeneração natural (Beckert; Rosot; Rosot, 2014).

Certi (2012), analisando a legislação ambiental vigente, mostrou que há um ambiente institucional desfavorável, através da proibição do corte de espécies ameaçadas de extinção, como é o caso da araucária. Esse fato criou uma aversão dos proprietários de terras em relação à espécie, o que prejudica sua regeneração natural. Assim, a própria legislação que deveria proteger a araucária acaba se tornando um risco, uma vez que muitos proprietários de terras cortam plântulas de araucárias, com receio de restrições futuras com relação à utilização da área (Certi, 2012).

É imperativo o conhecimento dos fatores que influenciam o crescimento e que reflitam a variação da forma e tamanho das árvores para subsidiar a exploração racional de florestas nativas (Costa, 2011). Portanto, efetiva-se a importância da determinação das dimensões das árvores para fins de manejo florestal e regulação da densidade ideal dessas florestas (Hess et al., 2018c). As condições ideais de crescimento de árvores individuais, podem ser avaliadas pela morfometria das árvores, com reflexo nas condições de espaço vital e de competição, variáveis que possibilitam fazer interferência na dinâmica da floresta, visando a maximização do incremento (Costa et. al., 2015).

Sabe-se que determinar o espaço horizontal nas florestas e também a sua relação com as dimensões das árvores é objeto de estudo de vários pesquisadores (Pretzsch, 2014; Klein et al., 2017; MacFarlane e Kane, 2017; Hess et al., 2018a), considerando principalmente as relações estabelecidas entre as variáveis: diâmetro de copa, altura, diâmetro da árvore e comprimento de copa, as quais são de grande relevância nos estudos de competição em povoamentos florestais.

O emprego de VANTs em estudos ambientais pode ser uma grande ferramenta para o aumento do detalhamento nesses estudos, porém ainda existem algumas limitações. Uma delas é a área passível de mapeamento em uma única missão. Enquanto imagens orbitais conseguem abranger grandes áreas em uma só imagem, os VANTs são limitados a pequenas áreas devido a alguns fatores como a baixa duração de suas baterias (em modelos menores e mais baratos), a altura máxima de voo permitido para usuários sem brevê etc. Outro problema comumente encontrado é a necessidade de se utilizar Pontos de Controle no Terreno (*Ground Control Points* - GCP) para corrigir erros planimétricos e altimétricos decorrentes da baixa precisão e acurácia cartográfica dos módulos GNSS (Sistemas Globais de Navegação por Satélite) embarcados nesses equipamentos.

Os GCPs são alvos físicos georreferenciados com aparelhos GNSS de alta precisão que devem ser distribuídos dentro da área de interesse e são usados como referência durante a fase do processamento dos dados. Uma forma de evitar essa etapa é a utilização de VANTs com módulos GNSS RTK embarcados, que geram produtos com precisão e acurácia cartográfica muito próximos da utilização de GCPs, sem a perda de tempo da distribuição e medição dos alvos físicos pela área de estudo (Boa Morte, Caio de Lima et al., 2020). Embora os sistemas VANTs tenham durações de voo muito mais curtas do que as aeronaves convencionais (Tuominen, 2015), eles têm sido cada vez mais utilizados na silvicultura porque são econômicos e flexíveis (Dunford. R, 2009).

Em aplicações florestais, estudos baseados em VANT têm sido utilizados com sucesso e alta precisão para mapear a vegetação (Rango, Albert et al., 2009; Laliberte, Andrea S. et al., 2010), calcular a biomassa vegetal e nitrogênio (Hunt, 2005), monitorar a mudança da vegetação (Berni, 2009), monitorar a colheita e recrutamento (Naesset, Erik, 2002) e estimar a altura da copa das árvores (Zarco-Tejada, Pablo J. et al., 2014; Lisein, Jonathan et al., 2013) e parâmetros de copa (Díaz-Varela, Ramón A. et al., 2015; Torres-Sánchez, Jorge et al., 2015).

Tanto na ecologia como na silvicultura, particularmente nesta última, existe uma grande procura de informação estrutural dos povoamentos florestais (Fritz, Andreas; et

al., 2013). A detecção precisa das copas das árvores é uma pré-condição necessária para obter os parâmetros de inventário, como posição, altura, largura da copa e volume da árvore. Além disso, a determinação de espécies individuais de árvores e dos parâmetros da copa das árvores fornece resultados muito mais precisos (Koch, B. et al., 2002). A altura do dossel é um dos parâmetros mais importantes e significativos para atividades de inventário, monitoramento e modelagem (Selkowitz, David J. et al., 2012).

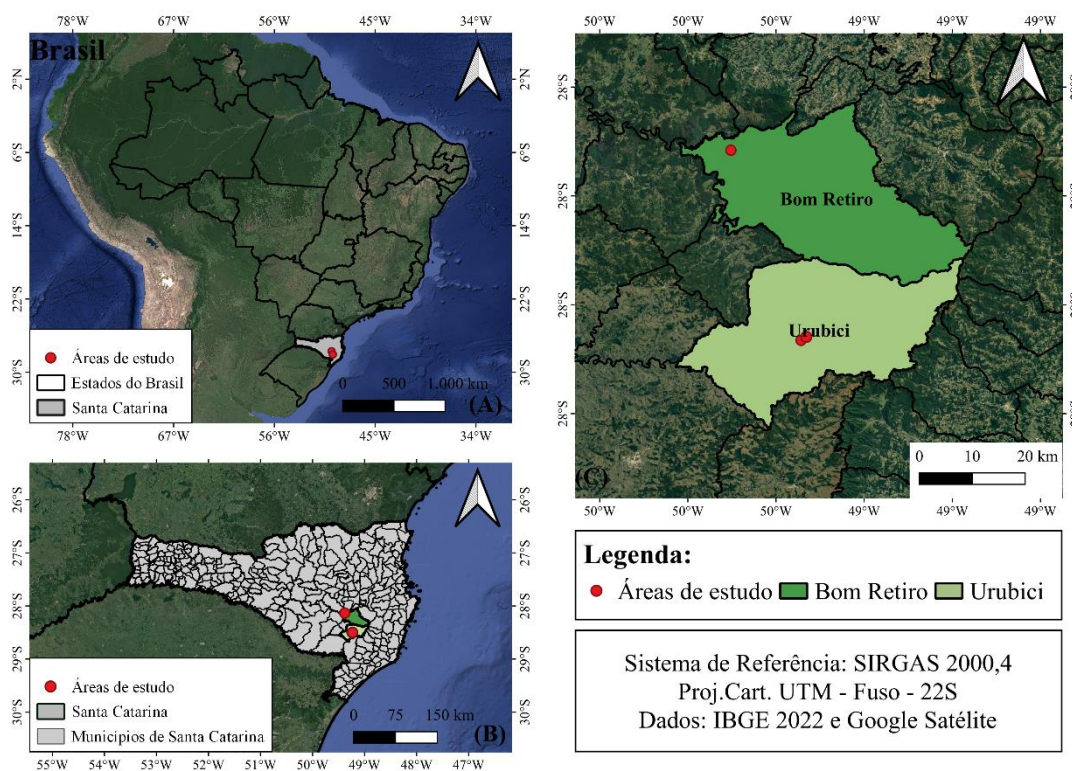
Portanto, a maioria dos conjuntos de dados espaciais convencionais não pode fornecer dados suficientes para estimar a copa das árvores e a altura da copa com alta precisão, com isso este estudo teve como objetivo geral comparar a precisão dos dados obtidos nas medições de campo e fotogramétrica utilizando o erro absoluto e a raiz do erro quadrático médio na avaliação de precisão dos dados como ferramenta de auxílio para intervenções silviculturais e de manejo para a espécie de *Araucaria angustifolia* para três diferentes sítios florestais no sul do Brasil.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1 Localização e caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado em um remanescente pertencente a fitofisionomia Floresta Ombrófila Mista (IBGE, 2012), dividido em três locais, sendo estes referidos a sítios florestais, com árvores de *Araucaria angustifolia*, nos municípios de Urubici (URB) sendo este com duas áreas (sítio I e II) e Bom Retiro (BRT) denominado de (sítio III) no estado de Santa Catarina. As coordenadas geográficas centrais dos sítios são as seguintes: Sítio I - 28°03'07,18''S e 49°36'05,31''O, Sítio II - 28°03'30,60''S e 49°36'42,36''O e Sítio III - 27°41'30,29''S e 49°44'49,35''O como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Localização dos três sítios de estudo com *Araucaria angustifolia*, nos municípios de Urubici e Bom Retiro, Santa Catarina. (A) Mapa do Brasil com ênfase ao estado de Santa Catarina; (B) Mapa do estado de Santa Catarina com os municípios que abrangem as áreas de estudo; (C) Mapa dos municípios com as respectivas áreas de estudo.



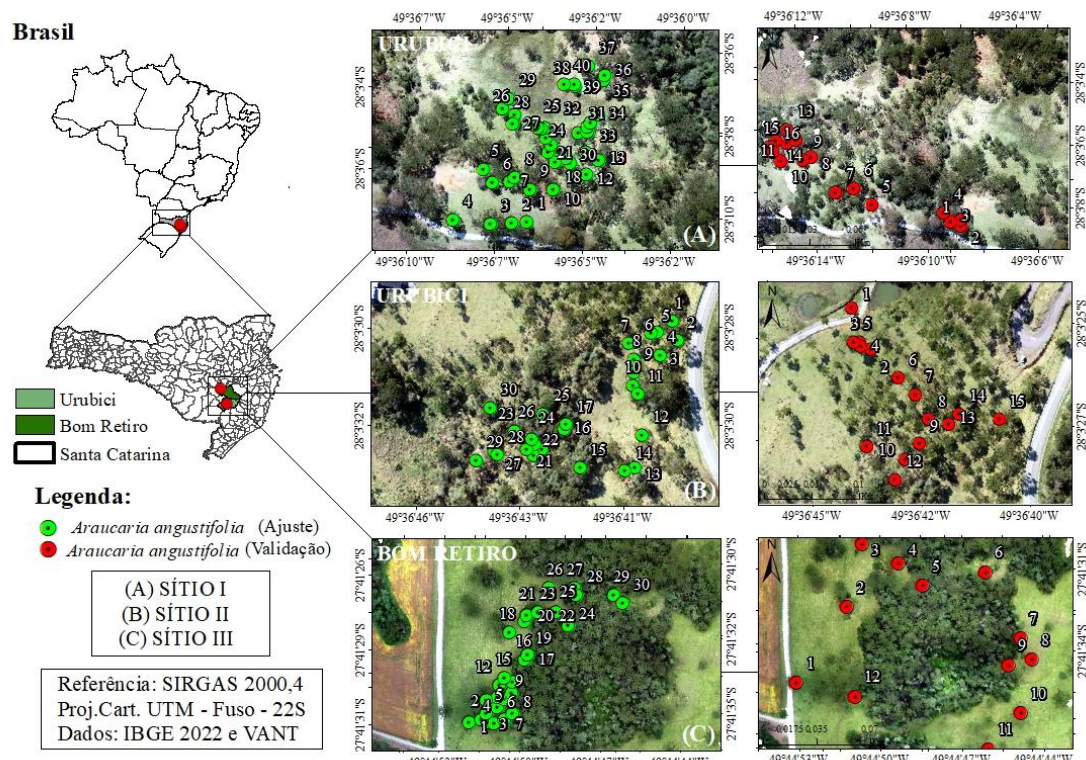
Fonte: Elaborada pela autora (2022).

As regiões de estudo, de modo geral, são caracterizadas pelo clima Cfb segundo a classificação de Köppen, ou seja, clima temperado, com verão ameno, caracterizado por ser constantemente úmido sem estação seca e com possibilidades de geada. Em Urubici a altitude média é de 1.600 m, com ocorrência, no inverno, de geada e neve, temperatura média anual de 13,8 °C e precipitação média anual varia entre 1.200 e 1.900 mm, com chuvas bem distribuídas durante o ano. Em Bom Retiro a altitude média é de 890 m, temperatura média anual de 14,5°C e precipitação média anual varia entre 1.600 a 1.900 mm (Alvares, et al., 2013).

Os solos predominantes da região de Urubici (URB) e Bom Retiro (BRT) são pouco profundos e apresentam em geral, horizonte A proeminente e húmico e classificados, principalmente, como Neossolos Litólicos e Cambissolos, segundo a classificação da EMBRAPA, (2012).

O estudo foi dividido em três áreas sendo o sítio I com 5,22 hectares, o Sítio II com 4,78 hectares e o Sítio III com 5,80 hectares. Foram inventariadas no sítio I 40 árvores de araucária, no sítio II 30 árvores de araucária e no sítio III 30 árvores da espécie, todas identificadas com fita amarela biodegradável e localizadas sua posição no terreno com uso do receptor de sinais de GPS (*Global Positioning System*), demonstradas nas Figuras 2 (A, B e C), totalizando 100 árvores amostradas.

Figura 2 - Localização dos três sítios de estudo com *Araucaria angustifolia*, nos municípios de Urubici e Bom Retiro, Santa Catarina, com destaque para as árvores individuais amostradas e árvores para validação do modelo do diâmetro de copa ajustado.

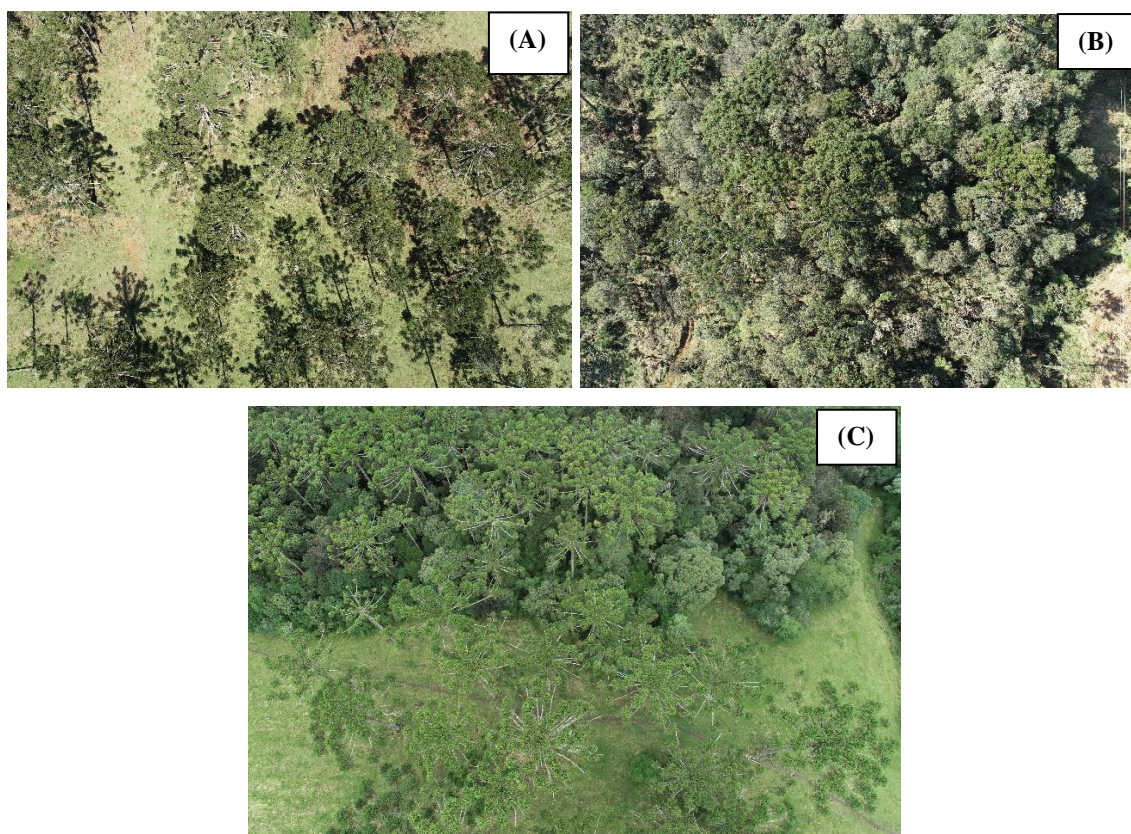


Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Em todas as áreas de estudo com ocorrência da floresta com araucária, houve antropização, com redução da sua diversidade em espécies e gêneros por efeito da homogeneização do desenvolvimento (Becker, 1997; Schorr, 2019), e altera seus processos naturais de funcionamento (Montibeller Filho, 2007). Sendo assim, atribui-se o status de floresta regular, com predomínio de araucárias, por vezes apresenta outras espécies, estas com menor valor econômico, como por exemplo: *Lithraea brasiliensis* (L.) Marchand, *Ocotea pulchella* (Nees & Mart.) Mez, *Sapium glandulosum* (L.) Morong, *Zanthoxylum rhoifolium* Lam; *Ocotea puberula* (Rich.) Nees, *Feijoa sellowiana* (O.

Berg) O. Berg; *Allophylus edulis* (A St. Hil.) Radlk., entre outras. A Figura 3 mostra a caracterização dos remanescentes de floresta estudados com dominância em todos os estratos da espécie e a formação de uma floresta regular.

Figura 3 - Caracterização dos remanescentes de Floresta Ombrófila Mista (FOM), das áreas estudadas, imagens obtidas por drone, que mostram a estrutura atual das condições da floresta com araucária. Sendo (A) Urubici (URB), Sítio I, (B) Urubici (URB), Sítio II e (C) Bom Retiro (BRT), Sítio III.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

As florestas do presente estudo, são nativas de características regulares e inequidiana, sendo observada pouca regeneração natural, menor diversidade de espécies, uso para pecuária, cultivo de maçã e pousada rural, comprometendo a estrutura da floresta.

2.4.2 Mensuração dos dados

2.4.2.1 Unidade amostral

A mensuração dos dados para os três sítios florestais do estudo foi realizada pela seleção aleatória de árvores de *Araucaria angustifolia* distribuídas em tamanhos de diâmetros variados afim de representar toda a floresta. Cada árvore constituiu uma unidade amostral (UA), sendo identificada com número em fitas amarelas biodegradáveis e georreferenciada com o uso do receptor de sinais GPS (*Global Position System*) da marca Garmin, do tipo navegação.

2.4.2.2 Suficiência amostral

Para avaliar a suficiência amostral e predizer o número de árvores que deveriam ser medidas selecionou-se a variável diâmetro à altura do peito d como base para a determinação do número mínimo de unidades amostrais conforme a (Equação 1) de Sanquetta et al., (2014), com nível de confiança de 95% e erro máximo amostral de 5%:

$$n = \frac{t^2 S_x^2}{E^2} \quad (1)$$

Em que: n = número de unidades amostrais a ser medido; t = valor de t de student tabelado; S_x^2 = variância; $E = (LE * \bar{x})$, LE = limite do erro de amostragem admitido (20%), \bar{x} = média aritmética dos valores observados.

Segundo Meunier, Silva e Ferreira (2001) a representatividade de uma amostra é influenciada pelo número de unidades amostrais utilizadas e pelo processo de seleção de unidades de amostras, nesta perspectiva, o tamanho da amostra é estabelecido em função de:

Do erro de amostragem admissível, que apesar do IBGE (2012) indicar que este seja inferior a 10%, em Santa Catarina se recomenda aplicar 20% para estudos no bioma Mata Atlântica (CPRH, 2006). No entanto quanto mais acurada for a estimativa, menor será o erro. Meunier, Silva e Ferreira (2001).

Com isso, para o estudo foi considerado um erro amostral de 20% para remanescente florestal de *Araucaria angustifolia*.

2.4.3 Obtenção das variáveis dendrométricas e morfométricas de *Araucaria angustifolia* pelo método convencional

Em cada árvore, foram mensurados a circunferência à altura do peito (cap) com fita métrica em centímetros, a 1,30 m do solo e posteriormente determinou-se o diâmetro à altura do peito (d) em centímetros, a altura total (h) medida em metros, e a altura de inserção da copa (hic) em metros com hipsômetro TruPulse 200 e quatro raios de copa a partir do eixo central da árvore ao nível do d, nas direções cardinais (Norte, Sul, Leste e Oeste).

Com as medições realizadas foram calculados os índices morfométricos de diâmetro de copa em metros (dc); área de superfície da copa (asc) em metros quadrados; comprimento de copa (cc) em metros; proporção de copa (pc%); formal de copa (fc); volume de copa (vc) em metros cúbicos; índice de saliência (IS); índice de abrangência (IA); grau de esbeltez (hd) e número de árvores por hectare. Abaixo segue descrito as equações utilizadas.

2.4.3.1 Variáveis dendrométricas

- a) Diâmetro a altura do peito a 1,30 m do solo (d): Foi mensurada a circunferência à altura do peito (cap) em cm e posterior calculado o diâmetro à altura do peito (d) em cm, conforme a equação 2:

$$d = \frac{cap}{\pi} \quad (2)$$

Em que: d: diâmetro à altura do peito em cm; cap: circunferência à altura do peito em cm; π : 3,1416.

- b) Área transversal individual (g): Área transversal individual, obtida conforme a equação 3:

$$g = \frac{(\pi * d^2)}{40.000} \quad (3)$$

Em que: g: área transversal individual em m²; d: diâmetro a altura do peito em cm; π : 3,1416.

2.4.3.2 Variáveis morfométricas e de copa

- c) Raio de copa médio (\bar{rc}): Foi calculado pela média aritmética de quatro raios de copa em metros, seguindo aos pontos cardeais Norte (N), Oeste (O), Sul (S) e Leste (L), conforme a equação 4:

$$\bar{rc} = \sum_{i=1}^{n=4} rc / 4 \quad (4)$$

Em que: \bar{rc} = raio de copa médio em m; rc : raio de copa em m.

- d) Diâmetro de copa (dc): Determinado em metros, através da duplicação do raio de copa médio obtido com os quatro raios medidos a campo, conforme equação 5:

$$dc = 2 \cdot \bar{rc} \quad (5)$$

Em que: dc: diâmetro de copa em m; \bar{rc} : raio de copa médio em m.

- e) Área de superfície de copa (asc): Calculada em metros quadrados, descrita por Burkhart; Tomé (2012), conforme equação 6:

$$asc = \frac{\pi \cdot dc}{2} * \sqrt{cc^2} + \frac{(dc)^2}{2} \quad (6)$$

Em que: asc: área de superfície de copa em m²; dc: diâmetro de copa em m; cc: comprimento de copa em m; vc: volume de copa em m³.

- f) Comprimento de copa (cc): Refere-se à parte compreendida entre a base e o ápice da copa de uma árvore. Determinado pela diferença entre a altura total e a altura de inserção da copa em metros, conforme equação 7:

$$cc = h - hic \quad (7)$$

Em que: cc: comprimento de copa em m; h: altura total da árvore em m; hic: altura de inserção da copa em m.

- g) Proporção da copa (pc): Indica a fração (%) que a copa abrange em relação à árvore. Determinada em porcentagem por meio da razão entre o comprimento da copa e a altura total da árvore, conforme equação 8:

$$pc (\%) = \frac{cc}{h} * 100 \quad (8)$$

Em que: pc: proporção de copa em %; cc: comprimento da copa em m; h: altura total da árvore em m.

- h) Formal de copa (fc): Determinado por meio da razão entre o diâmetro de copa e o comprimento de copa, conforme equação 9:

$$fc = \frac{dc}{cc} \quad (9)$$

Em que: fc: formal de copa; dc: diâmetro de copa em m; cc: comprimento da copa em m.

- i) Volume de copa (vc): Calculado em metros cúbicos, descrita por Burkhardt; Tomé (2012) conforme equação 10:

$$vc = \frac{\pi * dc * cc}{12} \quad (10)$$

Em que: vc: volume de copa em m³; dc: diâmetro de copa em m; cc: comprimento de copa em m; π : 3,1416.

- j) Índice de Saliência (IS): Indica quantas vezes o diâmetro de copa é maior que o diâmetro à altura do peito. Determinado por meio da razão entre o diâmetro de copa e o diâmetro à altura do peito, conforme equação 11:

$$IS = \frac{dc}{d} * 100 \quad (11)$$

Em que: IS: índice de saliência; dc: diâmetro de copa em m; d: diâmetro à altura do peito em m.

- k) Índice de Abrangência (IA): Determinado por meio da razão entre o diâmetro de copa e a altura total da árvore, conforme equação 12:

$$IA = \frac{dc}{h} \quad (12)$$

Em que: IA: índice de abrangência; dc: diâmetro de copa em m; h: altura total da árvore em m.

- l) Grau de Esbeltez (hd): Determinado por meio da razão entre a altura total e o diâmetro à altura do peito, conforme equação 13:

$$hd = \frac{h}{d} * 100 \quad (13)$$

Em que: hd: grau de esbeltez; h: altura total da árvore em m; d: diâmetro à altura do peito em m.

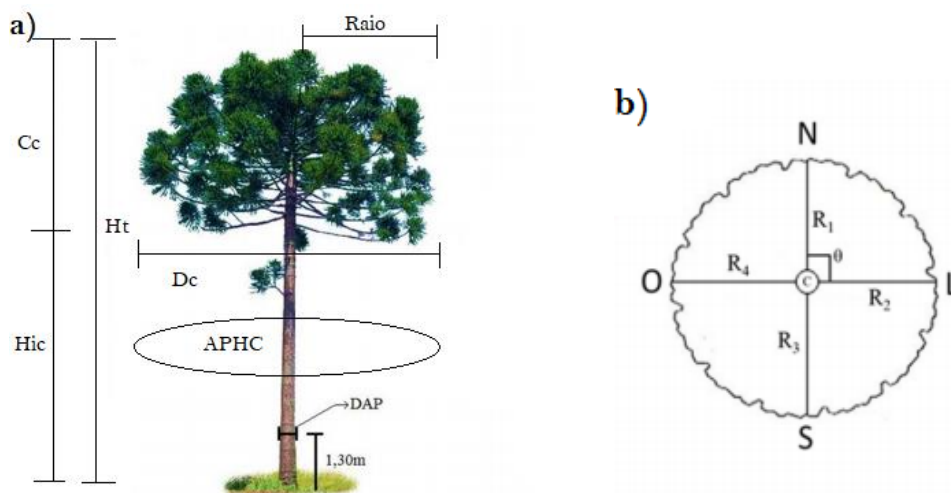
m) Número de árvores por hectare (N/ha): Determinado por meio da razão entre a área de um hectare e área de superfície de copa de cada árvore, conforme a equação 14:

$$N/ha = 10.000/asc \quad (14)$$

Em que: N/ha: número de árvores por hectare; asc: área de superfície da copa em m².

Na Figura 4 contém a representação da árvore de araucária e a forma de obtenção das medidas métricas das suas características dimensionais realizadas pelo método convencional em campo.

Figura 4 - Representação da árvore araucária e suas características dimensionais como altura total e de inserção da copa, comprimento de copa, diâmetro de copa e outros parâmetros como a área de projeção horizontal da copa (APHC) ou também chamada de área de superfície da copa (asc) na Figura 4(a). Representação do diagrama da medição da copa. R é o raio de copa; C é o centroide da árvore que corresponde ao DAP; θ é o ângulo fixo entre os raios, que neste caso é 90° como mostra a Figura 4(b).



Fonte: Modelo adaptado de Pereira et al., (2014).

2.4.4 Levantamento dos dados de copa com uso de geotecnologia (VANT)

Para o levantamento dos dados de copa das araucárias foi utilizado um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), da marca DJI modelo *Phantom 4 Pro V2.0* (Figura 5A), do qual as características estão descritas na Tabela 1, com as respectivas especificações técnicas do equipamento. Neste possui acoplada uma câmera com um sensor CMOS de 1” e com resolução espacial de 20 *Mpixels* (Figura 5B), sensor vermelho, verde e azul (RGB) com obturador mecânico, distância focal de 8,8 mm e foco automático a 1 metro.

Figura 5 - Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), marca DJI modelo *Phantom 4 Pro V2.0*.



Fonte: DJI, 2023.

Tabela 1 - Descrição das especificações técnicas do equipamento e características de voo do *Phantom 4 Pro V2.0*.

Especificações da aeronave/sensor		Características do voo	
Peso (bateria e hélices)	1.375 g	Ano de execução	2022 e 2023
Dimensão diagonal (incluindo hélices)	350 mm	Altura	60, 80 e 120 m
Duração máxima de voo	Aprox. 30 min	Ângulo câmera	70°
Resistência máxima a velocidade do vento	10 m/s	Sobreposição Frontal	80%
Sistemas de posicionamento global	GPS/GLONASS	Sobreposição Lateral	70%
Câmera Sensor	CMOS 1” 20 <i>Mpixels</i>	Velocidade	5,9 m/s

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

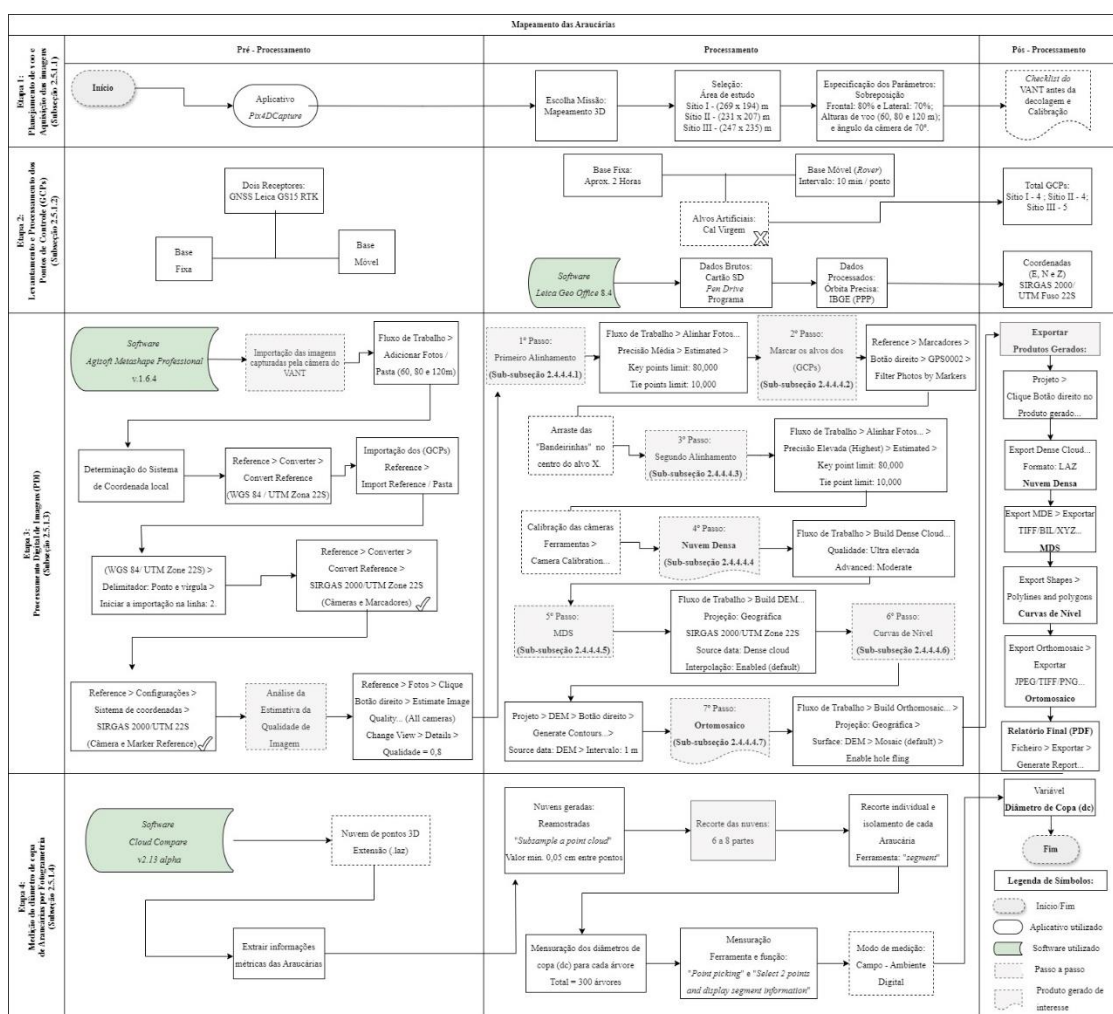
A aquisição das imagens procedeu-se com o sobrevoo programado para as três diferentes alturas de 60, 80 e 120 metros e com velocidade de 5,9 m/s para os três sítios florestais estudados e distintas alturas. A captura das imagens digitais se obteve na configuração 3D, ou seja, com representação visual tridimensional das árvores e do relevo, criada a partir dos dados capturados pelo VANT. A criação dessas imagens 3D envolve a captação de várias imagens aéreas sobrepostas da área de estudo a partir de diferentes ângulos e alturas. Neste estudo, o ângulo da câmera adotado foi de 70°, com sobreposição frontal de 80% e sobreposição lateral de 70% para os três sítios florestais.

2.4.4.1 Mapeamento das Araucárias

O estudo para o mapeamento das araucárias nos três sítios florestais, foi dividido em quatro etapas Quadro 1: (1) Planejamento de voo e aquisição das imagens - Subseção 2.4.4.2, (2) Levantamento e processamento dos pontos de controle, GCPs - Subseção 2.4.4.3, (3) Processamento digital de imagens PDI - Subseção 2.4.4.4 e (4) Medição do diâmetro de copa de araucárias por fotogrametria no *Software Cloud Compare* v2.13. alpha - Subseção 2.4.4.5.

O fluxograma do Quadro 1, indica as etapas e procedimentos metodológicos das atividades realizadas, desde o planejamento de voo até a medição das araucárias no *software*, e detalhados nas subseções seguintes.

Quadro 1 - Fluxo de trabalho da metodologia do mapeamento das Araucárias.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

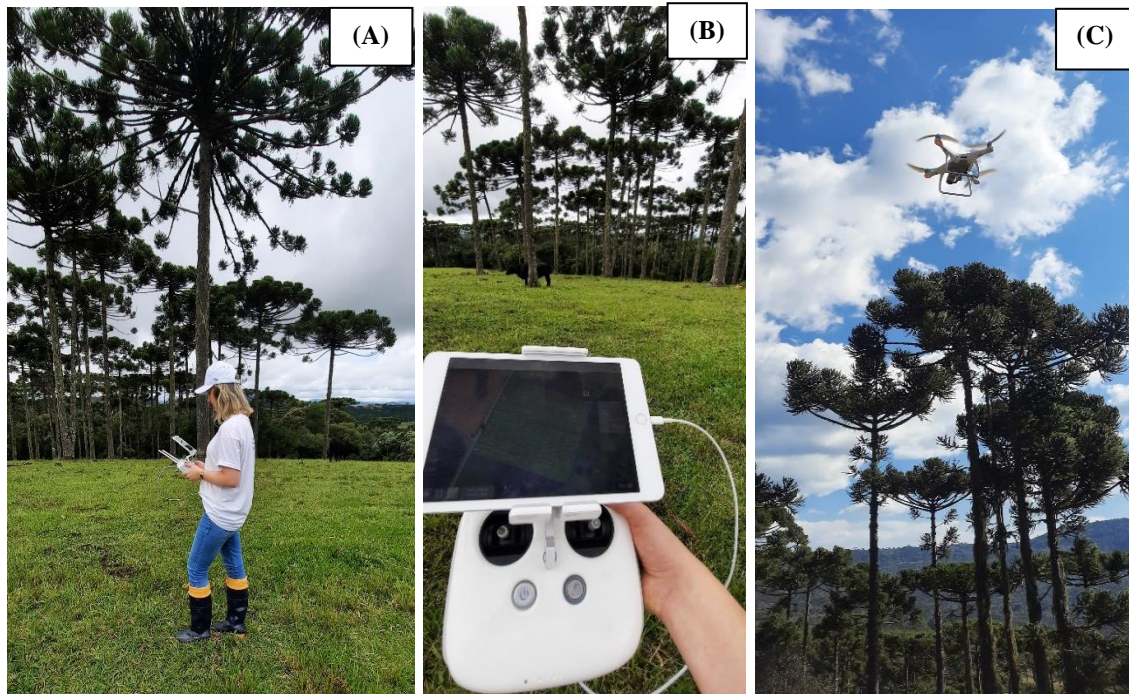
2.4.4.2 Planejamento de Voo e Aquisição das Imagens

O planejamento de voo foi realizado em laboratório por meio do aplicativo *Pix4Dcapture*. O aplicativo gratuito *Pix4Dcapture* foi utilizado para o planejamento, execução e acompanhamento dos voos. As missões de voo foram planejadas e criadas no laboratório visto que este necessita de conexão com a internet. O planejamento da missão se deu em 3 etapas principais:

1. Escolha do tipo de missão, o *Pix4Dcapture* possui 5 modos de mapeamento, podendo fazer voos de estruturas 3D, voo livre e mapeamento aéreo, neste estudo, foi realizado o mapeamento 3D com linhas cruzadas;
2. Seleção da área de interesse, a área foi delimitada de modo que abrangesse grande número de araucárias e com uma margem de segurança, visando evitar distorções nas bordas das imagens;
3. Especificação dos parâmetros da missão, como a sobreposição adotada, altura de voo, e ângulo da câmera. Foi realizado o *Checklist* do Drone, ou seja, a lista de verificação dos parâmetros de decolagem antes de iniciar a missão, assim como também a sua calibração.

O Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) na Figura 6, foi controlado por um operador para acompanhamento dos voos (Figura 6A), com auxílio de um Tablet *iPad* mini (5ª geração) com capacidade de 64 GB, da marca *Apple*, com sistema operacional *iPadOS* (Figura 6B) para a aquisição das imagens (Figura 6C).

Figura 6 - Aquisição das imagens obtidas pelo VANT. (A) Voo controlado por operador no Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT); (B) Voo controlado com auxílio de um Tablet iPad mini (5ª geração) com capacidade de 64 GB da marca Apple; (C) VANT sobrevoando a área.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

A escolha do GSD (*Ground Sample Distance*) foi definida com o intuito de testar três resoluções espaciais (cm/pixel) diferentes, sendo estes: pequeno, médio e alto. Sendo assim, resultou-se nas alturas de 60, 80 e 120 metros, seguindo as normas e diretrizes da Agência Nacional de Aviação Civil - ANAC. O GSD é a representação do pixel da imagem em unidades de terreno (geralmente em cm) e está associado à qualidade final do processamento por meio do nível de detalhamento do levantamento aéreo. O valor dado pelo GSD é inversamente proporcional ao nível de detalhamento, ou seja, quanto maior o GSD menor é o nível de detalhamento e vice-versa Sá, et al., (2021).

A sobreposição de imagens é fundamental para a geração do ortomosaico (mapa gerado a partir da união das fotografias capturadas com o drone), através da sobreposição é realizada a conexão das fotos sequenciais capturadas, as fotos sequenciais têm pontos em comum com a foto anterior e com a próxima (sobreposição), permitindo a triangulação dos dados em cada ponto. Em levantamos com drones, a sobreposição usual é de 80% frontal e a lateral de 60% fornece uma boa qualidade (Bergens, 2018). Neste estudo, foi adotada a taxa de sobreposição frontal de 80% e a lateral de 70%.

Dandois, Olano e Ellis (2015), Frey et al., (2018), Torres-Sánchez et al., (2018) e Chaudhry, Ahmad e Gulzar (2020) estudaram a influência da sobreposição de imagens no mapeamento de áreas de vegetação, na qualidade do produto final. É necessário um grande número de imagens em diferentes pontos de vista para a reconstrução da área, porém esta necessidade pode ser um problema, uma vez que a elevada sobreposição de imagens resulta num grande tempo de processamento para gerar os produtos digitais, além disso quando o levantamento é efetuado com uma taxa de sobreposição mais baixa, embora o tempo de processamento diminua drasticamente, o produto gerado pode resultar em oclusões Oliveira et al., (2018) ou lacunas (Fraser e Congalton, 2018) sobre a área.

A data ideal para realização dos voos ficou na dependência das condições climáticas, uma vez que o VANT não pode realizar voo diante de chuva e de velocidade do vento maior que 10m/s. As imagens foram obtidas em duas datas para os três sítios florestais estudados, a primeira em 26 de agosto de 2022 nos sítios I e II (URB) as condições climáticas eram favoráveis, marcavam presença de sol e sem nuvens, foram planeadas total de 6 missões de voo (3 para cada área), tendo em vista o tempo máximo de voo por bateria (20 minutos), e a segunda em 17 de março de 2023 no sítio III (BRT), as condições climáticas no primeiro momento marcava nublado e minutos depois houve a presença de sol e poucas nuvens, foram planeadas 3 missões de voo, as imagens foram tomadas em diferentes horários de aquisição para cada altura de sobrevoo de 60, 80 e 120 m. Os voos ocorreram sem anormalidades durante toda sua extensão. Os tempos de aquisição das imagens para cada sítio e altura de voo são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Informação de data, e horários de início e fim das aquisições das imagens para os três sítios florestais e diferentes alturas de 60, 80 e 120 m.

Sítio	Altura (m)	Data	Hora de início	Hora de término
I (URB)	60	26/08/2022	12h10	12h27
	80	26/08/2022	12h32	12h43
	120	26/08/2022	12h46	12h53
II (URB)	60	26/08/2022	14h47	15h04
	80	26/08/2022	15h08	15h21
	120	26/08/2022	15h25	15h38
III (BRT)	60	17/03/2023	11h51	12h07
	80	17/03/2023	11h35	11h46
	120	17/03/2023	11h23	11:30

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Conforme mostra na Tabela 2 acima o tempo para aquisição de imagens variaram entre 12h10 e 12h53 no sítio I, entre 14h47 e 15h38 no sítio II, e entre 11h23 e 12h07 no

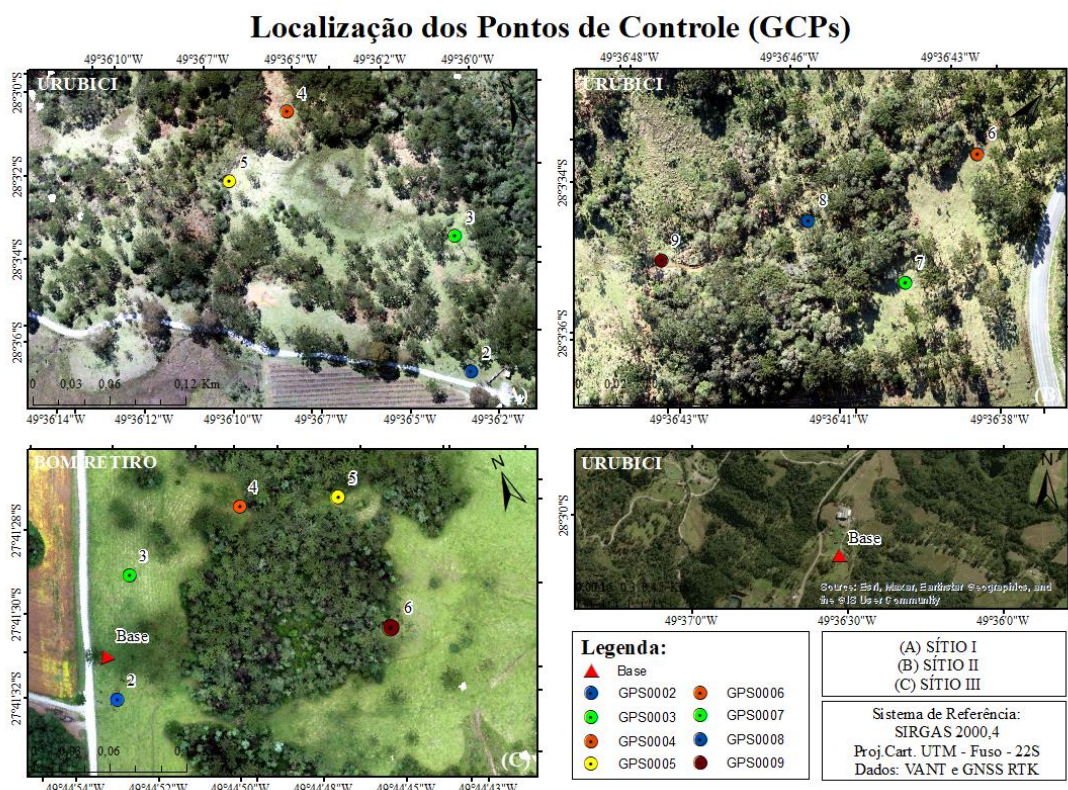
sítio III. O tempo de variação para aquisição das imagens entre as alturas, se deu em função da troca de baterias do VANT, em média levou 5 minutos para troca de baterias. As imagens obtidas das missões ficam armazenadas no cartão SD de memória do VANT no qual são posteriormente descarregadas em um computador.

2.4.4.3 Levantamento e processamento dos Pontos de Controle (GCPs)

Os pontos de controle são alvos físicos colocados no solo, realizados no campo, empregados em locais preferencialmente de fácil acesso que serão identificáveis nas imagens aéreas obtidas pelo VANT, os pontos devem ser dispostos em lugares em que o terreno ofereça nitidez segundo Coelho e Brito (2007), neste estudo foram distribuídos nas extremidades das áreas e no centro, quando este não apresentava impedimentos de visualização como a própria vegetação, afim de abranger toda a área do mapeamento e assim identificáveis nas imagens, no processo de pós processamento. Martínez-Carricondo et al., (2018) concluíram que maior precisão pode ser alcançada usando menos pontos de controle se eles forem colocados nas bordas e no centro da área. Um problema comumente encontrado pelo VANT é a necessidade de se utilizar pontos de controle no terreno (*Ground Control Points* – GCP) para corrigir erros planimétricos e altimétricos decorrentes da baixa precisão e acurácia cartográfica dos módulos GNSS (Sistemas Globais de Navegação por Satélite) embarcados no VANT (Boa Morte, Caio de Lima et al., 2020).

Os pontos de controle servem como âncoras para georreferenciar as imagens captadas pelo VANT. Ao incluir as coordenadas dos *Ground Control Points* no processo de pós processamento das imagens, é possível ajustar a posição e a orientação das imagens para que elas se alinhem corretamente com um sistema de coordenadas de referência. Foram levantados 4 pontos no sítio I (URB), 4 pontos no sítio II (URB) e 5 pontos de controle no sítio III (BRT) como mostra na Figura 7.

Figura 7 - Localização dos pontos de controle (GCPs) e das bases nos ortomosaicos gerados nos três sítios florestais estudados (A) URB, (B) URB e (C) BRT.



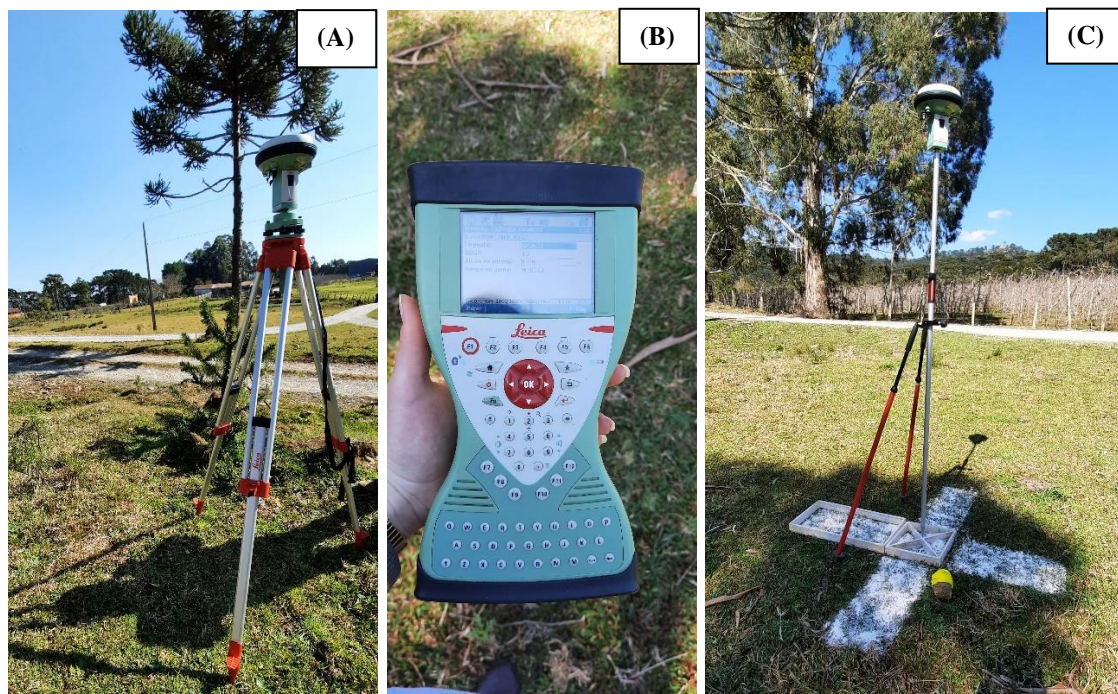
Fonte: Elaborada pela autora (2023).

O levantamento dos pontos de controle para os sítios I e II foram realizados no mesmo dia 26 de agosto de 2022, entre 10:30 horas e 11:50 horas no sítio I, e entre 13:30 horas e 14:40 horas no sítio II, sendo utilizado o receptor de base fixa para os dois locais, devido as áreas serem próximas. No dia 17 de março de 2023 foram levantados os pontos de controle no sítio III (BRT), entre 09:50 horas e 11:00 horas.

Neste estudo o método de posicionamento utilizado foi o RTK (*Real Time Kinematic*) ou Posicionamento Cinemático em Tempo Real, no modo Relativo Estático, para se obter as coordenadas dos alvos com alta precisão foram utilizados dois receptores GNSS da marca Leica Viva, GNSS Leica GS15 RTK, em que um foi utilizado como estação base fixa, e outro como unidade móvel para adquirir as coordenadas dos centros dos alvos. O uso de receptores GNSS RTK é bastante eficaz nessa tarefa devido à alta qualidade posicional e agilidade na aquisição de dados (Pedreira, 2017). A Base fixa foi instalada dentro da propriedade em um ponto elevado do terreno, sem barreiras a fim de evitar interferências eletromagnéticas (Figura 8A) para melhor captação dos dados, adquirindo coordenadas por aproximadamente 2 horas antes de iniciar a coleta dos pontos,

no sítio I, sendo este o primeiro a ser coletado os pontos de controle. O receptor de unidade móvel denominado *Rover* foi utilizado com intervalo de armazenamento de dados em cada ponto de 10 minutos (Figura 8B). Foi realizado uma pré-sinalização no terreno, no qual se refere a marcação podendo ser alvos naturais ou artificiais, que deve ser visualizada nas fotografias aéreas do mapeamento. Para este estudo os pontos de controle foram alvos artificiais, no qual foram demarcados com cal virgem comum para todas as três áreas, com auxílio de uma luva de pano no momento da aplicação, em um molde de madeira de 1m x 1m em formato de “X” como mostra na Figura 8 (C).

Figura 8 - Levantamento dos pontos de controle em campo. (A) Base receptora de sinais GNSS Leica GS15 RTK; (B) Receptor móvel de sinais (Rover); (C) Ponto alvo artificial.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Os pontos de controle após serem coletados no campo, foram processados no Software *Leica Geo Office* 8.4. Para isso os dados brutos adquiridos pelos receptores foram descarregados do cartão de memória para um *pen drive* e posterior carregados no programa. Em seguida, os dados obtidos pelo rastreador na base fixa foram processados com os dados de órbita precisa do serviço online IBGE PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), para o pós-processamento dos dados GNSS, no qual possibilita a obtenção de coordenadas precisas referenciadas ao SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), através de um processamento preciso. O sistema de referência

utilizado foi o SIRGAS 2000 – UTM Fuso 22S. O processamento dos dados referentes aos demais pontos foram processados em relação aos da estação base fixa do GS15. A altura da antena da Estação base é de 1,32 metros e o ângulo da máscara de elevação de 10° na sua antena, para diminuir erro de multicaminhamento e a altura da antena do receptor móvel para todos os alvos foi de 1,80 m.

2.4.4.4 Processamento Digital de Imagens (PDI)

No processamento digital das imagens capturadas foi utilizado o *software Agisoft Metashape Professional v.1.6.4*. Esse foi desenvolvido pela empresa russa *Agisoft LLC* para criar conteúdo tridimensional a partir de imagens estáticas segundo *Agisoft LLC* (2019). O computador utilizado nesse estudo possui o sistema operacional Linux 64 bit, memória RAM de 62.89 GB, CPU (*Central Processing Unit*) AMD Ryzen 9 3900X 12 - Core Processor e GPU (*Graphics Processing Unit*) GeForce RTX 2080 Ti. Foi realizado o processamento digital das imagens para os três sítios florestais de estudo, assim como para as três alturas de 60, 80 e 120 metros. As imagens do VANT foram transferidas do cartão de memória para o computador, organizadas em pastas e nomeadas com o local e altura de voo correspondentes, conforme o horário da captura.

O processo no software começa com a importação de imagens do VANT, em formato .JPG, capturadas pela câmera, sendo cada altura processada separadamente. O sistema de coordenadas local é definido como WGS 84/UTM Zone 22S, e os pontos de controle (GCPs) são importados com coordenadas WGS 84/UTM Zone 22S. Em seguida, as coordenadas das câmeras e dos marcadores são convertidas para o sistema SIRGAS 2000/UTM Zone 22S. A qualidade de cada imagem é estimada com base na nitidez da parte mais focada da imagem, seguindo critérios do manual do *Agisoft* (2019). Imagens com qualidade inferior a 0,5 unidades são recomendadas para exclusão, neste estudo, todas as imagens apresentaram valores estimados entre 0,8 e 0,9 unidades. As sub-seções abaixo descreve os passos a passo do processamento.

2.4.4.4.1 1º Passo: Envolve o 1º alinhamento das fotos abrangendo a triangulação aérea. Nesta fase, o software busca pontos e objetos comuns nas imagens, combinando-os em pontos de ligação, resultando na formação da nuvem de "*Tie points*" ou pontos fotogramétricos. Essa nuvem materializa o sistema de coordenadas do terreno (Cassemiro

e Pinto, 2014). Os resultados desse alinhamento inicial incluem uma nuvem de pontos esparsos e informações sobre as posições das câmeras.

2.4.4.4.2 2º Passo: Marcar os alvos dos - GCPs. Envolve a marcação dos alvos, pontos de controle, consistindo em posicionar o marcador no centro do alvo em forma de "X". Ao posicionar o marcador no centro do alvo, inicialmente branco, ele muda para verde, indicando o sucesso da operação. Esses pontos correlacionam o sistema de coordenadas da imagem com o sistema de coordenadas do terreno, sendo utilizados no pós-processamento das imagens para aprimorar a precisão e acurácia posicional do produto final.

2.4.4.4.3 3º Passo: No segundo alinhamento das imagens, após a marcação dos alvos, é necessário realizar outro alinhamento. Em seguida, o software realiza automaticamente a autocalibração da câmera para corrigir erros sistemáticos nas imagens geradas. O objetivo dessas etapas é gerar produtos fotogramétricos, como Nuvem densa, Modelo Digital de Elevação (DEM), Curvas de Nível e Ortomosaico. No contexto deste estudo, a Nuvem densa e o Ortomosaico são particularmente relevantes.

2.4.4.4.4 4º Passo: Nuvem Densa - *Dense Cloud*: É construída com base na posição relativa de cada fotografia, para preencher espaços vazios e melhor representar a área mapeada. Essa nuvem de pontos serve como base para o Modelo Digital de Elevação (DEM). A medição do diâmetro da copa das araucárias é realizada a partir desta nuvem de pontos. Os dados foram exportados em formato (.laz) compatível com o software Cloud Compare v2.13 alpha para posterior medições.

2.4.4.4.5 5º Passo: Modelo Digital de Elevação - Superfície: Foi gerado com base nos dados de nuvem de pontos densos (*Dense Cloud*), apresentando tanto o terreno quanto todos os objetos que estão acima do solo, como as árvores, na projeção geográfica, o produto foi exportado em formato raster (.TIFF).

2.4.4.4.6 6º Passo: Curvas de nível: A partir do modelo digital de elevação (DEM), foi gerada as curvas de nível do terreno com intervalo de 1 metro, foi exportada em formato de arquivo *Shapefile* (.shp).

2.4.4.4.7 7º Passo: Ortomosaico. Este é o resultado final obtido a partir do modelo digital de elevação (DEM) na projeção geográfica. Utilizando o ortomosaico, foi viável verificar a posição de cada árvore mensurada, facilitando medições subsequentes. O ortomosaico foi exportado no formato raster (.TIFF).

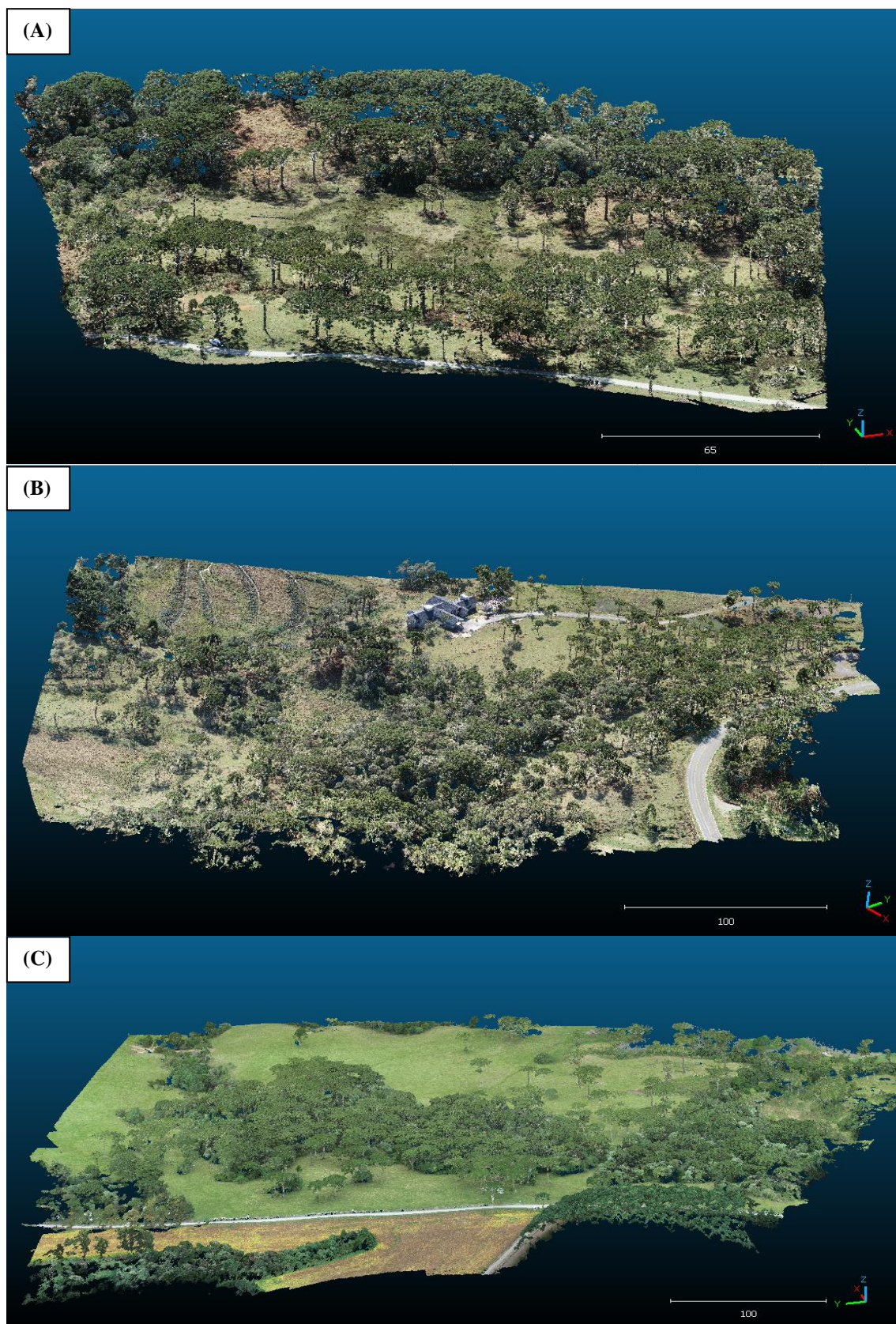
Por último, o *software* emite um relatório com os detalhes dos produtos gerados, esse relatório consta informações sobre a câmera utilizada, os produtos gerados e a resolução desses, e é dado através do *Ground Sample Distance*, os erros planimétricos e altimétricos dos pontos de controle, e os parâmetros de processamentos.

2.4.4.5 Medição do diâmetro de copa de Araucárias por Fotogrametria

Após a geração dos produtos finais de todas as áreas imageadas, o produto de maior interesse para a medição do diâmetro de copa foi a nuvem densa de pontos. Para a medição dos diâmetros de copa foi utilizado o *software Cloud Compare* v2.13 alpha.

A nuvem de pontos em formato 3D (Figura 9 A, B e C) utilizada para realizar as medidas foi exportada na extensão (.laz) compatível com o *software* utilizado *Cloud Compare* v2.13 alpha. Com a geração das nuvens de pontos, foi possível extrair informações métricas das árvores. As nuvens geradas de cada área de estudo e cada altura foram reamostradas em subamostras com a função: *Subsample a point cloud*, com valor mínimo de espaço entre pontos de 0,05 cm. Essa etapa visou diminuir a densidade de pontos da área para as realizar as mensurações, sem prejudicar a qualidade do produto. Em seguida, foram realizados recortes das nuvens de pontos de 6 a 8 partes, dependendo do tamanho da área, afim de facilitar a localização de cada árvore mensurada a campo e a manipulação das árvores dentro do *software* para posterior aferição do diâmetro de copa na imagem.

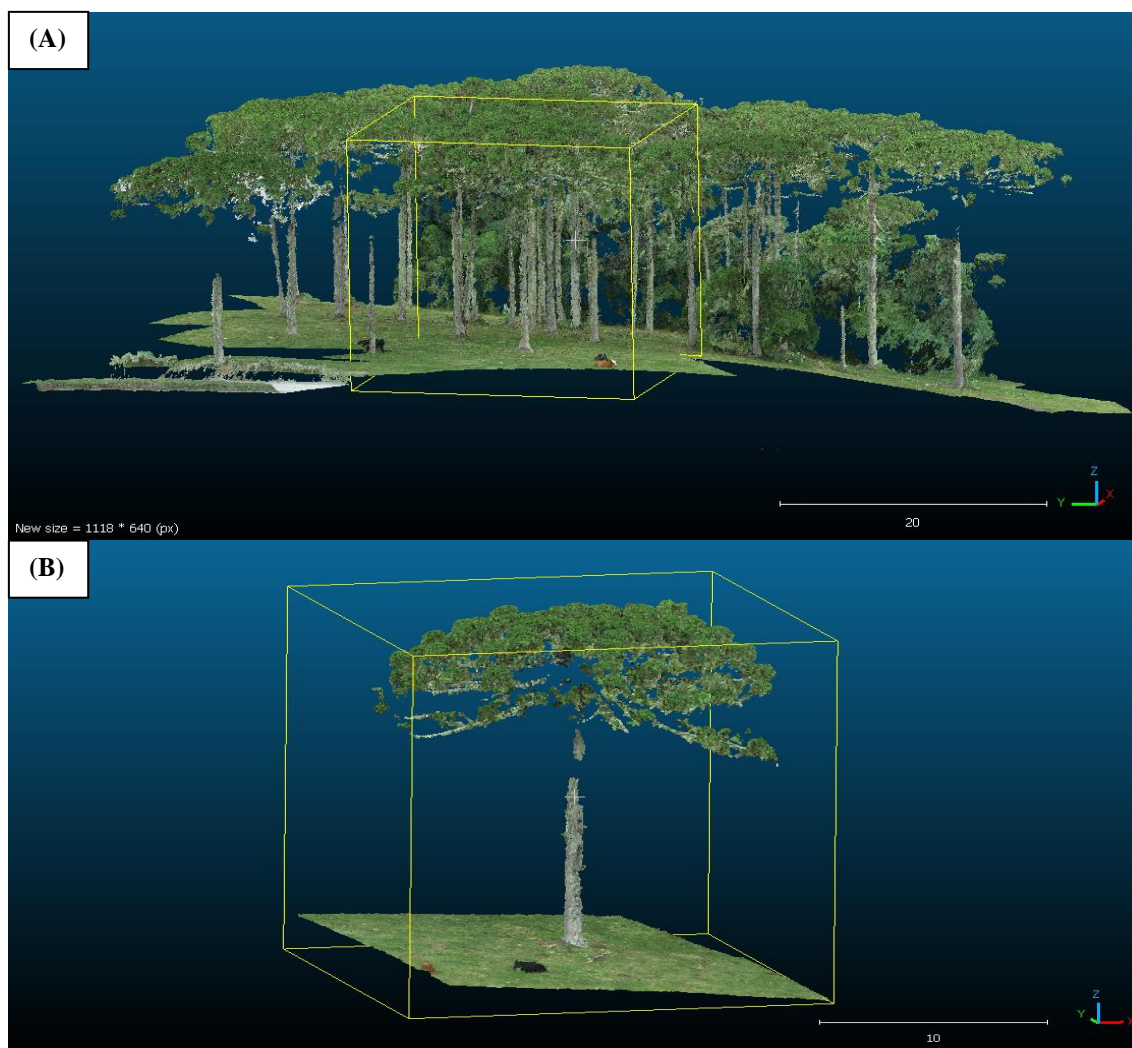
Figura 9 - Imagem 3D gerada pela nuvem de pontos no Software Cloud Compare v2.13 alpha, sendo sítio I – URB (A), sítio II – URB (B) e sítio III BRT (C).



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Ao carregar a nuvem de pontos no programa, foi realizado o recorte individual com a ferramenta “*segment*” e isolamento de cada árvore de estudo, ou seja, cada árvore medida em campo para consecutiva medição na imagem (Figura 10 A e B).

Figura 10 - Procedimento para realização das mensurações do diâmetro de copa. Recorte da araucária correspondente à árvore medida em campo (A); Isolamento da araucária de interesse para mensuração da variável diâmetro de copa (B).



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Após o recorte e isolamento das árvores foram mensurados os diâmetros de copa para todas as araucárias de cada sítio estudado e cada altura de sobrevoo, totalizando 300 árvores medidas nas imagens em um período de 60 dias. As mensurações do diâmetro de copa (dc) foram executadas com os recursos de mensuração de distância dada em metros (m) do próprio *software* com a ferramenta “*Point picking*” e posterior função: “*Select 2 points and display segment information*”. O modo de medição da variável diâmetro de

copa foi semelhante ao realizado em campo, porém em ambiente digital com a seguinte fórmula adaptada do campo (equação 15.1 / 15.2, 16 e 17):

$$R_1 + R_3 = d_c (N>S) \text{ e } R_5 + R_7 = d_c (NE>SO) \quad (15.1)$$

$$R_2 + R_4 = d_c (L>O) \text{ e } R_6 + R_8 = d_c (NO>SE) \quad (15.2)$$

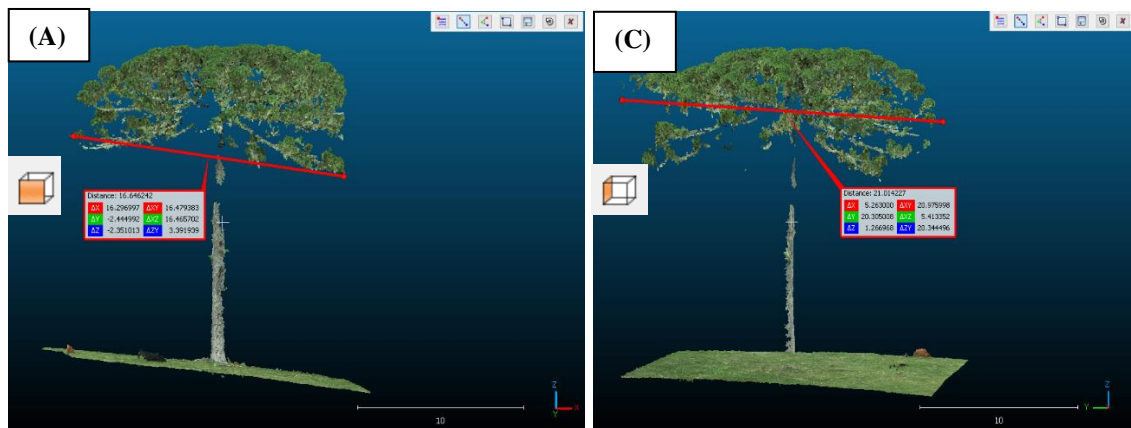
$$\bar{rc}_{(m)} = \frac{d_c (N>S) + d_c (NE>SO) + d_c (L>O) + d_c (NO>SE)}{8} \quad (16)$$

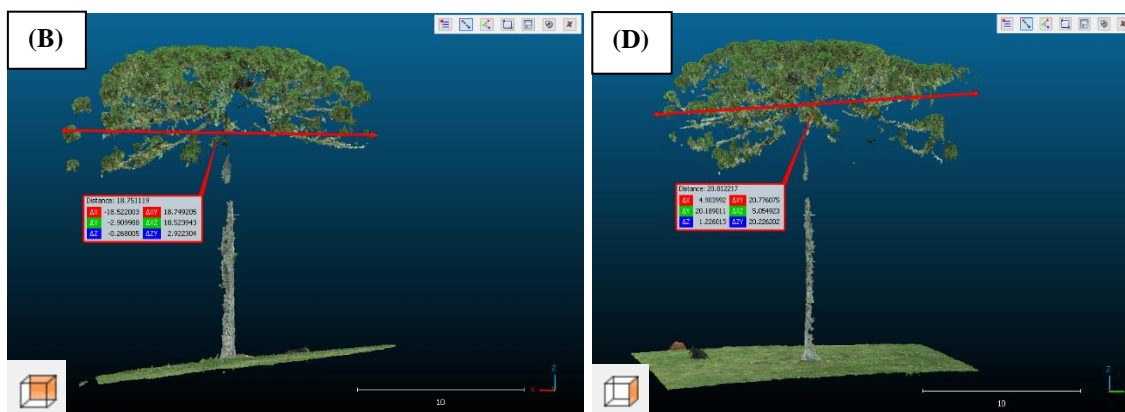
$$d_c (m) = 2 \cdot \bar{rc} \quad (17)$$

Em que: R_1 é o raio norte; R_2 é o raio leste; R_3 é o raio sul; R_4 é o raio oeste; R_5 é o raio nordeste; R_6 é o raio noroeste; R_7 é o raio sudoeste; R_8 é o raio sudeste; \bar{rc} é o raio de copa médio em metros; d_c é o diâmetro de copa em metros.

Para cada árvore foram obtidos quatro perfis de copa em um ângulo de 90°, sendo considerados 8 raios de copa aos pontos cardeais (N, NE, L, SE, S, SO, O e NO) pelo fato da espécie possuir formato de copa irregular, assume-se para o presente estudo de modo independente, em razão de que seus raios de copa são medidos em diferentes alturas para os perfis distintos (Figura 11) sendo em quatro sentidos Leste-Oeste e Noroeste-Sudeste (Figura 11 A e B) e Norte-Sul e Nordeste-Sudoeste (Figura 11 C e D).

Figura 11 - Representação da árvore de araucária individualizada em nuvem de pontos. Perfil do diâmetro de copa das araucárias com as mensurações em quatro sentidos: Leste-Oeste (A) Noroeste-Sudeste (B) e Norte-Sul (C) e Nordeste-Sudoeste (D).





Fonte: Elaborada pela autora (2023).

2.4.5 Dendrocronologia- Incremento periódico anual em diâmetro

Para obtenção dos rolos de incremento de cada árvore se utilizou o trado de Presler, com 30 cm e 5,15 mm de diâmetro do núcleo. De cada árvore foram retirados dois rolos de incremento de forma perpendicular, na altura do d, totalizando 200 amostras das três áreas de estudo (Assmann, 1970). Após a retirada dos rolos foi colocada cera de abelha nos orifícios abertos nas árvores, a fim de evitar possíveis danos causados por ataque de pragas.

Os rolos de incremento foram retirados em abril, no final da época de crescimento. No campo os rolos de incremento foram fixados em suportes de madeira (porta baguetas) presos com fita crepe nas extremidades e no centro para evitar o empenamento durante a secagem e identificados com o número da árvore correspondente. A secagem foi realizada ao ar livre por 7 dias (uma semana). Em seguida, os rolos de incremento foram colados com cola de madeira própria resistente a umidade, na orientação dos raios radiais. Posteriormente no laboratório de Tecnologia da Madeira (TECMAD), as amostras foram lixadas com uma lixadeira elétrica com dimensões de 120 x 7200 mm de comprimento e polidas utilizando-se lixa em rolo com gramatura de 220 para melhor visualização dos anéis de crescimento e após demarcados com lápis os anéis para facilitar a visualização na máquina de medição LINTAB 6.0.

2.4.5.1 Análise dendrocronológica do crescimento

A marcação dos anéis de crescimento (Figura 12A) e medição da largura dos mesmos foi realizada com o auxílio de um microscópio estereoscópio, utilizando uma mesa de mensuração com precisão de 0,01mm (LINTAB 6.0 – *Frank Rinn Distributors*, Alemanha), acoplado ao computador, utilizando o *software Time Series Analysis Program- TSAP-Win Trial 4.87* com o procedimento de datação cruzada - *cross-dating* (Figura 12B).

Figura 12 - Imagem das amostras parciais do tronco de *A. angustifolia* (A) e a mesa de mensuração utilizada na marcação e medição dos anéis de crescimento com a visualização dos anéis com demarcação à lápis (B) para árvores de *Araucaria angustifolia*.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A datação cruzada dos anéis de crescimento em diâmetro medidos de cada árvore foi exportada em arquivos de texto para o *Microsoft Office Excel*® 2016 para realizar análises sobre a sincronia das duas séries de crescimento de cada árvore e análise visual dos gráficos, onde relacionam a largura do anel com o ano correspondente.

Desta forma, foi calculada a média aritmética entre as larguras dos anéis de crescimento dos dois rolos de incremento amostrados para cada unidade amostral,

obtendo o valor do incremento absoluto em diâmetro. Em seguida, foi calculado para cada árvore o incremento periódico anual em diâmetro ($IPAd_{10}$) para um período de 10 anos, ou seja, do ano de 2012 a 2022, com a equação 18:

$$IPAd_{10} = (d - d_{-t})/t \quad (18)$$

Em que: $IPAd$ = incremento periódico anual em diâmetro ($cm.ano^{-1}$); d = diâmetro à altura do peito obtida no final do período, em cm; d_{-t} = diâmetro à altura do peito obtido a partir da média dos dois rolos de incremento no início do período, em cm; t = período considerado, neste estudo foi de dez anos ($t = 10$).

2.4.6 Agrupamento de dados em classes de diâmetro

Com os dados de (d) para cada sítio estudado, foi determinado as distribuições diamétricas pelo método de Sturges. O número de classes (K) foi obtido, respectivamente, por:

$$K = 1 + 3,33 \cdot \log(n) \quad (19)$$

$$c = > obs - < obs \quad (20)$$

$$IC = \frac{c}{K} \quad (21)$$

$$LI = < obs \quad (22)$$

$$LS = LI + IC \quad (23)$$

Em que: K : número de classes; \log : logaritmo decimal; n : número de observações; c : amplitude das classes; $>$ valor máximo observado; $<$ valor mínimo observado; IC : intervalo de classe; LI : Limite inferior; LS : Limite superior.

Para avaliar a estrutura diamétrica da floresta, foi realizado um levantamento quantitativo a partir da variável (d), e calculadas estatísticas descritivas para obter informações das características estruturais dos sítios florestais.

2.4.7 Modelagem das variáveis relações forma – dimensão – densidade para *Araucaria angustifolia*

2.4.7.1 Modelagem das variáveis de copa e densidade

Foram utilizados modelos lineares simples para relacionar as variáveis dendrométricas e morfométricas com o objetivo de descrever características de forma e dimensão conforme as equações descritas. As variáveis preditoras foram escolhidas pelo maior valor de correlação de Pearson.

$$dc = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \varepsilon_i \quad (24)$$

$$asc = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \varepsilon_i \quad (25)$$

$$vc = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \varepsilon_i \quad (26)$$

$$N/ha = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \varepsilon_i \quad (27)$$

$$G/ha = N/ha \text{ est} \cdot g \quad (28)$$

Em que: dc: diâmetro de copa (m); asc: área de superfície da copa (m²); vc: volume de copa (m³); N/ha: número de árvores por hectare (*árv. ha⁻¹*) N/ha: número de árvores por hectare (*árv. ha⁻¹*) estimado; G/ha: área basal (*m². ha⁻¹*); g: área basal (m²); d: diâmetro à altura do peito a 1,30 m do solo (cm). β_0 : coeficiente linear; β_1 : coeficiente angular; ε_i : erro aleatório.

2.4.8 Processamento dos dados e análise estatística

As árvores mensuradas foram divididas em classes diamétricas utilizando a amplitude das classes, os limites inferior e superior, definidos pelo método de Sturges. Para auxiliar a descrição da estrutura horizontal atual na floresta também se utilizou os gráficos do histograma de frequência.

Com os dados mensurados de forma, dimensão e densidade foram determinadas as estatísticas descritivas das variáveis. Este processamento foi realizado no *software Microsoft Office Excel* ® 2016.

Foi realizada a análise da correlação linear de *Pearson* considerando-se o nível de 5% de probabilidade de erro, entre as variáveis dendro/morfométricas, incremento e densidade com o diâmetro à altura do peito (d), com o procedimento PROC CORR do *software* estatístico SAS (*Statistic Analysis System*) 9.4. O valor de correlação possui a amplitude de -1 a 1, expressando-se mais forte próxima desses valores, mais fraca próxima do coeficiente zero e nula quando igual à zero. As variáveis com maior correlação com o d foram determinadas para a modelagem das relações de forma, dimensão e densidade.

As variáveis dendro/morfométricas selecionadas na correlação de Pearson foram submetidas à análise de covariância, visando identificar possíveis diferenças de nível (coeficiente β_0) e inclinação (coeficiente β_1) no ajuste de modelos. Foi adotado o modelo linear simples para a análise de covariância, a fim de evitar a diminuição dos graus de liberdade do resíduo de uma unidade e a perda do poder de ajuste do modelo (KAPS; Lamberson, 2004).

Os ajustes das equações (Eq. 24, 25, 26 e 27) foram submetidos ao teste dos condicionantes da regressão, sendo elas: a normalidade dos dados, independência do erro e homogeneidade da variância, pelos testes de Shapiro-Wilk, Durbin-Watson e teste de

White, para ajustar equações da relação entre dimensão-forma-densidade. Quando o ajuste das equações não atendeu às condicionantes de regressão, foi empregado a técnica dos modelos lineares generalizados (MLGs). Na avaliação dos MLG, testaram-se os campos aleatórios, Normal e Gama, utilizando-se as funções de ligação identidade e logarítmica.

Os critérios de ajuste para MLGs são avaliados através do desvio e critério de informação de Akaike (AIC) conforme Paula (2010), sendo que quanto menor esses valores, melhor o ajuste do modelo. Essa opção é estabelecida pelo critério de não adoção de transformação da variável dependente, evitando-se a formação de viés em que o intercepto é afetado, indicando a necessidade de correção, bem como evitar problemas de discrepância logarítmica (Hess, 2015). Um valor pequeno para a função de desvio indica que, para um número menor de parâmetros, se obtém um ajuste tão bom quanto o ajuste com o modelo saturado (Paula, 2010).

De acordo com Turkman e Silva (2000), esse critério é fundamentado na função log-verossimilhança, com a admissão de um fator de correção como modelo de penalização da complexidade do modelo. Menores valores de AIC são considerados representativos para um melhor ajuste. Na comparação dos modelos também foi empregado o Critério de Informação Bayesiano (BIC), o qual consiste na seleção do modelo que exibir o menor valor de BIC.

Além disso, a análise gráfica dos resíduos, ou seja, diferença dos dados observados em função dos dados estimados, também foi utilizada como critério de seleção, pois, nos MLG, conforme Cordeiro e Lima Neto (2006), os resíduos são empregados para explorar a adequação do modelo ajustado conforme a escolha da função de variância, e da função de ligação.

O valor *AIC* foi definida pela (Equação 29) e o *BIC* pela (Equação 30):

$$AIC = -2[\text{Log}(L) - p] \quad (29)$$

$$BIC = -2[\text{Log}(L) - p \text{ Log } n] \quad (30)$$

Em que: *AIC*= critério de informação de Akaike; *BIC* = critério de informação Bayesiano; *L*: valor de verossimilhança para o modelo estimado; *n*: número de observações; *p*: número de parâmetros do modelo.

Para realizar os ajustes e a análise dos dados foi utilizado o *software Statistic Analysis System (SAS)*, versão 9.4 (SAS INSTITUTE, 2012).

2.4.8.1 Análise da comparação dos dados Convencionais vs Fotogrametria

Mensurados os diâmetros de copa obtidos das imagens nas alturas de 60, 80 e 120 m, precedeu-se a estatística descritiva como a média, mediana, desvio padrão, valores mínimos e máximos para os dados do inventário convencional e os dados da fotogrametria realizados no *software Microsoft Office Excel* ® 2016.

Logo após, a fim de verificar se a diferença entre os valores de diâmetro de copa possui distribuição normal foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk com nível de significância de 5% com a ferramenta de análise de dados *Real Statistics Resource Pack* no qual complementa os recursos padrão do *Software Microsoft Office Excel* ® 2016.

Em seguida, após a verificação da normalidade dos dados foi realizado o teste t não paramétrico de Wilcoxon, para dados que não possuem distribuição normal, e contém observações pareadas (dependentes) tal como se verifica nesse estudo, com o objetivo de testar se as medianas dos dados são estatisticamente significativas ou não significativas, com as seguintes hipóteses:

- ✓ H_0 : Mediana das diferenças entre os pares (Convencional - Fotogrametria) = 0
- ✓ H_1 : Mediana das diferenças entre os pares (Convencional - Fotogrametria) \neq 0.

Para determinar a precisão dos dados de diâmetro de copa aferidos pelo método convencional e pela fotogrametria, das árvores de araucária, foram realizadas avaliações por meio de dois parâmetros, sendo eles o erro absoluto dado na unidade da variável (m) conforme (Equação 31) e a validação cruzada pela raiz do erro quadrático médio ou *root mean-square error* – RMSE, conforme (Equação 32) para cada árvore individual.

$$Erro_{absoluto(m)} = (y_i - \hat{y}_i) \quad (31)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (32)$$

Em que: y_i : valor medido da variável y no gráfico i (convencional); \hat{y}_i : valor estimado da variável y no gráfico i (fotogrametria); n: número de árvores.

2.4.9 Modelagem com uso de geotecnologias para diâmetro à altura do peito em função do diâmetro de copa

2.4.9.1 Modelagem dos dados de Ajuste

Com as medidas dos raios de copa, foi calculado o diâmetro de copa (dc) e ajustados modelos da relação entre diâmetro (d) em função do diâmetro de copa (dc) com técnica de regressão dos modelos lineares generalizados, distribuição gama e função de ligação identidade e logarítmica.

Os modelos criados para o ajuste dos dados, foi realizado a partir do total das 100 árvores dos três sítios de estudo, para o diâmetro de copa no campo (Equação 33) e na imagem (Equação 34):

$$d = \beta_0 + \beta_1 \cdot dc_{(campo)} + \varepsilon_i \quad (33)$$

$$d = \beta_0 + \beta_1 \cdot dc_{(imagem)} + \varepsilon_i \quad (34)$$

Em que: d: diâmetro a altura do peito a 1,30 m do solo (cm); β_0 : coeficiente linear; β_1 : coeficiente angular; $dc_{(campo)}$: diâmetro de copa (m) medido no campo (convencional); $dc_{(imagem)}$: diâmetro de copa (m) medido na imagem (fotogrametria); ε_i : erro aleatório.

Os modelos desenvolvidos para os dados do campo e imagem, foram treinados no conjunto de dados do ajuste e posterior avaliado no conjunto de dados de validação.

2.4.9.2 Validação dos modelos

Para validar o modelo ajustado do d em função do dc (Equações 33 e 34) foram mensuradas 43 árvores nos sítios de estudo do total de 100 utilizadas no ajuste. Das 43 árvores foram medidos 4 raios de copa e o d. Com os dados de raio de copa foi calculado o dc e seu valor utilizado para gerar o valor da variável d. Foram medidas 16 árvores no sítio I (URB), 15 árvores no sítio II (URB) e 12 árvores no sítio III (BRT). Os dados de dc foram utilizados no modelo ajustado (a campo e imagem) e verificado a sua precisão para estimar o d de cada árvore, com a finalidade de utilizar medição do dc em imagens e obter o d sem necessidade de medição em parcelas a campo.

A acurácia dos modelos e a precisão de seu uso para estimar o d com a medida do dc em imagens foi realizado utilizando o erro médio do ajuste no campo, na imagem e

dos dados da validação, conforme (Equação 35). A validação de modelos geralmente é realizada separando 30% do total de dados mensurados, contudo neste estudo se optou pela validação com a medição da variável resposta (d) fora da primeira amostrada utilizada no ajuste do modelo, medindo nos locais de estudo diferentes árvores e verificando a precisão do modelo, em suas variáveis dc e d.

O erro médio dos dados de ajuste em comparação ao erro da validação para o d nas duas medidas foi obtido com a (Equação 35):

$$Resíduos_{(cm)} = \frac{y_i - \hat{\mu}_i}{\hat{\mu}_i} \quad (35)$$

Em que: y_i : valor medido da variável y no gráfico i (convencional); μ_i : valor ajustado dos resíduos padronizados e generalizados da técnica do MLG, na distribuição Gama.

Nos MLGs, segundo Cordeiro e Lima Neto (2006), os resíduos são usados para explorar a adequação do modelo ajustado com respeito à escolha da função de variância, da função de ligação e de termos do preditor linear.

2.4.10 Eficiências Relativas do tempo de medição para diâmetro de copa

A medição do tempo para a variável diâmetro de copa foi realizada utilizando dois métodos, sendo o convencional e fotogrametria. O tempo de medição foi verificado para cada árvore individual da amostra de validação, ou seja, para um total de 43 árvores, (16 no sítio I, 15 no sítio II e 12 árvores no sítio III), no qual foi cronometrado com o uso de um *smartphone* o tempo de medição dos 4 raios de copa no campo e 8 raios de copa na imagem. O início do tempo foi cronometrado do primeiro raio de copa até o último medido.

2.4.10.1 Cálculo da eficiência relativa

Para calcular a eficiência relativa dos métodos de medição aplicou-se a equação de Péllico Neto e Brena, (1997) conforme descrita. O método que apresentar maior valor de eficiência relativa é o melhor.

$$ER = \frac{1}{(T \cdot CV^2)} \quad (36)$$

Em que: ER: Eficiência relativa; T: Tempo de medição da unidade amostral; CV: Coeficiente de variação para a unidade amostral.

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da suficiência amostral foi determinada em função da variável (d) e indicou que em cada sítio a amostragem de $n=20$ árvores e $n=10$ árvores e $n=6$ árvores para os locais de Urubici (sítio I e II) e Bom Retiro (sítio III) seriam suficientes, validando que o número de 100 árvores amostradas afere o conhecimento sobre morfometria e a relação com a dimensão-forma-densidade para a espécie de araucária nas características destes sítios de estudo.

2.5.1 Número de árvores e distribuição diamétrica

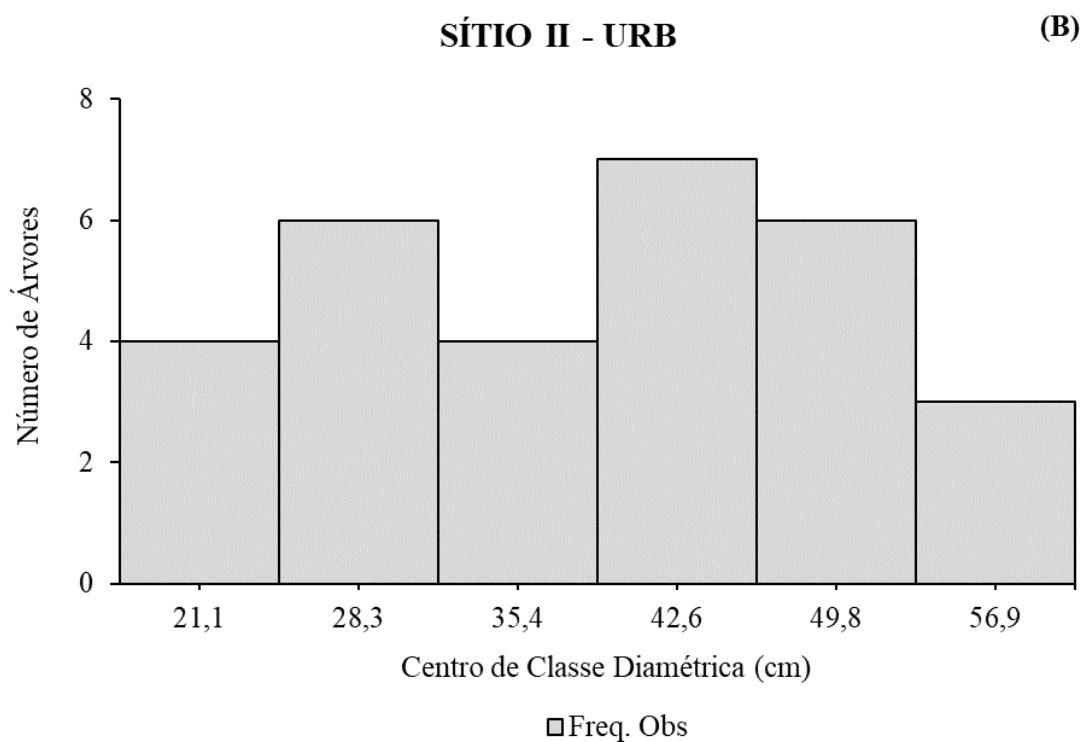
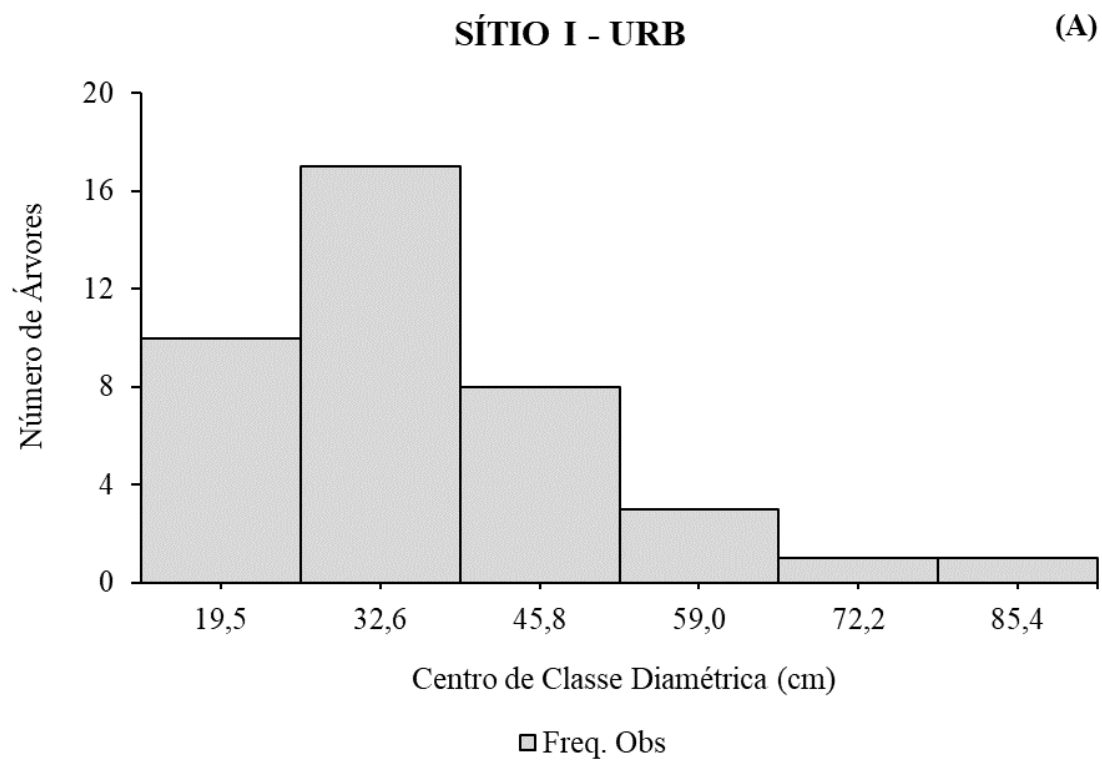
Os sítios estudados apresentaram os diâmetros mínimos e máximos dos centros de classe para cada sítio conforme Figura 13 A, B e C e resultou em 6 classes para cada sítio com os seguintes intervalos de classe de 13,2 cm para o sítio I, 7,2 cm para o sítio II e 8,3 cm para o sítio III.

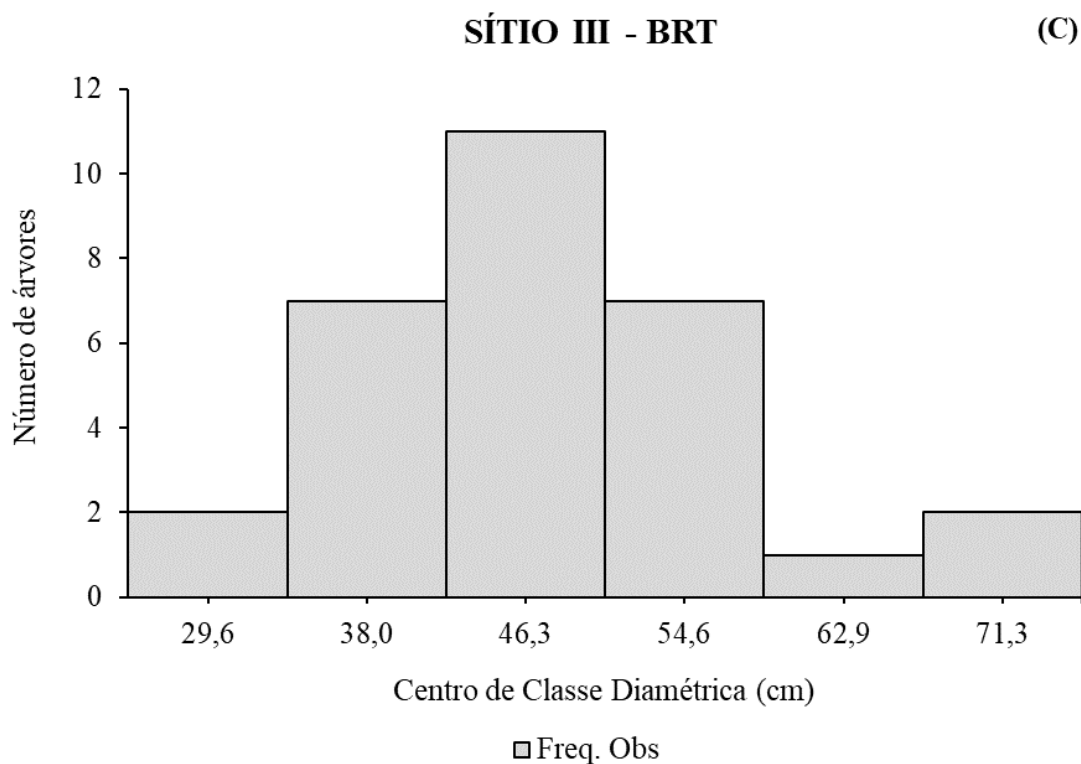
A Figura 13 mostra a estrutura horizontal dos sítios estudados para a espécie araucária, sendo um indicador do estoque de crescimento e permite, com certa experiência, elaborar conclusões a respeito da estrutura da floresta, estado que se encontra, assim como fazer inferências sobre a descontinuidade das classes diamétricas, além de propor alternativas de manejo (Loetsch et al., 1973, Souza e Jesus, 1994).

No sítio I (URB) o comportamento da estrutura apresentou uma distribuição unimodal (Figura 13 A), os valores de curtose (2,96) e assimetria (1,36) indicam uma distribuição do tipo platicúrtica com assimetria positiva à direita, com queda na frequência da primeira classe. No sítio II (URB), verifica-se uma configuração de estrutura bimodal (Figura 13 B), onde o menor número de árvores por centro de classe diamétrica demonstra irregularidade na distribuição diamétrica, os valores de curtose (-0,99) e assimetria (-0,05) indicam uma distribuição do tipo platicúrtica e simétrica.

O sítio III (BRT) apresenta distribuição semelhante ao formato de curva normal, com configuração unimodal como mostra na (Figura 13 C), os valores de curtose (1,18) e assimetria (0,52) indicam uma distribuição do tipo platicúrtica e simétrica, com formação regular da floresta.

Figura 13 - Distribuição diamétrica das árvores de *Araucaria angustifolia*, caracterizando o padrão estrutural em densidade nos sítios no sul do Brasil. (A) Município de Urubici, SC; (B) Município de Urubici, SC e (C) Município de Bom Retiro, SC.





Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Em todos os sítios ocorre inconsistência na distribuição diamétrica, o que pode ser denotado devido a exploração da espécie no passado, ações antrópicas como pecuária, fruticultura e lavoura, falta de incentivo à silvicultura e manejo da espécie, ações conservacionistas das políticas do meio ambiente, isto é, uma negligência-benigna, pois acreditam que se abandonadas à mãe natureza, a floresta prosperará. O conjunto destas ações põe em risco o comprometimento da espécie, a manutenção da estrutura futura, estagnação do crescimento, redução da produtividade da floresta, a regeneração natural, a diversidade de outras espécies, a fauna e desenvolvimento econômico e social, o que já foi denotado por autores como Beckert et al., (2014); Canetti, A. et al., (2014); Curto RA. et al., (2014); Hess et al., (2014); Costa, E. A. et al., (2016); Costa, E.A. et al., (2017); Costa, E. A.; Finger, C.A.G.; Fleig, F.D. (2018); Hess AF. et al., (2021).

Segundo Machado et al., (2006), com o aumento do diâmetro e a redução do número de árvores, as curvas de distribuição diamétrica tendem a se deslocar para a direita e se tornarem mais achatadas à medida que o povoamento se torna mais velho, com ligeira influência do sítio. De acordo com Lima et al., (2013), em uma floresta de várzea, quando a distribuição diamétrica em uma floresta natural apresenta curvas mais suaves, com diminuição gradativa do número de indivíduos entre as classes diamétricas, parte-se do

pressuposto que a floresta é mais conservada ou com baixos níveis de perturbações, caso contrário, a floresta apresenta dificuldade no estabelecimento da estrutura, seja por fatores antrópicos ou limitantes naturais.

Os sítios de estudo foram divididos em três centros, as classes iniciais, intermediárias e de maior diâmetro. O sítio I, a distribuição da estrutura apresentou concentração de árvores em classes iniciais de diâmetro de 25% da estrutura da floresta e 70% nas classes intermediárias. As árvores com maior diâmetro representaram 5% da estrutura. O sítio II, as classes iniciais apresentaram 36,7% da estrutura, as classes intermediárias 40% e as de maior diâmetro 23,3% da estrutura da floresta. O sítio III, as classes iniciais apresentaram 6,7% da estrutura, as intermediárias 83,3% e as de maior diâmetro 10% da estrutura da floresta.

Klein (2017) encontrou resultados semelhantes, mostrando uma distribuição com maior número de indivíduos nas classes entre 35 a 40 cm, e as classes abaixo de 25 cm apresentaram menor quantidade de árvores. As florestas necessitam e tem dependência de distúrbios na estrutura para favorecer a regeneração e estimular flutuações das frequências, conferindo uma distribuição diamétrica com mais de uma forma de distribuição (Enright et al., 1999; Claessens et al., 2006; Weber 2011; Ebling e Péllico Netto 2015).

As curvas de distribuição apresentam maior número de árvores nos centros de classes intermediárias (30-60 cm), representando próximo de 60% da estrutura da floresta, e 30% compondo as classes de menor diâmetro, sendo 10% para árvores de diâmetro superior. Estas características denotam o comprometimento da estrutura futura da floresta, a continuidade da formação da floresta, estagnação do crescimento, equilíbrio entre ingresso e mortalidade, competição, necessidade de intervenção silvicultural e/ou plantio para manutenção da sustentabilidade do ecossistema florestal (Machado, S.A. et al., 2009; R. V. Longhi et al., 2017).

A distribuição diamétrica unimodal, é característica de florestas equiâneas (Souza e Jesus, 1994; Schaaf et al., 2006), que quando são de ocorrência natural, são homogêneas, com espécies que se regeneram em ciclos (Machado et al., 1998), assim como observado para *A. angustifolia*. Muitos autores enfatizam a necessidade de ocorrência de distúrbio para que *A. angustifolia* regenere naturalmente (Soares, 1979; Souza et al., 2008; Orellana, 2014).

Com isso, esses números mostram as condições de estrutura de uma floresta desbalanceada, com uma clara ausência de regeneração devido essas áreas (sítios)

principalmente o sítio II e III são usadas para pastagem do gado. A pecuária causou um eventual impacto na biodiversidade do solo e a existência de outras espécies de árvores menores (Souza, A.G.V et al., 2022). A presença de gado, competição e características intrínsecas do local e a formação de estruturas reprodutivas no qual esses fatores juntos estão diretamente relacionados à falta de plano de manejo, que possibilita estimular a formação de uma futura estrutura da floresta e sua real extinção.

2.5.2 Características dendrométricas, morfométricas, incremento periódico anual em diâmetro e densidade de *Araucaria angustifolia*

As estatísticas descritivas dos dados dendrométricos, morfométricos, incremento periódico anual em diâmetro e densidade dos três sítios florestais de estudo são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Estatísticas descritivas das variáveis dendrométricas, morfométricas, copa, incremento periódico anual em diâmetro e densidade para *Araucaria angustifolia* para os três sítios florestais no sul do Brasil.

Variável	Sítio	Mínimo	Média	Máximo	σ	CV%
d (cm)	I	12,86	35,89	91,99	15,89	44,28
	II	17,57	39,40	60,47	12,03	30,53
	III	25,46	47,23	75,44	10,97	23,23
h (m)	I	4,7	13,6	22,2	3,97	29,15
	II	6,9	14,7	21,3	3,79	25,71
	III	13,4	18,9	23,4	2,67	14,06
hic (m)	I	3,3	6,6	12,4	2,04	30,65
	II	4,0	8,6	13,0	1,83	21,31
	III	10,4	14,9	18,4	2,26	15,15
dc (m)	I	4,60	9,67	24,85	3,77	39,00
	II	4,75	10,46	16,15	2,97	28,42
	III	7,35	10,79	18,95	2,66	24,65
cc (m)	I	1,40	6,98	14,30	3,63	52,08
	II	1,40	6,17	12,10	3,19	51,63
	III	1,00	4,02	7,40	1,97	49,03
asc (m ²)	I	19,45	149,14	739,46	132,18	88,63
	II	27,96	144,78	297,42	77,86	53,78
	III	43,97	122,97	324,63	65,83	53,53
pc (%)	I	10,14	48,62	73,14	16,17	33,26
	II	16,47	39,69	64,32	13,29	33,48
	III	5,26	20,79	37,37	9,35	45,00
fc	I	0,67	1,75	4,71	0,95	54,38
	II	0,59	2,14	6,46	1,16	54,25
	III	1,36	3,60	8,63	2,25	62,40
vc (m ³)	I	1,68	20,06	93,03	17,97	89,60
	II	3,23	17,87	37,96	11,12	62,22

	III	1,92	11,92	33,90	7,65	64,21
IA	I	0,45	0,71	1,12	0,16	22,96
	II	0,38	0,72	1,06	0,17	23,62
	III	0,37	0,57	0,97	0,14	24,88
IS	I	19,39	28,19	48,00	5,67	20,11
	II	21,26	27,03	37,11	3,79	14,03
	III	17,83	23,08	32,00	3,22	13,94
hd	I	24,13	40,83	67,99	10,62	26,02
	II	25,58	39,43	70,87	11,48	29,11
	III	26,98	41,80	58,51	9,03	21,60
G/ha	I	3,27	8,57	10,68	2,05	23,96
	II	5,61	9,75	10,83	1,36	14,03
	III	10,45	15,63	16,78	1,55	9,88
IPAd ₁₀	I	0,33	0,58	0,98	0,16	27,74
	II	0,25	0,43	0,97	0,15	35,57
	III	0,28	0,44	0,73	0,11	25,69
N/ha	I	14	119	514	100,92	84,93
	II	33	101	357	75,59	74,68
	III	30	100	227	45,24	45,06

Em que: σ : Desvio padrão; CV%: Coeficiente de variação em porcentagem; d: diâmetro à altura do peito (cm); h: altura total (m); hic: altura de inserção de copa (m); dc: diâmetro de copa (m); cc: comprimento de copa (m); asc: área de superfície de copa (m²); pc%: percentual de copa (%); fc: formal de copa; vc: volume de copa (m³); IA: Índice de Abrangência; IS: Índice de Saliência; hd: grau de esbeltez; G/ha: área basal por hectare; IPAd: Incremento periódico anual em diâmetro (cm.ano⁻¹); N/ha: Número de árvores por hectare (ár.v. ha⁻¹). Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Os resultados estatísticos mostram que o sítio III em Bom Retiro apresentou as médias mais elevadas para os parâmetros dendrométricos e variáveis morfométricas, como d, h, hic, dc, fc, hd, G/ha, com exceção das variáveis cc, asc, pc, vc, IA, IS e N/ha, para as quais os valores foram inferiores em comparação com os demais sítios. O que mostra uma relação inversamente proporcional, indicando que um aumento nos valores dessas variáveis está associado a uma diminuição nos demais. Essas estatísticas de maiores valores no sítio III podem estar associadas a idade, e menor densidade de árvores.

A diferença de altitude entre Bom Retiro e os sítios em Urubici, onde a altitude é mais elevada, representa uma explicação significativa para o fato de algumas variáveis apresentarem médias mais altas em comparação com Urubici. Essa diferença altimétrica exerce influência sobre a estrutura da floresta, já que o estresse causado pelo vento obriga as árvores a dedicarem mais energia ao suporte mecânico, em detrimento do crescimento em altura, conforme Lawton (1982).

Árvores com maior cc indicam que são de menor idade, crescimento livre (sem competição) e maior pc. A relação entre o comprimento da copa (cc) e a porcentagem de copa (pc) é diretamente proporcional, sendo que a pc indica o grau de concorrência e vitalidade das árvores, conforme observado por Durlo e Denardi (1998). Conforme

argumentado por Klein (2017), copas menores indicam uma redução na fotossíntese, o que pode comprometer as taxas de incremento e o crescimento.

As médias para as variáveis indicam estrutura desbalanceada ou regular para os três sítios dada a média para a variável *d*. Os sítios apresentam árvores estagnadas e que já atingiram a maturidade (taxa de incremento reduzida), pouca densidade (efeito da antropização, ou exploração passada) o que é informado pelo menor valor para a relação *hd*, maior valor para *dc*, alto valor para a *hic*.

A araucária apresenta desrama natural, onde galhos sombreados pela copa acima e pelas árvores concorrentes vizinhas têm sua produção fotossintética reduzida, resultando na desconexão do sistema de abastecimento de assimilados. Portanto, árvores com maiores valores de *d* tendem a exibir comprimentos de copa (*cc*) mais curtos Nutto e Spathelf (2003).

Em um estudo de Costa, E. A. et al., (2018), para araucárias, nos municípios no sul do Brasil, sendo Lages, SC e São Francisco de Paula, RS para árvores sob competição em floresta natural, encontraram valores para o *dap* médio de 40,7 cm, e para a altura média de 17,1 m, já para o município de São Francisco de Paula, RS obteve *dap* médio de 52,5 cm, e para a altura média de 20,4 m, valores semelhantes ao encontrado nesse estudo.

As médias da altura de inserção da copa (*hic*) das árvores para os três sítios foram de 6,6 m, 8,6 m e 14,9 m. Klein et al., (2017) em trabalho sobre a morfometria e o crescimento diamétrico de araucárias na região de São José do Cerrito - SC encontraram valores de 10,47 m a 11,28 m. A *hic* foi maior no sítio III o que associada a idade, com árvores mais velhas em relação aos demais sítios, o que influencia no formato de copa.

Segundo Klein et al., (2017), maiores valores de diâmetro de copa sugerem maior espaço lateral para o crescimento e desenvolvimento das árvores, que atingem o dossel superior, demonstrando sua capacidade de competição por luz e recursos necessários para o crescimento dos indivíduos. Hess et al., (2016), estudando a espécie no Sul do Brasil, encontraram uma variação de 12,8 a 23,6 vezes o tamanho do *dap* para diferentes sítios e diâmetro de copa médio em torno de 20 vezes o *d*.

O sítio III apresentou valores superiores na área de superfície de copa. No entanto, o sítio I registrou um valor máximo maior devido à presença de uma árvore atípica na amostra, caracterizada como um ponto discrepante em relação às demais. Essa árvore cresceu e se desenvolveu de maneira isolada, sendo mantida na amostra devido à sua natureza ontogenética única. O coeficiente de variação (CV%) reflete essa variação,

atingindo 88,63% em comparação com a média. Nos sítios II e III, a variação foi de 53,78% e 53,53%, respectivamente. O desvio padrão de 132,18 m² indica uma falta de uniformidade em relação à média no sítio I em Urubici.

O conhecimento da dinâmica das copas é crucial para promover a sustentabilidade das florestas e efetuar um gerenciamento eficiente, pois contribuem para os modelos de dinâmica, estrutura, estabilidade, produtividade e diversidade. De maneira direta e indireta, esses elementos impactam a expressão das funções do ecossistema e seus serviços. As copas das árvores exercem influência tanto no crescimento individual das árvores quanto no ciclo biogeoquímico (X. Wenyan et al., 2022).

Segundo Durlo e Dernardi (1998) a pc% pode ser atribuída aos diferentes graus de concorrência, a que as árvores estão submetidas. O povoamento de araucária estudado por Roveda et al., (2012), apresentou pc% média de 23,19%, os valores de proporção de copa menores para a araucária em relação as outras espécies nativas, destaca seu elevado interesse no setor madeireiro e justifica a realização do manejo sustentável nesses povoamentos.

O volume de copa (vc) médio encontrado para o sítio I foi de 20,06 m³, para o sítio II valor médio de 17,87 m³ e para o sítio III valor de vc médio de 11,92 m³. Marasciulo, A.S. (2017) encontrou para 78 árvores de *Araucaria angustifolia* volume de copa médio de 148,0 m³, valores acima desse estudo. A caracterização das copas das árvores está se tornando cada vez mais importante para a compreensão da arquitetura das árvores e da dinâmica dos ecossistemas florestais segundo Fischer et al., (2019).

O índice de formal de copa (fc) expressa o achatamento das copas de árvores, onde valores iguais a 1,0 indicam copas redondas, abaixo de 1,0 caracterizam copas esbeltas, e acima de 1,0 indicam copas achatadas. No estudo, o sítio I apresentou uma média de fc de 1,75, 2,14 no sítio II e 3,60 no sítio III, sugerindo que as copas, em média, são achatadas nos três locais. Outras pesquisas indicam que o formal de copa em árvores adultas de *A. angustifolia* geralmente é superior a 1. Estudos anteriores destacam a variabilidade desse índice, sendo sugerido seu uso na seleção de árvores para desbaste, removendo aquelas com maior formal de copa (Roveda et al., 2012; Costa et al., 2016; Silva et al., 2017).

As árvores de araucária, quando atingem a fase adulta, exibem um formato de umbela, verificado pelo índice de formal de copa (fc). Um valor mais elevado de fc indica maior largura e menor comprimento de copa, resultando em um manto de copa reduzido. Essa característica implica em menor capacidade fotossintética, potencial aumento na

autodesrama, competição entre as árvores ou agrupamento, fatores observados nas áreas deste estudo, isto é, remanescentes da antiga floresta de araucária.

O índice de abrangência (IA) para araucária em estudos de Roveda et al., (2012), teve uma média de 0,45, com amplitude variando de 0,21 a 0,96. No qual o presente estudo apresentou valores maiores em comparação aos de Roveda et al., (2012).

Klein et al., (2017), estudando morfometria de *Araucaria angustifolia* em São José do Cerrito no planalto catarinense, encontraram índice de saliência variando de 19,82 a 26,49. O valor de IS indica que uma árvore com maior asc é mais eficiente na ocupação do espaço; no entanto, à medida que o d aumenta, há uma tendência de diminuição no IS, sugerindo a necessidade de intervenção silvicultural na área.

À medida que a árvore envelhece, observa-se uma gradual redução nas diferenças da relação hd. Esse fenômeno ocorre devido ao fato de que, após as árvores atingirem seu estágio de clímax, a altura tende a estabilizar, enquanto o diâmetro continua a crescer Finger (1992). O grau de esbeltez foi semelhante entre os sítios, com variação de 39,43 a 41,80. Nascimento et al., (2010), Sanquetta et al., (2013) e Costa et al., (2014) observaram forte relação entre o d com o dc e hd, pois, à medida que as árvores crescem em d, a dimensão de suas copas também aumenta, diminuindo, assim, o grau de esbeltez da árvore; ou seja, seu desenvolvimento é favorecido, garantindo sua posição no estrato dominante da floresta.

A área basal foi maior para o sítio III em Bom Retiro, com menor valor de CV% de 9,88% em relação aos demais sítios, ou seja, a variável apresentou valores mais próximos em relação à média. Em um estudo de Demétrio, L, et al., (2022) para árvores masculinas de *Araucaria angustifolia* em um remanescente natural encontrou-se valores de incremento médio anual em diâmetro de 0,56 cm/ano, mínimo de 0,24 cm/ano e máximo de 0,98 cm/ano. Pode-se inferir com base nos dados que o IPAd foi maior no sítio I, o qual apresentou menores valores de d.

Embora o sítio I ter apresentado maior média de N/ha, o mesmo apresentou os menores valores de d, dc fc e área basal, comportamento que pode ser explicado devido à maior densidade, ocupação do espaço e menor antropização.

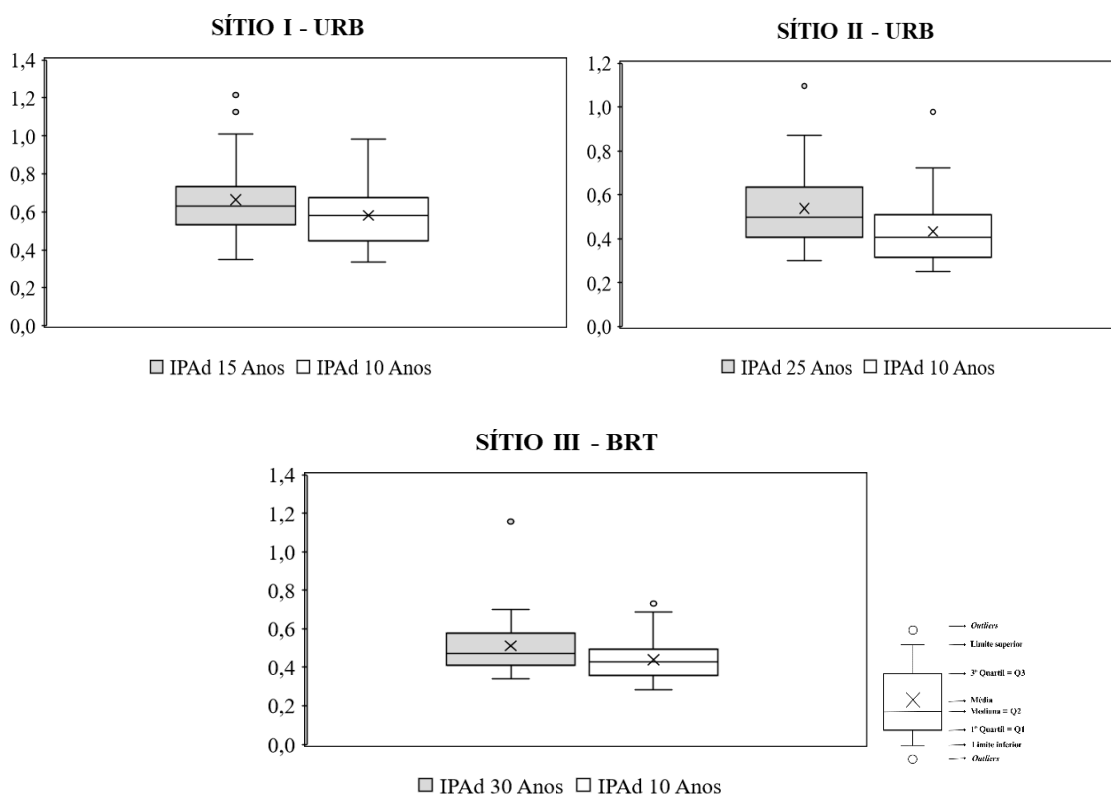
As estatísticas descritivas das variáveis indicam que menor número de árvores por hectare maior as variáveis dendrométricas e morfométricas, padronização na estrutura horizontal, comprometendo a dinâmica da estrutura, árvores de crescimento *old-growth* redução na taxa de incremento e que atingiram a senescência.

2.5.2.1 Incremento periódico anual em diâmetro – Taxa de Redução

O incremento periódico anual médio em diâmetro para os 10 anos foi de 0,58 cm/ano no sítio I em Urubici/SC, 0,43 cm/ano no sítio II em Urubici/SC e 0,44 cm/ano no sítio III em Bom Retiro/SC. Para verificar a taxa de redução do incremento foram avaliadas as árvores de cada sítio. No sítio I, as 40 árvores, a idade visualizada dos anéis no rolo de incremento foi de 15 anos, no sítio II, 30 árvores, 25 anos e no sítio III, 30 árvores apresentaram 30 anos.

Considerando a idade de 15 anos no sítio I o incremento anual médio foi de 0,66 cm/ano e nos últimos 10 anos foi de 0,58 cm/ano, o que representa uma taxa de redução de incremento de 12,4 %, enquanto para o sítio II, considerando a idade de 25 anos o incremento anual médio foi de 0,54 cm/ano, a taxa de redução foi de 19,4% e o sítio III, a idade de 30 anos o incremento anual médio foi de 0,51 cm/ano, com taxa de redução de 14,3% como mostra a Figura 14.

Figura 14 - Incremento periódico anual em diâmetro de 15 anos para o sítio I (URB), 25 anos para o sítio II (URB) e 30 anos para o sítio III (BRT) em comparação ao incremento dos últimos 10 anos para as árvores de *Araucaria angustifolia* no sul do Brasil.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Esses valores indicam uma redução de incremento expressiva tanto para a média total, quanto para os últimos 10 anos, o que mostra que estas árvores nestes sítios já alcançaram a capacidade máxima de crescimento, a idade de rotação biológica devido à redução na taxa de incremento. A araucária apresenta média de incremento de 0,9 cm/ano, quando ocorre redução na taxa de incremento significa que há necessidade de intervenções silviculturais para manter a taxa de incremento e garantir a estrutura futura da espécie Hess et al. (2018a), reduzir a competição (Costa e Finger, 2017), distribuição desuniforme de recursos para as árvores, grau de impacto de estresse pela quantidade de crescimento anual em volume (Pretzsch, H. e Dieler, J, 2011), o que justifica o manejo nessas áreas. Esses valores são indicativos do período de incremento das árvores até sua estagnação.

A relação tamanho-crescimento quantifica a partição do crescimento entre árvores de diferentes tamanhos em um povoamento e ajuda a elucidar a dinâmica de crescimento do povoamento durante o desenvolvimento do povoamento. As relações tamanho-crescimento correlacionam-se fortemente com a densidade do povoamento, a idade do povoamento e a severidade da seca (Pretzsch, H. e Dieler, J, 2011).

2.5.3 Correlação de Pearson para as variáveis dendro/morfométricas, incremento periódico anual em diâmetro e densidade com o diâmetro à altura do peito (d)

A correlação de Pearson (r), demonstrada na Tabela 4, permitiu inferir sobre o grau de associação entre as variáveis dendro/morfométricas, incremento e densidade com maior correlação linear com o (d). Porém, para o estudo, foi utilizado como critério correlações $r \geq 0,6$, com o objetivo de verificar como essas variáveis refletem no desenvolvimento da forma e dimensão das árvores. Os coeficientes de correlação de Pearson mostraram valores significativos descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Matriz de correlação de Pearson e probabilidades para as variáveis dendrométricas, morfométricas, incremento periódico anual em diâmetro e densidade de *Araucaria angustifolia*, para os três sítios de estudo, no sul do Brasil.

	d	h	hic	dc	cc	asc	pc%	fc	vc	IA	IS	hd	IPA _d	N/ha
d	1	0,69 *	0,42 *	0,88 *	0,36 *	0,75 *	0,04 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,63 *	0,22 *	-0,53 *	-0,57 *	-0,08 ^{ns}	-0,67 *
h	-	1	0,68 *	0,55 *	0,43 *	0,51 *	-0,01 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,47 *	-0,43 *	-0,50 *	0,13 ^{ns}	-0,18 ^{ns}	-0,66 *
hic	-	-	1	0,20 *	-0,36 *	-0,06 ^{ns}	-0,72 *	0,50 *	-0,20 *	-0,44 *	-0,51 *	0,06 ^{ns}	-0,25 *	-0,17 ^{ns}
dc	-	-	-	1	0,45 *	0,90 *	0,19 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,77 *	0,48 *	-0,12 ^{ns}	-0,52 *	-0,07 ^{ns}	-0,70 *
cc	-	-	-	-	1	0,73 *	0,87 *	-0,71 *	0,86 *	-0,003 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,07 ^{ns}	-0,63 *
asc	-	-	-	-	-	1	0,50 *	-0,29 *	0,96 *	0,39 *	-0,04 ^{ns}	-0,34 *	0,01 ^{ns}	-0,64 *
pc%	-	-	-	-	-	-	1	-0,78 *	0,67 *	0,15 ^{ns}	0,20 *	0,05 ^{ns}	0,20 *	-0,39 *
fc	-	-	-	-	-	-	-	1	-0,47 *	0,06 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	-0,18 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	0,30 *
vc	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,29 *	-0,01 ^{ns}	-0,22 *	0,04 ^{ns}	-0,63 *
IA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,42 *	-0,71 *	0,07 ^{ns}	-0,05 ^{ns}
IS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,29 *	0,08 ^{ns}	0,23 *
hd	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-0,05 ^{ns}	0,17 ^{ns}
IPA _d	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,11 ^{ns}
N/ha	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

Em que: d: diâmetro à altura do peito (cm); h: altura total (m); hic: altura de inserção da copa (m); dc: diâmetro de copa (m); cc: comprimento de copa (m); asc: área de superfície de copa (m²); pc%: percentual de copa (%); fc: formel de copa; vc: volume de copa (m³); IA: Índice de Abrangência; IS: Índice de Saliência; hd: grau de esbeltez; IPA_d: incremento periódico anual em diâmetro (*cm. ano*⁻¹); N/ha: número de árvores por hectare (árv. ha⁻¹). *: correlação significativa a 5%; ns: não significativa. Em negrito valores com correlações $r \geq 0,6$; Hachuras: variáveis utilizadas para a modelagem. Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Os resultados da correlação de Pearson na Tabela 4, mostram que o diâmetro apresentou correlação positiva com as variáveis morfométricas relacionadas a forma da copa da árvore e com h. Esta informação é relevante, pois corrobora a proposição deste estudo e confirma as hipóteses formuladas. Corrobora a proposta de modelar as relações dimensão-forma e aplicar os modelos na elaboração de ações de manejo para sustentabilidade da FOM.

Estudos de Silveira, A, C, et al., (2021) no município de Lages, SC, em um remanescente de *Araucaria angustifolia*, apresentou uma correlação significativa e positiva entre a variável altura e o diâmetro d com um coeficiente de $r=0,73$. No presente estudo, observou-se uma correlação ligeiramente menor, atingindo $r=0,69$. Da mesma forma, o estudo anterior identificou uma correlação significativa e positiva entre a altura de inserção de copa hic e o diâmetro d com $r=0,49$, enquanto no presente estudo, a correlação entre hic e d foi de $r=0,42$. Os resultados confirmam as correlações e relações entre as variáveis encontradas no presente estudo.

De acordo com Curto (2015), o d e o dc mantêm um crescimento linear, com ambas as variáveis aumentando proporcionalmente, no entanto, em algum ponto específico, essa relação tende a se estabilizar. O diâmetro de copa dc apresentou a mais alta correlação significativa e positiva com o d, atingindo um valor de $r=0,88$. Em um estudo sobre características morfométricas e dendrométricas de araucárias no Sul do Brasil, Ricken et al. (2020) encontraram resultados semelhantes aos deste trabalho. Em Bom Jardim da Serra, observaram um valor de $r=0,70$ para d e dc; em Painei $r=0,82$ entre d e dc, e entre d e asc $r=0,81$ e em São José do Cerrito para d e dc $r=0,87$ e $r=0,84$ entre d e asc. Esses resultados demonstram correlações fortes e moderadas positivas entre as variáveis, corroborando os resultados do presente estudo.

Apesar da importância, o diâmetro de copa e consequentemente a obtenção da asc não são habitualmente quantificados em inventários florestais no Brasil, mas de enorme aplicação no amparo ao monitoramento das florestas (Mcintosh; Cinza; Garman, 2012), além de informar a zona de influência das copas (sobreposição) e o grau de concorrência da árvore (Gill et al., 2000; Obterzin et al., 2008). Ricken, P. et al. (2020) identificou correlações significativas em floresta natural com *A. angustifolia*, no sul do Brasil, especialmente em Bom Jardim da Serra, SC, para a área de copa, alcançando um valor de $r=0,66$. No município de Painei, SC, a correlação foi de $r=0,81$, e em São José do Cerrito, $r=0,84$, o que corrobora com os resultados obtidos neste estudo. Os autores também

observaram correlações significativas para o IA com o d em Bom Jardim da Serra, SC de $r=0,44$, sendo esse valor superior aos encontrado neste estudo.

O grau de esbeltez, que reflete a estabilidade das árvores, indicando que quanto mais elevado o grau de esbeltez, mais instável é a árvore. Neste estudo, foi identificada uma correlação significativa e negativa com o diâmetro, atingindo um valor de $r=-0,57$. Isso pode indicar instabilidade contra o vento ou sugerir a necessidade de desbaste, especialmente em povoamentos puros e equiâneos (Durlo; Denardi, 1998). Em uma pesquisa realizada por Ricken, Pollyni (2020) em florestas com araucária nos municípios de Bom Jardim da Serra e Paineira/SC, foi encontrada uma correlação entre o grau de esbeltez e o diâmetro à altura do peito d de $r=-0,72$, e para São José do Cerrito, $r=-0,81$, valores superiores aos observados neste estudo.

A variável incremento somente apresentou correlação significativa e inversa com hic e positiva com pc%, podendo assim supor que o crescimento tem maior relação com fatores do ambiente (recursos) e menor com tamanho e dimensão da copa. O incremento não apresentou correlação significativa com o diâmetro d, o que pode ser atribuído ao fato de que, à medida que a árvore cresce em diâmetro ao longo dos anos, também diminui seu incremento anual. Isso indica que o período de máxima produção está decrescendo devido ao processo de senescência e à redução da capacidade de vigor da árvore. Essa relação foi evidenciada por uma correlação baixa e negativa.

Importante aspecto da correlação é salientar que enquanto forma-dimensão impulsionam de forma crescente e positiva o crescimento da árvore, quando adicionamos a densidade esta mostra a aspecto inverso na dinâmica de crescimento. O número de árvores por hectare N/ha apresentou uma correlação negativa com o diâmetro à altura do peito d, com um valor de $r=-0,67$. Isso indica que um maior número de árvores está associado a um menor diâmetro das árvores, possivelmente devido à limitação do espaço lateral para o crescimento. Backes (2001) destaca que uma alta densidade pode desencadear um acentuado processo de competição intraespecífica, resultando em uma relação negativa significativa entre densidade e desenvolvimento das árvores.

Maior taxa de incremento menor a hic e maior incremento maior pc%, mostrando que copas compridas e estreitas, isto é, menor valor do fc, apresenta maior capacidade fotossintética. As características dos sítios estudados apresentam árvores de maior dimensão (30-60 cm), indicando que são árvores já estabelecidas na estrutura da floresta. Sítios com menor densidade e antropizados, maior valor do fc e redução da taxa de incremento, maior hic e maior dc.

Estes resultados explicam os menores valores de correlação com o incremento e confirmam as preocupações elencadas, manutenção e formação de uma estrutura futura destes remanescentes com araucária, ausência de regeneração, estagnação do crescimento, comprometimento da sustentabilidade, necessidade de manejo e, somente conservação não é garantia de sustentabilidade.

Dessa forma, verifica-se que, por meio da correlação, que as variáveis relacionadas à copa, como forma-dimensão influenciam no desenvolvimento e crescimento do diâmetro das árvores de *Araucaria angustifolia*.

2.5.4 Modelagem das variáveis relações forma – dimensão – densidade para *Araucaria angustifolia*

2.5.4.1 Ajuste das equações entre as variáveis dendro/morfométricas, densidade e o diâmetro à altura do peito

Com base na análise de correlação de Pearson, foram selecionadas as variáveis dendro/morfométricas para ajustar os modelos destas relações e fazer as inferências das condições atuais da estrutura dos remanescentes com araucária. A análise de covariância demonstrou a existência de diferenças entre os níveis e inclinação das linhas de regressão para as relações dendro/morfométricas, sendo assim com base na análise de covariância, houve necessidade de regressões distintas para as relações interdimensionais para os três sítios florestais de estudo.

Conforme a Tabela 5, as equações ajustadas e que obtiveram acurácia e precisão de ajuste foram aquelas que apresentaram como variável dependente o diâmetro de copa (equação 24), na distribuição Gama para todos os sítios e função identidade (μ) para os sítios I e II (URB) e logarítmica $\ln(\mu)$ para o sítio III (BRT), com menores valores de AIC, BIC e desvio. Os modelos de 24 a 27 foram usados para a relação entre a forma-dimensão e densidade relacionados diretamente à estrutura e à dinâmica da floresta.

De acordo com Contreras et al., (2011), a distribuição Gama oferece grande potencial para a modelagem de dados contínuos que apresentam superdispersão e, portanto, heterogeneidade de variância. É justificável o seu uso para gerar estimativas com acurácia, e eficiência comprovada para análise de dados não negativos e de natureza contínua conforme relata Hess et al., (2015).

Tabela 5 - Coeficientes e critérios de precisão das equações para as variáveis dendro/morfométricas e densidade de araucária em três sítios no sul do Brasil.

Sítio	Eq.	Modelos	Coeficientes		D	AIC	BIC	FL
			$\beta 0$	$\beta 1$				
I (URB)	24	dc(f)d	2,4126	0,2015	0,8	141,7	146,8	μ
	25	asc(f)d	-40,4527	5,0757	5,8	421,1	426,2	μ
	26	vc(f)d	-6,4537	0,7135	10,6	279,2	284,3	μ
	27	N/ha(f)d	6,0612	-0,0413	6,8	409,1	414,2	$\ln(\mu)$
II (URB)	24	dc(f)d	1,6129	0,2248	0,4	103,7	107,9	μ
	25	asc(f)d	-58,3626	5,1597	3,5	315,7	319,9	μ
	26	vc(f)d	-7,3520	0,6416	8,1	211,4	215,6	μ
	27	N/ha(f)d	6,2282	-0,0446	3,8	294,1	298,3	$\ln(\mu)$
III (BRT)	24	dc(f)d	1,5278	0,0176	0,3	99,7	103,9	$\ln(\mu)$
	25	asc(f)d	3,0153	0,0363	1,7	287,0	291,2	$\ln(\mu)$
	26	vc(f)d	-6,5687	0,3871	8,3	189,1	193,3	μ
	27	N/ha(f)d	6,2432	-0,0361	1,7	277,1	281,3	$\ln(\mu)$

Em que: URB: Urubici, SC; BRT: Bom Retiro, SC; (f): em função; $\beta 0$: Coeficiente linear; $\beta 1$: Coeficiente angular; D: Deviance; AIC: Critério de informação de Akaike; BIC: Critério de informação de Bayesiano; FL: Função de ligação identidade (μ), e logarítmica ($\ln(\mu)$) e componente aleatório Gama. Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A acurácia do ajuste de modelos com MLG foi avaliada pelos critérios do Akaike (AIC), Bayesiano (BIC), Desvio, e análise gráfica dos resíduos, sendo que, quanto menor esses valores, melhor o ajuste do modelo (Turkaman e Silva, 2000). Conforme a Tabela 5, todos os modelos ajustados demonstram precisão ao gerar previsões em termos da necessidade de manejo da estrutura florestal. Os modelos foram empregados para demonstrar a relação entre forma – dimensão - densidade, a qual está relacionada à estrutura e dinâmica da floresta.

Um volume e superfície de copa mais elevados estão vinculados à competição, idade das árvores, densidade, estrato ou posição na copa, e características ontogenéticas da espécie. Essas variáveis também se correlacionam com a capacidade fotossintética, crescimento e produção florestal.

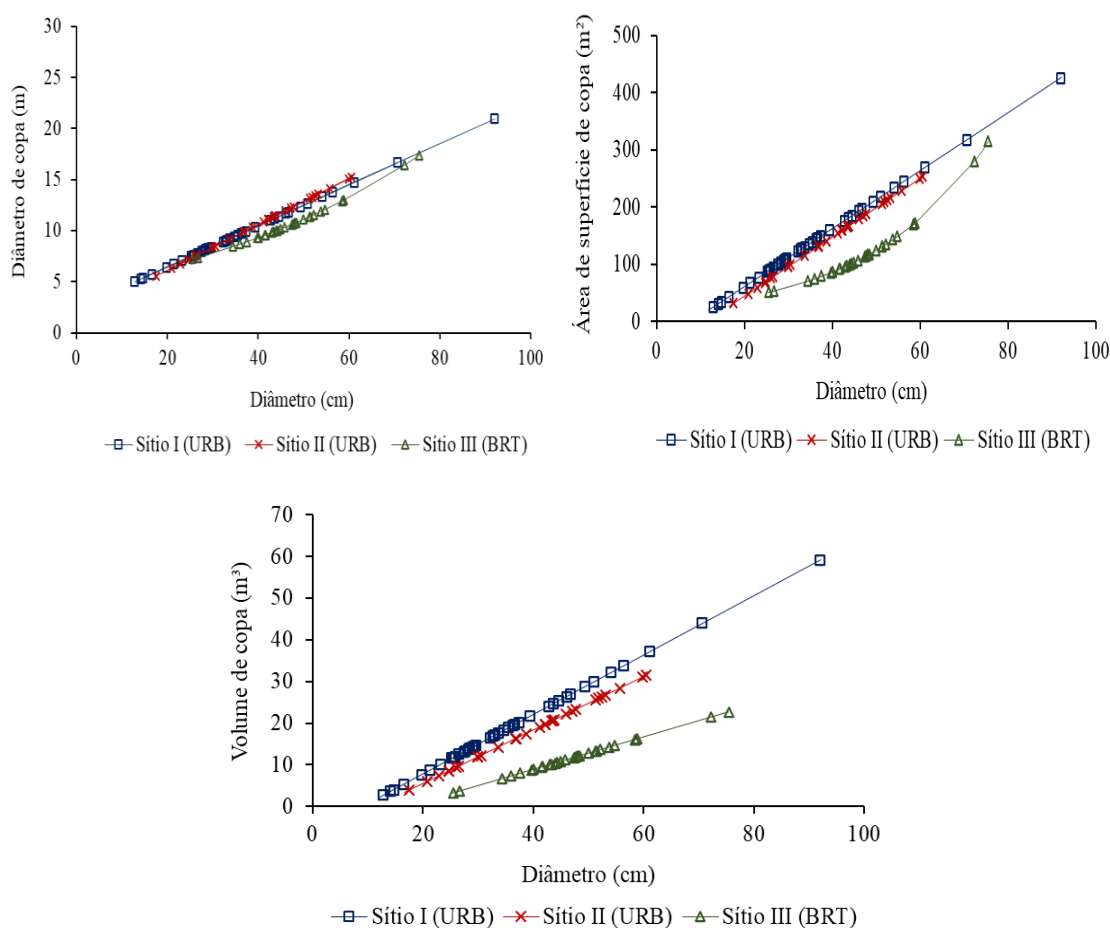
A equação ajustada e que teve melhor acurácia e precisão de ajuste foi a que apresentou como variável dependente o diâmetro de copa, com menores valores de AIC, BIC e desvio para todos os sítios de estudo, nas distribuições Gama e funções de ligação identidade (sítio I e II) e logarítmica (sítio III). O sítio III apresentou ajuste com menores valores de erro, seguido do sítio II e I. As equações para estimar o diâmetro de copa em função do d foram: $dc = 2,4126 + 0,2015 \cdot d$ (sítio I), $dc = 1,6129 + 0,2248 \cdot d$ (sítio II) e $dc = 1,5278 + 0,0176 \cdot d$ (sítio III).

O diâmetro está intimamente ligado à arquitetura da copa, uma vez que a copa é incumbida pelos processos fisiológicos responsáveis pelo crescimento das árvores. A

relação crescente das variáveis com o d, indica necessidade de espaço lateral de crescimento, pois à medida que as árvores se desenvolvem em diâmetro, a copa também deve acompanhar o crescimento (Costa et al., 2014).

Para avaliar o comportamento dos dados traçou-se a linha estimativa da variável dependente, para cada relação avaliada e para cada sítio de estudo (URB e BRT), as distribuições são apresentadas na Figura 15.

Figura 15 - Dispersão dos valores ajustados pelos modelos das relações diâmetro de copa, área de superfície de copa e volume de copa com o diâmetro a altura do peito de *Araucaria angustifolia* para os três sítios no sul do Brasil.



Em que: Diâmetro: Diâmetro à altura do peito a 1,30 cm do solo; URB: Município de Urubici, SC e BRT: Município de Bom Retiro, SC. Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Com base na Figura 15 as inter-relações entre diâmetro de copa, superfície de copa e volume de copa são sempre crescentes, porém, dependem da densidade, da competição, da posição sociológica que ocupa no estrato da floresta, a estrutura da floresta, a disponibilidade de recursos, o local e as ações de manejo florestal.

O comportamento das linhas dos valores ajustados apresentou resultados sem tendência discrepantes, portanto, as estimativas realizadas por meio dos modelos possuem acurácia. Dessa forma, verifica-se uma forte relação linear entre o diâmetro a altura do peito e as relações forma – dimensão sendo todas relações positivas. Essas variáveis aumentam à medida que aumenta o diâmetro, como indicativo à necessidade de condução da densidade de árvores por hectares para os sítios amostrados. Ricken et al., (2020) em estudo sobre a morfometria de árvores de araucária, verificaram que o d obteve uma alta correlação com o diâmetro de copa, sendo esse um fator muito importante para a estimativa de produção em araucárias, sendo o mesmo resultado encontrado por Silva et al., (2017) e Nutto (2001).

O diâmetro (d) pode ser utilizado em modelo linear simples para descrever o diâmetro de copa, uma vez que este modelo é o mais indicado para explicar a relação seja para árvores de crescimento livre ou para árvores da floresta (Costa et al., 2018). O sítio III mostra uma proporção e desenvolvimento mais significativos na estrutura da copa, caracterizado por árvores de maior idade e menor densidade por superfície. Em contraste, os sítios I e II apresentam maior densidade, resultando em menor plasticidade no desenvolvimento da copa. A aplicação de equações ajustadas permite gerar conhecimento sobre a necessidade de manejo florestal, uma vez que as condições atuais da floresta indicam a formação de uma estrutura mais regular, com um maior número de árvores, volume e superfície de copa, associados a uma menor taxa de incremento, maturidade, senescência, ingresso e regeneração natural.

A relação dimensão-crescimento ($d-c$) é a inclinação da regressão linear entre o crescimento proporcional do povoamento e o tamanho proporcional da árvore. Um valor de $d-c = 1$ indica que o crescimento da árvore é proporcional ao tamanho e que o crescimento do tamanho é perfeitamente simétrico; $d-c > 1$ indica que o tamanho é assimétrico e que a taxa de crescimento de uma árvore grande é muito alta; $d-c < 1$ indica que a taxa de crescimento de uma árvore grande é muito baixa; e $d-c \approx 0$ indica que o crescimento das árvores é absolutamente igual, independentemente do tamanho (Metsaranta, JM et al., 2008; Metsaranta, JM et al., 2010).

Nesse estudo os valores de β_1 (inclinação) dos modelos ajustados, nos três sítios, para a relação forma – dimensão - crescimento, ($dc - d$) apresentou valores <1 , ou seja, indicando que a taxa de crescimento de uma árvore grande é muito baixa. Para a área de superfície de copa, os valores da inclinação na regressão foram >1 para os sítios de Urubici (I e II), ou seja, indica que o tamanho é assimétrico e que a taxa de crescimento

de uma árvore grande é muito alta, para Bom Retiro (sítio III) apresentou valor <1 . Para a relação $vc-d$ os valores foram <1 , para os três sítios, indicando a taxa de crescimento de uma árvore grande é muito baixa.

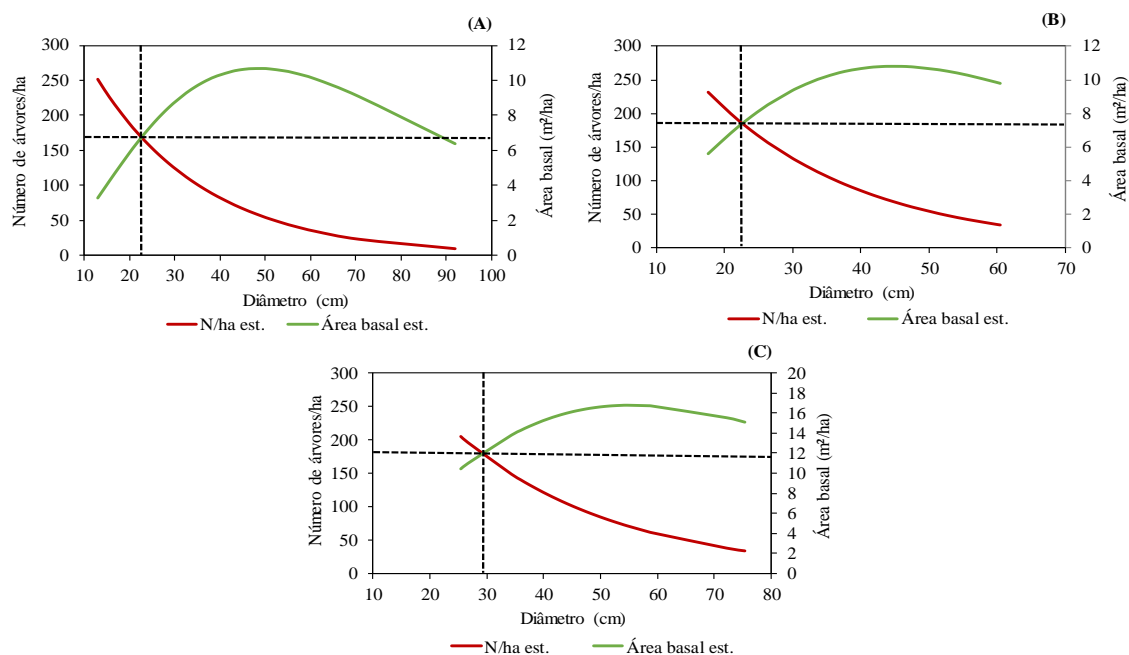
Dessa forma, o nível de árvore individual é o mais adequado para entender a concorrência, redução da concorrência por meio da complementaridade e da facilitação, o que pode resultar em diferenças entre a dinâmica da estrutura e produtividade (Pretzsch, H., 2017). Essa informação também é importante para o planejamento de intervenções silviculturais e gestão dos recursos florestais, havendo necessidade de redução da competição, manutenção da taxa de incremento e crescimento para continuidade da espécie.

Parâmetros de copa, como volume, forma da área de superfície, têm estado na vanguarda do interesse de muitos pesquisadores de ecologia florestal e silvicultores por muitos anos (Krucek, M et al., 2019). A plasticidade da forma da copa das espécies arbóreas é resultado de sua estratégia de sobrevivência, e o deslocamento e assimetria da copa são meios comuns de evitar vizinhos devido à competição (Seidel, D. et al., 2011).

Portanto, o crescimento das árvores depende da disponibilidade de recursos, da proporção de recursos adquiridos e da eficiência com que esses recursos são utilizados, esse estudo mostra que as interações das espécies podem influenciar cada uma das variáveis estudadas, essas interações são dinâmicas e mudam espacial e temporalmente conforme a disponibilidade de recursos, sendo assim importante entender os processos ao manejar povoamentos de espécies mistas e modelá-los (Forrester, D.I., 2017).

A Figura 16 ilustra os ajustes das equações para a densidade de árvores por hectare e área basal, indicando uma relação inversamente proporcional. À medida que o número de árvores por hectare diminui com o aumento do diâmetro, a área basal aumenta. Essa informação pode servir como referência para o planejamento de intervenções silviculturais, permitindo a redução da densidade dos povoamentos e contribuindo para o gerenciamento eficaz das florestas, visando a conservação da espécie e o desenvolvimento socioeconômico da sociedade.

Figura 16 - Relação da densidade de árvores e área basal por hectare em função do diâmetro a altura do peito como indicativo para o manejo florestal para os três sítios de estudo no sul do Brasil. (A) URB; (B) URB; (C) BRT.



Em que: N/ha: número de árvores por hectare; est.: valor estimado. O cruzamento indicado pelas linhas pontilhadas indica o momento para intervenção e manejo para a conservação da espécie. Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Conforme a Figura 16 acima, a densidade e a relação de dimensão são inversamente proporcionais, indicando que quanto maior a dimensão, menor o número de árvores por hectare e maior a produção em área basal. Os três diferentes sítios, apresentaram valor de área basal baixo com valores abaixo do recomendado (25 m²/ha), isso se deve ao baixo número de árvores por hectare no qual resulta em menor quantidade de área basal, sendo necessário manejo adequado para as áreas de floresta com araucária. Deve-se enfatizar que o conhecimento do potencial produtivo desse ecossistema florestal é essencial para seu uso sustentável (Padilla-Martínez et al., 2020).

Para a definição da densidade máxima de indivíduos por hectare, pode ser utilizada a intersecção das linhas, ou seja, o ponto em que a área basal e o número de árvores por hectare com o diâmetro se encontram. O cruzamento indicado pelas linhas pontilhadas indica o momento para intervenção e do manejo para conservação da espécie, sendo no sítio I (URB) quando atingir 21 cm de diâmetro e +/- 7 m²/ha e 160 árvores/ha, no sítio II (URB) 25 cm de diâmetro e 8 m²/ha de área basal com 160 árvores/ha, e para o sítio III (BRT) +/- 28 cm de diâmetro e 12 m²/ha de área basal com 200 árvores por hectare. Ao analisar a relação com a dinâmica e o crescimento da floresta, é viável

estabelecer um valor limite para a relação entre as variáveis, que indica a intervenção silvicultural necessária na área em que garantirá a estabilidade e a vitalidade das árvores.

2.5.5 Levantamento e processamento dos Pontos de Controle (GCPs)

Os pontos de controle do terreno - *Ground Control Points* (GCPs) distribuídos pelas áreas foram processados em coordenadas UTM no Datum SIRGAS 2000 Zona 22S, para os três sítios florestais de estudo. Na Tabela 6, constam as coordenadas geográficas dos 4 pontos para o sítio I (URB), 4 pontos para o Sítio II (URB) e os 5 pontos de controle para o Sítio III (BRT). Os pontos de controle foram identificados pelo receptor (Rover - Móvel) aparelho de campo, como GPS e seguido da numeração correspondente, sendo o ponto GPS0001 a Base fixa receptora de sinais.

Tabela 6 - Localização geográfica dos pontos de controle (GCP) distribuídos em cada área e precisão após processamento para os três sítios florestais no sul do Brasil.

Pontos (GCPs) ¹	Coordenadas UTM			Precisão ⁵ (m)
	Easting ² (m)	Northing ³ (m)	Altitude ⁴ (m)	
SÍTIO I (URB)				
GPS0002	637510,964	6896147,867	1325,214	0,0002
GPS0003	637535,227	6896251,979	1311,128	
GPS0004	637444,541	6896388,438	1311,893	
GPS0005	637383,525	6896352.710	1311,883	
SÍTIO II (URB)				
GPS0006	636439,839	6895578,516	1365,159	0,0002
GPS0007	636451,183	6895501,701	1368,345	
GPS0008	636391,178	6895496,245	1352,655	
GPS0009	636343,134	6895431,863	1339,667	
SÍTIO III (BRT)				
GPS0002	623461,478	6936238,184	917,219	0,0001
GPS0003	623506,514	6936325,649	911,552	
GPS0004	623607,112	6936343,501	901,898	
GPS0005	623681,762	6936320,432	887,029	
GPS0006	623682,295	6936209,397	881,151	

Em que: ¹ GCPs: *Ground Control Points*; ² (E): Leste-Oeste; ³ (N) Norte-Sul; ⁴ Representada pela letra (h);

⁵ Precisão pós-processamento. Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Várias pesquisas em aplicações de geociências estudaram o efeito da variação do número de GCPs na precisão de produtos digitais cartográficos. Rangel, Gonçalves e Pérez (2018) concluíram que os GCPs colocados nas fronteiras externas melhoram a precisão planimétrica e os GCPs colocados no interior da área pesquisada melhoram a precisão altimétrica. As experiências que utilizam mais de 20 GCPs mostram que o aumento do número de GCPs não representa necessariamente uma melhoria na precisão. Aumentar o número de GCPs de 5 para 10 não apresenta melhora significativa como aumentar de 3 para 5. Pessoa et al., (2020). De acordo com Jensen (2011) a precisão planimétrica adquirida garante o uso da ortoimagem como mapa para realizar medições confiáveis de localização, distâncias, ângulos e áreas.

Na Tabela 7 contém as informações de erros médios planimétricos e altimétricos dos pontos de controle em diferentes alturas e para cada sítio de estudo, fornecida pelo relatório de processamento do programa *Agisoft Metashape Professional* v.1.6.4.

Tabela 7 - Informações de erros médios planimétricos e altimétricos dos pontos de controle gerados pelo VANT, em diferentes alturas de 60, 80 e 120 metros para os três sítios florestais no sul do Brasil.

Altura (m)	Número	Erro (mm)			RMSE ⁵	Imagem ⁶ (pix)
	Pontos ¹ (GCPs)	Easting ² (X)	Northing ³ (Y)	Altitude ⁴ (Z)	Total (mm)	
SÍTIO I (URB)						
60	4	0,0220	0,0171	0,1175	0,1208	1,427 (140)
80		0,0171	0,0075	0,1120	0,1135	1,103 (140)
120		0,0121	0,0037	0,0601	0,0614	1,036 (123)
SÍTIO II (URB)						
60*	4	0,2157	0,1231	1,3347	1,3576	2,018 (185)
80		0,0384	0,0135	0,1575	0,1627	1,291 (141)
120		0,0125	0,0083	0,0562	0,0582	1,052 (169)
SÍTIO III (BRT)						
60*	5	1,0146	0,5783	0,8314	1,4336	3,140 (243)
80*		1,1760	0,9633	0,5535	1,6178	2,000 (226)
120*		0,9476	0,6402	0,2365	1,1678	1,169 (50)

Em que: *Erro em centímetros. ¹ GCPs: *Ground Control Points*; ² (E): Leste-Oeste; ³ (N) Norte-Sul; ⁴ Representada pela letra (h); ⁵ RMSE: Raiz do erro quadrático médio; ⁶ Número de projeções nas imagens.
Fonte: *Agisoft Metashape Professional* v.1.6.4.

Com base na Tabela 7 os resultados mostrados foram satisfatórios, de acordo com a norma de georreferenciamento do Incra nº 2 de 19, de fevereiro de 2018, com utilização de drones, em imóveis rurais. Os erros planimétricos são representados pela letra (X e Y) e altimétricos por (Z). O erro (X) se refere na coordenada horizontal e o erro (Y) na coordenada vertical em um sistema de referência geoespacial.

No sítio I o menor valor de erro para os 4 pontos de controle, foram na altura de 120 m com menores valores de erro planimétrico e altimétrico, o mesmo obteve menor número de projeções nas imagens. As demais alturas de voo, obteve maior valor de erro em comparação a 120 m, com maior número de projeções de imagens. No sítio II a altura de 60 m obteve maior valor de erro tanto planimétrico como altimétrico, o que se justifica pela topografia do local ser mais acentuada em comparação a demais áreas, com RMSE total = 1,3576 cm. No sítio III o maior valor de erro RMSE total foi de 1,6178 cm na altura de 80 m, porém na altitude (Z) o erro foi menor em comparação a 60 m e maior em comparação a 120 m. Apesar desses valores serem superiores em alguns locais e alturas de voo, ainda são considerados pequenos em comparação com os padrões gerais de mapeamento.

O RMSE total foi menor para todos os sítios na altura de 120 m. Com relação ao erro total, que é a composição do erro planimétrico e altimétrico, há um padrão nítido no qual a altura de voo influencia na precisão segundo os autores Patricio Martínez-Carricondo, Francisco Agüera-Vega & Fernando Carvajal-Ramírez (2023).

Os erros na coordenada horizontal (X), podem estar associados a diversos fatores, tais como a precisão do georreferenciamento, erros de distância e sobreposição de imagens e a distância focal da câmera. Já os erros na coordenada (Y) pode ser associado a erros de altitude, precisão em termos de elevação e às características topográficas do terreno. A verificação meticulosa desses parâmetros é crucial para atenuar potenciais problemas futuros.

Para reduzir erros nas coordenadas horizontais e verticais durante o mapeamento com VANT, é essencial selecionar equipamentos apropriados, implementar boas práticas de campo e adotar técnicas avançadas de processamento. Essas medidas são cruciais para alcançar baixos índices de erro, como demonstrado neste estudo. Udin e Ahmad (2014) analisaram a influência de quatro alturas de voo diferentes para gerar MDSs e Orthomosaicos, as experiências utilizaram 10 GCPs e os resultados mostram que a precisão planimétrica não é afetada pelo aumento da altura, embora a precisão altimétrica diminua à medida que a altura aumenta.

Dessa forma, constatou-se que os dados apresentaram precisão e acurácia compatíveis com o trabalho de Boa Morte (2018), podendo-se concluir que a qualidade dos dados está satisfatória para os propósitos desse estudo. Agüera-Veja, Carvajal-Ramírez e Martínez-Carricondo (2017) analisaram 3 combinações de GCPs (3, 5 e 10) em diferentes áreas e com diferentes alturas de voo, e um total de 60 processamentos fotogramétricos diferentes foram realizados. Os resultados dos experimentos mostram que o terreno mais plano pesquisado na menor altura (50 m) e 10 GCPs alcançou a maior precisão, com um RMSE de 0,038 m, 0,035 m e 0,035 m, para X, Y e Z, respectivamente. Przybilla et al., (2019) concluíram que o levantamento em duas alturas diferentes aumenta a precisão ao realizar a auto calibração no local de trabalho, especialmente para o componente Z.

2.5.6 Processamento Digital de Imagens (PDI)

Além da precisão altimétrica e planimétrica, é importante analisar o consumo de tempo gasto para gerar os produtos finais como a nuvem de pontos e o ortomosaico nas diferentes alturas de sobrevoo. Para esta análise, foi concebido uma comparação na Tabela 8, com as seguintes informações: área (ha), resolução (cm/pix), número total de imagens, número de pontos gerados pela nuvem densa, área de cobertura da imagem (m²), tempo de voo realizado no campo pelo VANT e tempo de processamento total realizado no laboratório no programa *Agisoft Metashape Professional* v.1.6.4.

Tabela 8 - Informações de processamento digital de imagens em diferentes alturas de sobrevoo de 60, 80 e 120 metros em três sítios florestais no sul do Brasil.

Altura (m)	Área (ha)	Resolução GSD ¹ (cm/pix)	Nº de Imagens	Nº de Pontos ²	Cobertura Imagem (m²)	Tempo de Voo ³	Tempo Processamento Total ⁴
SÍTIO I (URB)							
60	5,22	1,95	370	673.156,383	141,04	17 min 17s	8h 2 min e 14s
80		2,61	242	476.919,557	215,64	11 min 30s	5h 29 min e 9s
120		3,79	113	276.447,33	461,82	7 min 00s	2h 1 min e 48s
SÍTIO II (URB)							
60	4,78	2,07	355	715.578,584	134,70	16 min 41s	9h 3 min e 3s
80		2,68	216	430.112,149	221,37	10 min 30s	5h 0 min e 24s
120		3,89	114	253.064,726	419,45	6 min 50s	2h 22 min e 22s
SÍTIO III (BRT)							
60	5,80	2,23	409	901.050,464	141,92	18 min 37s	10h 8 min e 18s
80		2,83	255	585.380,090	227,63	13 min 13s	5h 13 min e 50s
120		4,09	131	340.377,499	443,10	8 min 42s	2h 53 min e 58s

Em que: ¹ *Ground Sample Distance*; ² *Dense Cloud*; ³ Atividade em campo VANT; ⁴ Laboratório Agisoft *Metashape Professional* v.1.6.4. Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Na Tabela 8 mostra que quanto mais baixa a altura de voo mais imagens são geradas com menor resolução de *Ground Sample Distance* e menor área de cobertura da imagem e por consequência maior número de pontos na nuvem densa e maior tempo de voo no campo realizado pelo VANT e no processamento digital das imagens. Udin e Ahmad (2014) e Agüera-Veja (2017b) constam que aumentar a altura de voo e manter uma distância focal fixa leva a uma perda de resolução espacial, por outro lado, são necessárias menos imagens para mapear a mesma área.

O tamanho da área deve ser levado em consideração visto que, para a altura de 60 m, no sítio I o tempo de processamento total dos produtos finais foi de 8h 2 min e 14s, e para o sítio III sendo este com maior tempo de processamento das imagens em comparação aos demais foi de 10h 8 min e 18s, onde a área do sítio III é maior com 5,80 hectares em relação a área de 5,22 hectares do sítio I. Outra razão a ser analisada além do tamanho da área é o número de pontos gerados, onde no sítio II para a altura de 60 m, o número de pontos foi de 715.578,584 pontos no qual levou 9h 3 min e 3s para o processamento total no que se refere a 673.156,383 pontos do sítio I, ou seja, o sítio II apresentou maior número de pontos na nuvem densa com área menor de 4,78 hectares.

A Tabela 8 destaca que maior número de pontos resulta em mais tempo gasto de processamento devido ao alto volume de dados sendo processado e maior qualidade do

mapeamento. De maneira geral, o tamanho do GSD de um levantamento, é inversamente proporcional ao nível de detalhamento atingido, porém GSDs menores irão exigir maior quantidade de imagens, maior tempo de voo e maior capacidade de processamento, para mapear uma área de mesmas dimensões, do que um GSD maior, como indica Silva Neto (2015). O resultado de utilizar mais imagens com entrada é um número maior de pontos na nuvem de pontos, sendo estes considerados homólogos visíveis a partir de mais imagens e, conseqüentemente, mais pontos de amarração são gerados e utilizados no processo de fototriangulação (Garcia e Oliveira, 2021).

Frey et al., (2018) confirmaram que tanto a altitude quanto a sobreposição de imagens estão relacionadas à precisão da nuvem de pontos resultante (o melhor cenário é 95% de sobreposição de imagens com um GSD menor que 5,0 cm), o que é semelhante aos resultados obtidos por (Dandois, Olano e Ellis, 2015). O tempo de voo, tem uma relação direta com a altura de voo estabelecida, uma vez que em menores alturas, maior quantidade de imagens será necessária para cobrir uma área com mesma extensão, como estabelece Coelho e Brito (2007).

A Tabela 9 contém os dados de densidade de pontos por m² realizada automaticamente no software *Cloud Compare* v2.13 alpha. As alturas de 60 m apresentaram densidade de pontos maior assim como o desvio padrão maior, ou seja, não apresentou uniformidade em relação a média de pontos/m².

Tabela 9 - Densidade de Nuvem de pontos geradas pelo software *Cloud Compare* v2.13. alpha.

Densidade de Nuvem de Pontos (<i>Dense Cloud</i>)			
SÍTIO I – Urubici/SC			
Alturas de voo	60 m	80 m	120 m
Média (pontos/m ²)	3803,60	1971,78	873,76
Desvio padrão (pontos/m ²)	1659,57	760,15	297,95
SÍTIO II – Urubici/SC			
Alturas de voo	60 m	80 m	120 m
Média (pontos/m ²)	4091,05	1959,82	848,05
Desvio padrão (pontos/m ²)	1865,76	739,35	274,01
SÍTIO III – Bom Retiro/SC			
Alturas de voo	60 m	80 m	120 m
Média (pontos/m ²)	3775,96	1837,37	774,15
Desvio padrão (pontos/m ²)	1745,14	740,04	250,67

Fonte: *Cloud Compare* v2.13 alpha.

Na Tabela 9 mostra que quanto maior a quantidade de pontos geradas na nuvem de pontos, maior será a densidade e mais detalhes exibidos nas imagens. Isto é, na densidade das informações onde a posição relativa de cada fotografia é construída, possibilitando determinação da informação de modo a representar melhor a área mapeada, seja para área urbana ou rural (Alves e Gomes, 2022).

2.5.7 Comparação dos dados Convencionais vs Fotogrametria

Com a variável diâmetro de copa (dc) foi testada a normalidade de distribuição da variável, ou seja, a diferença entre os valores dos dados de diâmetro de copa aferido pelo método convencional a campo e pela fotogrametria obtidos das alturas de (60, 80 e 120 m), se atendia o pressuposto de distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk com valor igual ou superior a 5% de significância. Com o teste de Shapiro-Wilk foi possível observar que as diferenças dos dados não atendiam o pressuposto de distribuição normal, a significância do teste apresentou o p -valor menores que 0,05 ($p < 0,05$) para todos os sítios de estudo e respectivas alturas, exceto para o sítio I (URB) com a altura de 120 m apresentou p -valor maior que 0,05, porém não atendeu outro pressuposto no qual a diferença dos dados deve conter ausência de *outliers*, logo o teste paramétrico não foi adotado para este estudo e sim o teste não paramétrico com avaliação das medianas.

Dessa forma, para comparar as medianas do diâmetro de copa para as árvores de araucárias, foi utilizado o teste de Wilcoxon para testar as medianas do diâmetro de copa mensurado a campo pelo método convencional com o diâmetro de copa medido na imagem com as três alturas distintas separadamente, o teste de Wilcoxon é um teste não paramétrico para variáveis contínuas e dependentes, quando se deseja comparar duas amostras em par, ou seja, emparelhadas como é a condição desse estudo (Nienov, Edison, 2020).

Na Tabela 10, 11 e 12 consta a comparação entre os dados de diâmetro de copa obtidos de modo convencional e por Fotogrametria nas diferentes alturas de 60, 80 e 120 m para os três sítios de estudo, sítio I, II e III (URB e BRT) e os valores do teste de Wilcoxon representado pelo p -valor como também a estatística descritiva como a média, mediana, desvio padrão, valores mínimo e máximo.

Tabela 10 - Comparação dos dados da variável diâmetro de copa aferidos pelo método convencional e por Fotogrametria nas alturas distintas de 60, 80 e 120 m, no sítio I, no município de Urubici/SC.

SÍTIO I (URB)				
Diâmetro de copa (m)				
Árvore (n)	Método Convencional (m)	Fotogrametria		
		60 m	80 m	120 m
1	6,60	6,75	6,36	6,06
2	11,85	12,25	11,50	11,13
3	24,85	25,11	24,91	24,36
4	10,65	11,14	10,31	10,11
5	9,65	9,97	9,30	8,93
6	5,15	5,62	4,96	4,86
7	7,75	8,00	7,53	7,40
8	12,35	12,85	11,98	11,73
9	8,85	9,10	8,52	8,40
10	15,25	15,65	14,92	14,81
11	8,65	9,02	8,28	8,10
12	17,80	17,85	17,46	17,60
13	14,75	14,98	14,42	14,46
14	9,60	9,76	9,48	9,21
15	5,30	5,90	4,97	4,84
16	9,55	10,00	9,20	8,91
17	8,45	8,61	8,02	7,80
18	9,65	9,82	9,31	8,95
19	11,75	11,77	11,54	11,25
20	10,05	10,33	9,71	9,38
21	6,80	7,43	6,46	6,18
22	5,40	5,50	5,34	5,13
23	12,00	12,17	11,44	10,94
24	7,45	7,61	7,10	6,84
25	4,60	4,87	4,27	4,02
26	13,45	13,67	13,14	12,85
27	10,05	10,39	9,70	9,35
28	9,95	10,03	9,77	9,63
29	6,80	6,88	6,44	6,10
30	8,70	8,75	8,30	8,03
31	9,95	10,13	9,56	9,27
32	8,20	8,37	7,96	7,66
33	10,80	10,86	10,40	10,31
34	9,40	9,47	9,07	8,81
35	9,25	9,30	9,06	8,80
36	8,20	8,50	8,05	7,86
37	7,80	7,83	7,53	7,25
38	5,65	5,64	5,41	5,08
39	7,85	7,93	7,52	7,25
40	6,05	6,24	5,75	5,51
Média	9,67	9,90	9,37	9,13
Mediana	9,32	9,38	9,07	8,80
p-valor¹	-	<0,05*	<0,05*	<0,05*
DP²	3,77	3,77	3,79	3,78
Mínimo	4,60	4,87	4,26	4,02
Máximo	24,85	25,11	24,91	24,36

Em que: ¹:Teste de Wilcoxon (Teste não-paramétrico). Significância estatística considerada de $p \leq 0,05$; ²:Valores significativos a 0,05 para teste de Wilcoxon; ²: Desvio padrão. Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Ao analisar a Tabela 10 acima é possível observar que a média dos dados de diâmetro de copa pelo método convencional subestimou os dados de diâmetro de copa com 9,67 m em comparação aos dados da Fotogrametria da altura de 60 m com valor médio de 9,90 m, já para as alturas de 80 e 120 m o valor médio do diâmetro de copa obtidos da fotogrametria foi menor que o inventário convencional com valor de 9,37 m e 9,13 m respectivamente. O mesmo aconteceu para as medianas dos dados analisados. Para a amplitude dos dados o valor mínimo para 60 m foi maior com 4,87 m e no método convencional foi de 4,60 m, para as demais alturas os valores foram inferiores ao convencional, para os valores máximos as alturas de 60 e 80 m obtiveram valores superiores ao do método convencional, superestimando os dados. O desvio padrão, no qual se refere a dispersão dos dados em relação à média, obteve um valor de 3,77 m para o método convencional e para a altura de 60 m, para as alturas de 80 e 120 m o desvio apresentou-se com valor maior em relação ao convencional, com 3,79 m e 3,78 m.

Conforme é indicado pelo teste de hipótese, rejeita-se a hipótese H_0 de que a diferença entre as medianas do diâmetro de copa seja igual a zero (0). Ou seja, para todas as alturas de voo com p -valor inferior a 0,05, há diferença significativa nas medianas do diâmetro de copa das araucárias. Portanto, o método como é aferido os dados de diâmetro da copa (dc) faz diferença estatisticamente para o resultado que se busca, entretanto, a diferença entre as medianas não é tão expressiva, a significância pode ser justificada pelo modo de como o diâmetro da copa foi calculado nos dois métodos. No método convencional o cálculo do raio de copa médio (\bar{rc}) foi realizado pela divisão de 4 raios de copa aos pontos cardeais (N, S, L e O), e no método por Fotogrametria foi aferida pela divisão de 8 raios de copa obedecendo aos pontos cardeais (N, NE, L SE, S, SO, O e NO), onde na imagem é possível aferir com melhor visualização das perspectivas de perfil devido a árvore apresentar formato de copa irregular.

Tabela 11 - Comparação dos dados da variável diâmetro de copa aferidos pelo método convencional e por Fotogrametria nas alturas distintas de 60, 80 e 120 m, no sítio II, no município de Urubici/SC.

SÍTIO II (URB)				
Diâmetro de copa (m)				
Árvore (n)	Método Convencional (m)	Fotogrametria		
		60 m	80 m	120 m
1	7,05	7,31	6,87	6,60
2	14,00	14,31	13,66	13,31
3	13,95	14,29	13,71	13,48
4	4,75	5,02	4,50	4,24

5	9,15	9,49	8,64	8,34
6	8,45	8,80	8,19	7,87
7	6,65	6,87	6,56	6,31
8	9,65	9,97	9,47	9,25
9	6,85	7,04	6,58	6,38
10	12,90	13,14	12,57	12,28
11	12,35	12,59	12,11	11,87
12	12,20	12,54	11,83	11,59
13	16,15	16,43	15,91	15,72
14	8,45	8,69	8,14	7,93
15	12,35	12,63	11,96	11,73
16	11,80	12,07	11,36	11,02
17	13,60	13,86	13,27	12,99
18	14,50	14,87	14,17	14,04
19	9,20	9,48	8,87	8,65
20	13,55	13,74	13,18	12,90
21	10,80	11,10	10,61	10,40
22	7,75	7,98	7,19	6,98
23	8,95	9,26	8,43	8,25
24	10,00	10,29	9,51	9,31
25	7,85	8,08	7,26	6,98
26	9,05	9,41	8,68	8,36
27	11,60	11,87	11,30	11,86
28	6,25	6,78	6,82	6,68
29	9,05	9,30	8,63	8,37
30	15,20	15,46	14,83	14,55
Média	10,47	10,76	10,16	9,94
Mediana	9,83	10,13	9,49	9,28
p-valor¹	-	<0,05*	<0,05*	<0,05*
DP²	2,97	2,97	2,94	2,95
Mínimo	4,75	5,02	4,50	4,24
Máximo	16,15	16,43	15,90	15,72

Em que: ¹:Teste de Wilcoxon (Teste não-paramétrico). Significância estatística considerada de $p \leq 0,05$; *Valores significativos a 0,05 para teste de Wilcoxon; ²: Desvio padrão. Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Na Tabela 11 acima é possível observar que a média dos dados de diâmetro de copa pelo método convencional subestimou os dados com valor de 10,47 m em comparação aos dados obtidos da fotogrametria da altura de 60 m com valor de 10,76 m, já para as alturas de 80 e 120 m o valor médio do diâmetro de copa obtidos pela fotogrametria foi menor que o inventário convencional com valores de 10,16 m e 9,94 m respectivamente. O valor das medianas foi menor em relação a altura de 60 m com valor de 9,83 m e para a fotogrametria 60 m foi de 10,13 m, para as alturas de 80 e 120 m os valores de mediana foram de 9,49 m e 9,28 m. Quanto a amplitude dos dados, os valores mínimos na altura de 60 m foram maiores com 5,02 m em relação a 4,75 m do convencional, e para as demais alturas de 80 e 120 m os valores mínimos foram menores em relação ao convencional, o mesmo se aplica aos valores máximos. O desvio padrão para o método convencional e para a altura de 60 m obtiveram os mesmos valores de 2,97 m e para as alturas de 80 e 120 m apresentaram valores maiores de 2,94 m e 2,95 m.

Segundo o teste de Wilcoxon, rejeita-se a hipótese H_0 e aceita-se a hipótese alternativa, de que a diferença entre as medianas do diâmetro de copa é diferente de zero (0). Ou seja, nesse sítio para todas as alturas de voo com p -valor inferior a 0,05, há diferença significativa nas medianas da variável de análise.

Tabela 12 - Comparação dos dados da variável diâmetro de copa aferidos pelo método convencional e por Fotogrametria nas alturas distintas de 60, 80 e 120 m, no sítio III, no município de Bom Retiro/SC.

SÍTIO III (BRT)				
Diâmetro de copa (m)				
Árvore (n)	Método Convencional (m)	Fotogrametria		
		60 m	80 m	120 m
1	18,95	19,30	19,00	18,58
2	9,50	9,47	9,21	8,94
3	12,20	12,14	12,01	11,71
4	12,25	12,27	12,07	11,77
5	7,55	8,00	7,82	7,53
6	8,90	8,81	8,66	8,40
7	8,15	8,03	7,84	7,58
8	10,00	9,91	9,69	9,46
9	9,00	8,85	8,65	8,34
10	9,10	8,95	8,75	8,57
11	11,45	11,36	11,07	10,88
12	11,80	11,69	11,43	11,26
13	14,45	14,46	14,30	14,03
14	9,00	8,83	8,67	8,44
15	9,70	9,54	9,52	9,26
16	12,00	12,22	12,10	11,87
17	9,15	9,13	9,08	8,88
18	9,95	10,01	9,85	9,56
19	11,10	11,00	10,86	10,64
20	13,55	13,45	13,26	13,07
21	12,75	12,60	12,41	12,30
22	11,30	11,26	11,06	10,93
23	10,50	10,38	10,17	9,97
24	8,75	8,66	8,43	8,25
25	17,50	17,40	17,24	17,01
26	10,20	10,08	9,86	9,62
27	7,35	7,23	7,05	6,86
28	8,80	8,66	8,47	8,23
29	9,50	9,40	9,25	8,98
30	9,35	9,26	9,15	8,90
Média	10,79	10,74	10,56	10,33
Mediana	9,97	9,96	9,77	9,51
p-valor¹	-	>0,05^{ns}	<0,05*	<0,05*
DP²	2,66	2,70	2,68	2,67
Mínimo	7,35	7,23	7,05	6,86
Máximo	18,95	19,30	18,99	18,58

Em que: ¹:Teste de Wilcoxon (Teste não-paramétrico). Significância estatística considerada de $p \leq 0,05$;

*Valores significativos a 0,05 para teste de Wilcoxon; ^{ns}: Valores não significativos a 0,05 para teste de Wilcoxon; ²: Desvio padrão. Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Na Tabela 12 acima é possível observar que a média dos dados de diâmetro de copa pelo método convencional superestimou os valores com média de 10,79 m em comparação a média da fotogrametria de 60 m com valor de 10,74 m, já as demais alturas os valores da média foram menores com valores de 10,56 m e 10,33 m. Para os valores da mediana o método convencional e da fotogrametria de 60 m foram bem próximos com valores de 9,97 m e 9,96 m, para as alturas de 80 m obteve mediana de 9,77 m e para a altura de 120 m a mediana foi de 9,51 m. Quanto aos valores da amplitude dos dados, os valores mínimos para as três alturas foram menores que o método convencional com valor de 7,35 m, e para os valores máximos a fotogrametria de 60 e 80 m obtiveram valores maiores com 19,30 m e 18,99 m respectivamente em comparação ao método convencional com diâmetro de copa de 18,95 m, e para a altura de 120 m obteve menor valor com 18,58 m em relação ao medido a campo. O desvio padrão foi maior para a altura de 60 m com valor de 2,70 m em relação ao convencional com valor de 2,66 m, e para as alturas de 80 m obteve valor de 2,68 m e para 120 m valor de 2,67 m com pouca variação entre as alturas de 80 e 120 m.

Ao verificar os dados de diâmetro de copa obtidos da altura de 60 m, observa-se que não houve uma diferença significativa das medianas entre o método convencional e por Fotogrametria com p -valor maior de 5% de significância. Porém para as demais alturas de 80 e 120 m houve diferença significativa das medianas entre os dois métodos com p -valor menores que 0,05, rejeitando a hipótese H_0 de que a mediana das diferenças entre os pares é igual a zero (0) e por conseguinte aceita-se a hipótese alternativa H_1 de que a mediana das diferenças entre os pares é diferente de zero (0). Vale ressaltar, que o sítio III as árvores mensuradas estavam a maioria isoladas, ou seja, não estavam adensadas, isso resultou em uma mensuração na imagem com melhor visualização dos raios de copa, fato este que pode ser explicado ao resultado de não significância para este sítio, na altura de 60 m.

Dessa forma, é possível através dos produtos gerados, como a nuvem de pontos, mensurar medidas quantitativas com resultados próximos ao do inventário convencional.

Lima Neto et al., (2011) ao comparar área de copa da imagem vetorizada e área de copa a campo também observou que não há diferença estatística entre eles. Entretanto, as diferenças entre os valores obtidos para o parâmetro área de copa a campo e em ambiente SIG podem estar relacionadas a erros de observação e medição de ambos. O autor também ressalta que as dificuldades das medições da área de copa na imagem estão

relacionadas com a densidade do povoamento florestal, sobreposição de copas, a diferença de altura entre os indivíduos e a presença de sombras na imagem.

Na Tabela 13 contém os valores de erro absoluto em metros, com a diferença dos valores observados (campo) e estimados fotogrametria (60, 80 e 120 m) e os valores de erro da raiz quadrática média, sendo esta uma análise mais rigorosa do erro, o RMSE ao elevar ao quadrado as diferenças entre os valores reais e as estimativas penaliza os erros maiores de maneira mais significativa do que os erros menores, quanto menor for o valor de RMSE, mais precisas são as medições.

Tabela 13 - Comparação dos erros obtidos para as alturas de 60, 80 e 120 m para os três sítios de estudo nos municípios de Urubici e Bom Retiro/SC.

SÍTIO	Diferenças (m)			RMSE (m)		
	60 m	80 m	120 m	60 m	80 m	120 m
I (URB)	-0,23	0,30	0,54	0,2820	0,3160	0,5648
II (URB)	-0,29	0,31	0,53	0,2949	0,3680	0,5918
III (BRT)	0,05	0,23	0,46	0,1511	0,2708	0,4822

Em que: RMSE: Raiz do erro quadrático médio (m); Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Como mostra na Tabela 13 acima a diferença entre as medidas do diâmetro de copa mensurado a campo pelo método convencional, com o diâmetro de copa medido na imagem nas alturas de 60, 80 e 120 m representou no sítio I (URB) um erro de -0,23 m para a alturas de 60 metros, o que demonstra estatisticamente superestimativa dos dados, assim como também no sítio II apresentou superestimativa com erro de -0,29 m para 60 m, contudo se pode inferir que na imagem a visualização do raio de copa pode ser precisamente aferida, melhor que o raio de copa a campo, principalmente com copas de árvores dominantes, codominantes, sobreposição de copas, inclinação do terreno etc., o que provoca erros aleatórios. Já para o sítio III (BRT) na altura de 60 m apresentou valor de erro baixo de 0,05 m, ou seja, subestimativa, isso se explica devido no sítio III as árvores estavam crescendo de forma isoladas com grande espaçamento entre elas, facilitando nas medições da imagem, sendo este sítio com menor valor de erro em comparação aos demais sítios. As alturas de 80 e 120 m apresentaram valores mais altos das diferenças em relação à altura de 60 m.

Os valores do erro RMSE mostram que a medida que a altura de sobrevoo aumenta o erro aumenta por consequência, sendo os menores valores de erro para a menor altura do estudo de 60 m, e os maiores valores para a altura de 120 m. Entre os três sítios estudados o que obteve menor valor de erro nas medições foi o sítio III (BRT) com 0,1511

m, ou seja esse valor indica que está errando a cada medida em média 0,1511 m e para a maior altura de 120 m possui erro de 0,4822 m. Em seguida, o sítio I (URB) possui os menores valores de erro, para a altura de 60 m, erro de 0,2820 m e para a maior altura 120 m erro de 0,5648 m. E por último o sítio que obteve maior erro nas aferições foi o sítio II com valor de 0,2949 m para a altura de 60 m, 0,3680 m para a altura de 80 m e 0,5918 m para a altura de 120 m, isso pode ser explicado devido o fato de que as árvores desse sítio estão mais adensadas e em agrupamentos, o que dificultou a medições tanto no campo como nas imagens.

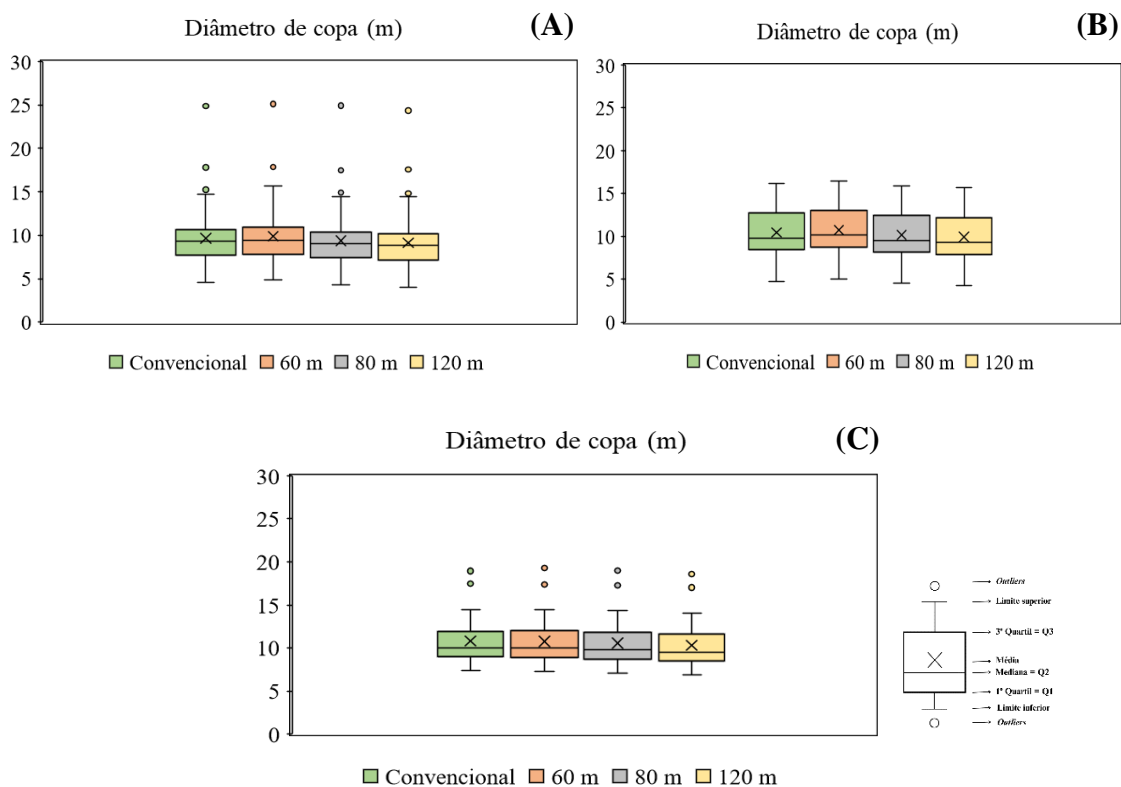
Soares et al., (2006) afirmam que existem sempre erros associados ao ato de medir um objeto. Com a realização de um inventário florestal, são realizadas diversas medições das árvores e estas medições podem estar, em maior ou menor grau, afetadas por erros. Os objetos medidos em um inventário florestal não têm forma geométrica regular definida, o que dificulta a medição exata. Outros erros são provenientes dos aparelhos de medição, que, se não forem calibrados adequadamente, podem apresentar alta amplitude de erros (Soares et al., 2006).

Mesmo com os erros existentes, a aplicação de técnicas de geoprocessamento para delineamento de geo-objetos em imagens apresenta melhor desempenho que as áreas medidas em campo (Oliveira, 1980; Lobão, 1996; Disperati; Oliveira Filho, 2005; Disperati et al., 2007a). No delineamento visual de copas de árvores e sua integração em um SIG, Oliveira Filho e Picheth (2004) afirmam que resultados satisfatórios podem ser obtidos, o que vai depender das características estruturais das florestas.

Para Sestari (2019) as principais causas de erros entre medições nos mapeamentos, são as distorções de imagens, assim como a sobreposição de copas, para o autor a quantificação de árvores por meio de imagens de VANTs têm resultados melhores, quando o dossel não está fechado completamente, ou quando as árvores estão isoladas. Na pesquisa realizada por Isbrecht et al., (2021) as medições feita em campo e por imagens de drone que determinaram a área de dosséis no Estado Paraná, obtiveram boa concordância para o teste de acurácia, e foram estatisticamente significativas, porém houve diferença nas áreas medidas em campo e classificadas no mapeamento.

Na Figura 17 contém a distribuição dos dados da estatística descritiva por meio de gráficos boxplot, que fornecem uma representação visual da distribuição de um conjunto de dados, sendo possível identificar valores *outliers* e comparar várias amostras como é o caso do presente estudo, isso permite uma rápida compreensão de como os dados são distribuídos em termos de tendência central e variabilidade.

Figura 17 - Representação da estatística descritiva da variável diâmetro de copa, mensuradas pelo método convencional e pela fotogrametria para as três alturas distintas de 60, 80 e 120 m, para cada sítio florestal de estudo nos municípios de Urubici e Bom Retiro/SC. (A) Sítio I (URB); (B) Sítio II (URB) e (C) Sítio III (BRT).



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Os resultados mostram que o sítio II (URB), tem as médias mais altas para os valores de diâmetro de copa (Figura 17B), os sítios I (URB) e sítio III (BRT) possuem médias semelhantes e mais baixas em relação ao sítio II (URB). O sítio I no município de Urubici/SC apresentou valores de diâmetro de copa acima do valor da média, ou seja, *outliers*, esses valores discrepantes indica algumas árvores que foram mensuradas que cresceram isoladas das demais, sendo assim possuem um diâmetro de copa e consequentemente um comprimento de copa mais alto, como se trata de uma medição por árvore individual, essas árvores com valores altos não foram removidas da amostra, pois caracteriza a ontogenia da espécie, o crescimento e a persistência do tamanho são os principais requisitos para que uma árvore possa competir e atingir o máximo de sua capacidade (Pretzsch, H., 2017).

Os resultados apontam a possibilidade do uso de ferramentas da geotecnologia na precisão das estimativas e modelagem de variáveis de referência na tomada de decisão do

manejo florestal, visto que o diâmetro de copa (dc) é uma variável que indica o número de árvores adequado para ocupação do espaço durante um ciclo de rotação, mantendo a taxa de incremento e disponibilidade de recursos ao crescimento.

2.5.8 Modelagem com uso de geotecnologias para diâmetro à altura do peito em função do diâmetro de copa

2.5.8.1 Modelagem dos dados de Ajustes e Validação

A Tabela 14 apresenta os valores dos coeficientes e critérios de precisão das equações de campo e imagem para o total das 100 árvores dos três sítios de estudo, onde a acurácia do ajuste foi avaliada pelos critérios estatísticos de desvio, informação de Akaike, Bayesiano e gráfico de análise dos valores estimados e observados.

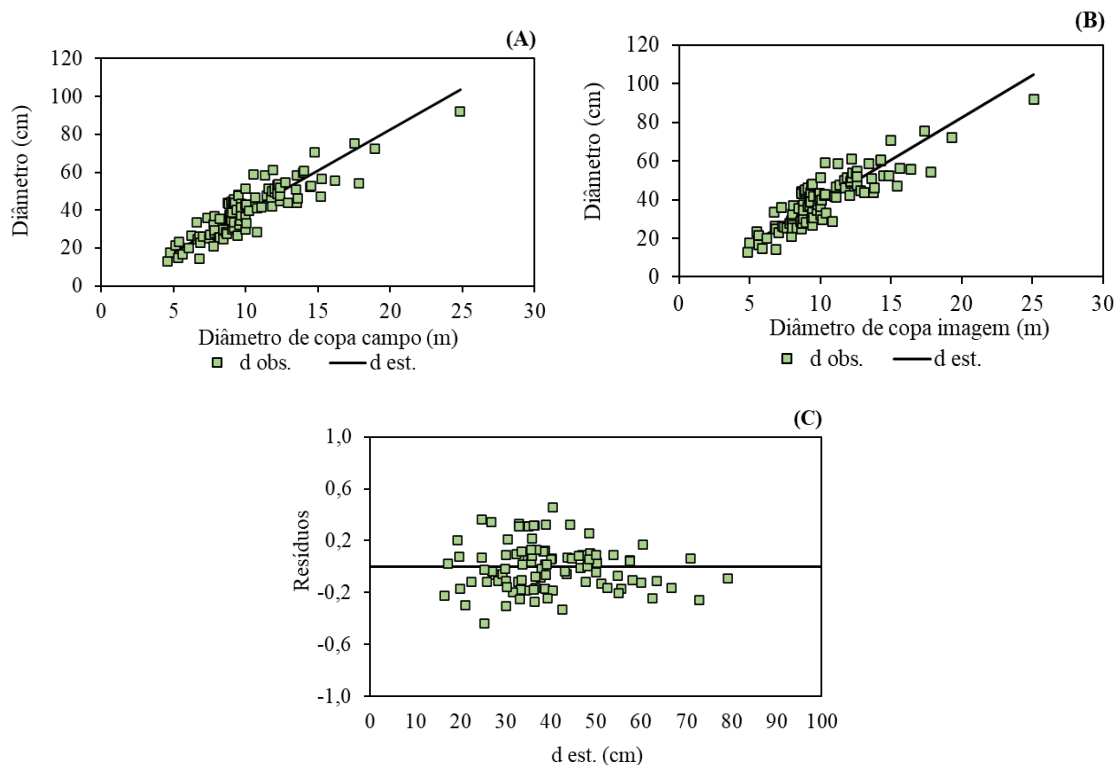
Tabela 14 - Coeficientes e critérios de precisão das equações de campo e imagem para o ajuste das 100 árvores, para os três sítios de estudo no sul do Brasil.

Dados	Alturas	Eq.	Modelos	Coeficientes		D	AIC	BIC	FL
				$\beta 0$	$\beta 1$				
Campo	-	33	$d(f)dc_{campo}$	-3,8000	4,3302	3,0	666,1	673,9	(μ)
Imagem	60 m	34	$d(f)dc_{60m}$	-4,6356	4,3456	3,3	675,0	682,8	(μ)
	80 m	34	$d(f)dc_{80m}$	-3,2823	4,4036	2,9	662,8	670,6	(μ)
	120 m	34	$d(f)dc_{120m}$	-2,3236	4,4119	2,8	661,6	669,4	(μ)

Em que: $\beta 0$: Coeficiente linear; $\beta 1$: Coeficiente angular; D: Deviance; (f): em função; AIC: Critério de informação de Akaike; BIC: Critério de informação de Bayesiano; FL: Função de ligação identidade (μ), e logarítmica ($\ln(\mu)$). Fonte: Elaborada pela autora (2023).

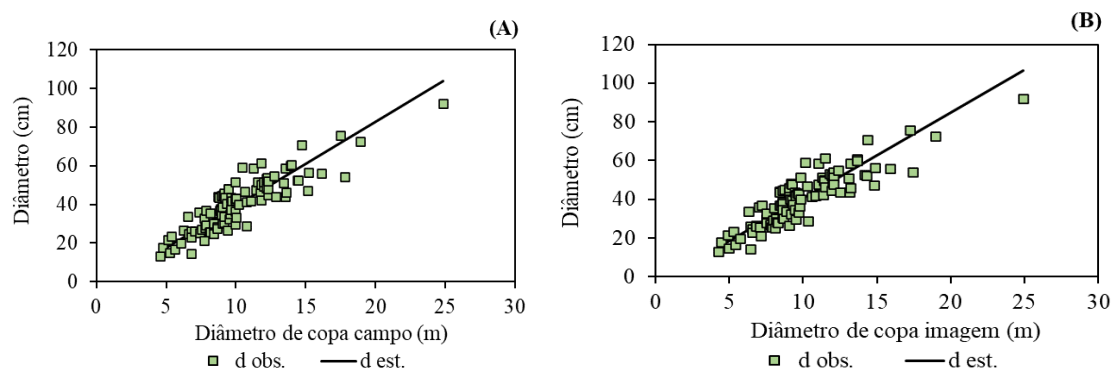
Os resultados dos critérios estatísticos mostram que é possível medir o diâmetro de copa (dc) nas imagens e estimar com precisão o diâmetro a altura do peito (d) da árvore para as distintas alturas de voo, dispensando medidas de campo como mostra as (Figuras 18, 19 e 20), pois não apresentam dispersão do ajuste para os valores observados e estimados.

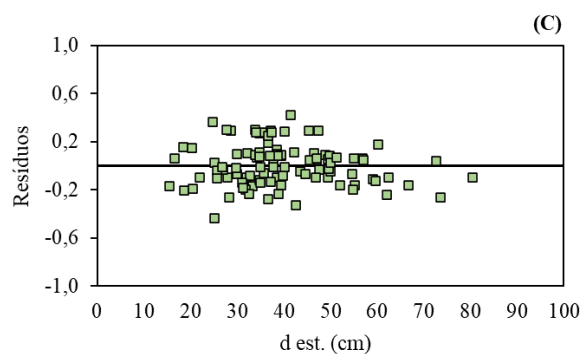
Figura 18 - Dispersão dos valores de diâmetro a altura do peito (d) em função do diâmetro de copa (dc) observado (A) e estimado para a altura de 60 m (B) o que mostra a precisão na estimativa da variável e (C) dispersão do erro entre a medida a campo e na imagem da variável d .



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

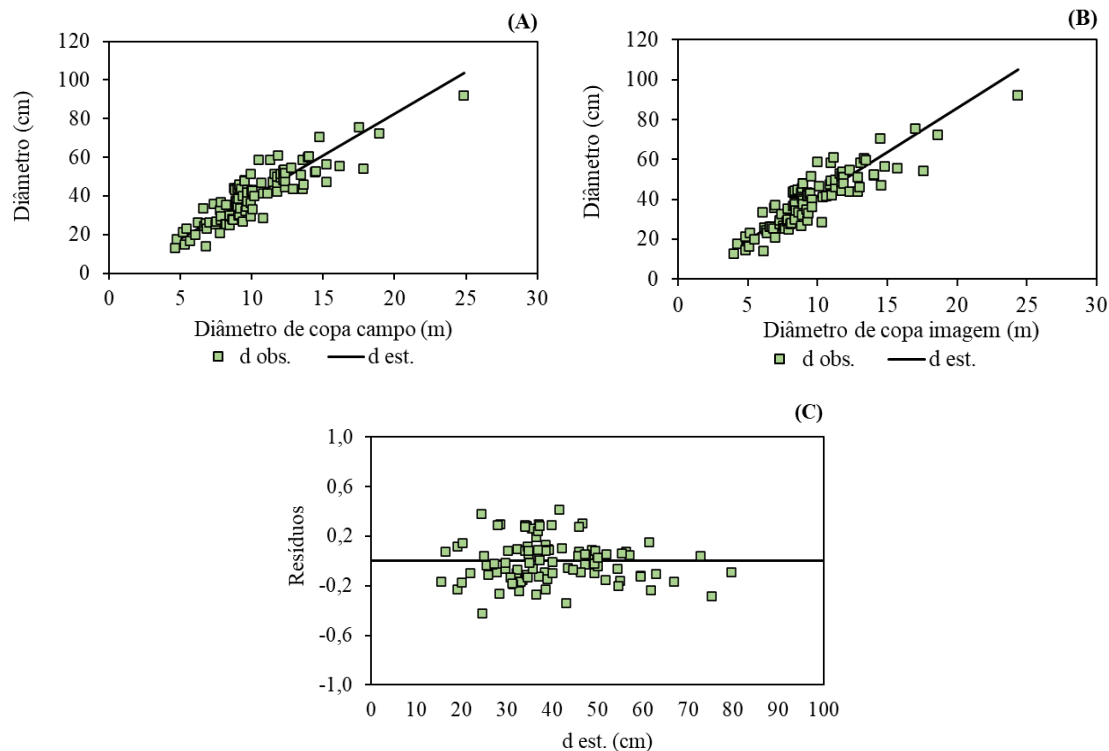
Figura 19 - Dispersão dos valores de diâmetro a altura do peito (d) em função do diâmetro de copa (dc) observado (A) e estimado para a altura de 80 m (B) o que mostra a precisão na estimativa da variável e (C) dispersão do erro entre a medida a campo e na imagem da variável d .





Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Figura 20 - Dispersão dos valores de diâmetro a altura do peito (d) em função do diâmetro de copa (dc) observado (A) e estimado para a altura de 120 m (B) o que mostra a precisão na estimativa da variável e (C) dispersão do erro entre a medida a campo e na imagem da variável d.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

2.5.8.2 Avaliação dos resíduos dos Ajustes e Validação

A Tabela 15 apresenta os valores de erros das modelagens com a técnica MLGs dos ajustes dos modelos para o campo e imagem, dos dados de ajustes (60%) e validação (40%) nos três sítios de estudo.

Tabela 15 - Erros dos resíduos padronizados e generalizados dos MLGs, dos modelos ajustados para o campo e imagem, nos dados de ajustes e validação para os três sítios de estudo.

Dados	Campo	Erros (cm)		
		Imagem		
		60 m	80 m	120 m
Ajuste (60%)	0,000002	-0,00004	-0,000001	-0,0000002
Validação (40%)	0,06	0,08	0,03	0,002

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A Tabela 15 mostra que os erros dos modelos não apresentaram diferença significativa entre as medidas do campo e na imagem. A validação dos modelos também corrobora a precisão dos modelos ajustados indicando a possibilidade do uso de ferramentas da geotecnologia na precisão das estimativas e modelagem de variáveis de referência na tomada de decisão do manejo florestal, visto que o dc é uma variável que indica ocupação do espaço e que está relacionado ao número de árvores adequado durante um ciclo de rotação, mantendo a taxa de incremento e disponibilidade de recursos ao crescimento.

2.5.9 Avaliação do tempo de medição e eficiência relativa – Diâmetro de copa

A Tabela 16 apresenta a análise estatística e a eficiência relativa dos dados de tempo máximo, mínimo, médio e total de medição nos dois métodos. O teste de Shapiro-Wilk foi aplicado para verificar se os dados possuem distribuição normal, justificando o uso do teste *t* pareado de comparação de médias. Os dados apresentaram significância de 95% de probabilidade, podendo assim realizar o teste *t* pareado.

Tabela 16 - Análise estatística dos tempos de medição em minutos/segundos, desvio padrão, coeficiente de variação, e a eficiência relativa dos dois métodos de medição, convencional e fotogrametria, para o diâmetro de copa, nos três sítios no sul do Brasil.

SÍTIO I (URB)								
Método	Máximo (min./seg.)	Mínimo (seg.)	Média (min./seg.)	Total (min./seg.)	DP (min./seg.)	CV (%)	<i>p</i> - valor ¹	ER
Convencional	02:44,35	00:56,4	01:38,5	26:16,0	0,55	40,38	0,3535	0,23
60 m	00:42,0	00:29,8	00:34,6*	09:13,3	3,21	9,28	0,5309	12,70
Fotog. 80 m	00:54,4	00:27,6	00:39,0*	10:23,6	7,30	18,75	0,2082	2,78
120 m	00:55,0	00:32,0	00:41,7*	11:08,0	6,53	15,65	0,1534	3,68
SÍTIO II (URB)								
Convencional	02:10,5	00:45,1	01:34,1	23:32,0	0,47	34,78	0,0584	0,62
60 m	00:34,8	00:25,8	00:30,4*	07:35,0	2,45	8,08	0,9872	20,80
Fotog. 80 m	00:38,0	00:28,3	00:33,3*	08:19,1	2,63	7,92	0,9469	19,45
120 m	00:43,0	00:33,0	00:38,2*	09:33,0	2,85	7,48	0,4731	19,14
SÍTIO III (BRT)								
Convencional	03:00,8	01:09,4	01:54,8	22:57,5	0,56	36,57	0,0914	0,61
60 m	00:33,4	00:25,4	00:30,2*	06:02,5	2,58	8,56	0,3889	22,60
Fotog. 80 m	00:35,8	00:25,9	00:32,0*	06:23,6	2,92	9,16	0,6844	19,13
120 m	00:39,3	00:29,8	00:35,7*	07:08,6	3,40	9,54	0,0853	15,50

Em que: Fotog.: Método de Fotogrametria; CV (%) Coeficiente de variação em porcentagem; DP: Desvio padrão; ¹*p*-valor do teste de normalidade de Shapiro-Wilk com valores de $p \geq 0,05$; ER: Eficiência Relativa.

* Valores significativos a 0,05 para teste *t* pareado de médias, com valor de $p \leq 0,05$. Fonte: Elaborada pela autora (2024).

A Tabela 16 mostra que o tempo de medição entre os métodos e alturas de voo, foi diferente. O método convencional apresentou maiores valores de tempo de medição do diâmetro de copa, para os três sítios de estudo. O que pode ser explicado pelo maior valor do CV (%) do método convencional, ou seja, a variação dos valores de tempo em relação à média. A medida realizada com a fotogrametria os valores médios de tempo foram menores em comparação ao convencional, e menor coeficiente de variação. O desvio padrão apresentou valores maiores para medição na imagem, indicando que o tempo de medição de cada árvore não foi uniforme em relação à média, como no método convencional. O sítio II (URB) apresentou menor valor médio de tempo, seguido do sítio I (URB) e sítio III (BRT) pelo método convencional. Na fotogrametria, a altura de voo de 60 m apresentou valores menores de tempo de medição para os três sítios, em razão a maior densidade de pontos na nuvem densa e consequentemente melhor visualização dos raios de copa, à medida que a altura de voo foi aumentando o tempo médio de medição

também aumentou, ou seja, menor densidade de pontos influencia na medição do tempo devido ao detalhamento das copas das árvores.

O teste t pareado da avaliação da diferença das médias do método convencional com a fotogrametria, rejeitou a hipótese nula $H0$, ou seja, há diferença estatística entre as médias do tempo de medição no campo e da fotogrametria com valores de p menores que 0,05. O método convencional demanda maior tempo de medição devido ao adensamento das copas de árvores, declividade do terreno, ergonomia do operador na aferição dos raios de copa, copas sobrepostas, etc. Em contrapartida, na fotogrametria o processo de medição é prático e rápido devido a simplicidade da ferramenta de medição, habilidade gerada à medida que faz a aferição, vantagem ergonômica, qualidade das imagens geradas, otimização do processo entre outros.

A eficiência relativa apresentou valores maiores para o método de fotogrametria, sendo que maior valor de eficiência relativa melhor e mais eficiente é o método. Para as alturas de 60 m a eficiência relativa foi maior para os três sítios com valores de 12,70, 20,80 e 22,60 respectivamente, seguida das alturas de 80 e 120 m. Já para o sítio I as alturas mais eficientes para a medição do tempo foi 60, seguida da 120 m com valor de 3,68 e 80 m com 2,78, isso se explica ao coeficiente de variação que foi menor para a altura de 120 m em relação à altura de 80 m, apesar de apresentar maior tempo de medição, esse fator não influenciou na sua eficiência relativa. Segundo Miranda et al., (2015) em inventários com alto rigor quantitativo, pode-se optar pelo método mais preciso, mas para inventários de levantamento rápido de estoque ou estratégicos, pode-se optar por outros métodos de amostragem, por aquele que apresente maior eficiência relativa.

A eficiência do método de amostragem é influenciada em grande parte pela tipologia florestal, grau de degradação da floresta e pela topografia da área, sendo que a adequação do método de amostragem às condições florestais possibilitará um aumento da precisão nas estimativas das variáveis correntes de interesse e, consequentemente, uma redução do tempo de execução, o que refletirá na redução de custos, para um mesmo esforço de amostragem (Nakajima et al., 1997; Miranda et al., 2015). Nos inventários florestais, a eficiência é um indicador que analisa os custos ou tempos de um determinado método de amostragem, e sua precisão com base no coeficiente de variação, resultando em valores que determinam quanto eficiente será o método em comparação com outro (Druszcz et al., 2010).

2.6 CONCLUSÃO

Conforme os resultados, pode-se concluir que:

- a) As médias do diâmetro foram maiores para o sítio III (BRT) com valor de 47,23 cm, seguido do sítio II (URB) com 39,40 cm e sítio I (URB) com d médio de 35,89 cm. O número de classes resultou em agrupar em seis classes, sendo o sítio I variando de 19,5 cm a 85,4 cm, o sítio II 21,1 cm a 56,9 cm e o sítio III 29,6 cm a 71,3 cm;
- b) Quanto a variável diâmetro de copa, a maior média foi para o sítio III com 10,79 m, seguido do sítio II com média de 10,46 m e para o sítio I com média de 9,67 m, corroborando com a análise que quanto maior a copa maior é o d. O sítio I (URB) apresentou uma árvore *outlier* com diâmetro máximo acima dos demais visto que é uma característica ontogenia dessa espécie;
- c) A correlação de Pearson para o diâmetro a altura do peito em função das variáveis dendro/morfométricas se apresentou significativa com dez das quatorze variáveis de interesse. As variáveis diâmetro de copa (dc) $r=0,88$ e área de superfície de copa (asc) com $r=0,75$ apresentaram as maiores correlações;
- d) As relações morfométricas avaliadas demonstraram que o d é influenciado pelas características dendro-morfométricas como dc, asc e vc;
- e) Com o ajuste das equações de regressão verificou que a melhor equação que estima o dc foi as equações para os três sítios de estudo: $dc = 2,4126 + 0,2015 \cdot d$ (sítio I); $dc = 1,6129 + 0,2248 \cdot d$ (sítio II); $dc = 1,5278 + 0,0176 \cdot d$ (sítio III), na distribuição Gama e funções identidade e logarítmica;
- f) Ao verificar os dados de diâmetro de copa obtidos para os três sítios, houve diferença significativa entre as medidas aferidas em campo e pela fotogrametria, apenas para o sítio III (BRT) na altura de 60 m, não houve uma diferença significativa das medianas entre o método convencional e por Fotogrametria com p -valor maior de 5% de significância;
- g) As alturas de voo mais baixa de 60 m para os três sítios de estudo obteve menor valor de erro, e a mais alta de 120 m, maior valor de erro na aferição do diâmetro de copa; tanto para o erro absoluto como o RMSE. O sítio III obteve os menores valores de erro com 0,05 m para a altura de 60 m, 0,23 m para a altura de 80 m e 0,46 m para a altura de 120 m. O sítio com maior erro na

aferição do dc, foi o sítio II (URB) com -0,29 m para 60 m, 0,31 m para 80 m, e 0,53 m para a altura de 120 m;

- h) Diante dos resultados obtidos, conclui-se que as variações da altura de voo não tiveram grande influência na qualidade do produto gerado pelo VANT. Isso significa que a melhor opção para fazer o mapeamento é na altura de voo de 120 metros, pois o tempo de levantamento aproximadamente 5 vezes mais rápido que a altura de 60 m.
- i) Os modelos ajustados do d em função do dc para o campo e imagem, apresentaram boa precisão. Os erros dos modelos não apresentaram diferença significativa entre as medidas do campo e na imagem. Com isso, a hipótese do estudo foi aceita, é possível medir o dc nas imagens e estimar com precisão o d da árvore de Araucária, para as alturas de 60, 80 e 120 m, dispensando mensuração a campo.
- j) O método convencional apresentou maior tempo de medição do diâmetro de copa em comparação a fotogrametria. Na fotogrametria a altura de 60 m apresentou menor tempo de medição. A eficiência relativa foi maior e melhor para as alturas de 60 m em contrapartida o método convencional apresentou menores valores de eficiência relativa.

Para obter informações métricas, a utilização de imagens digitais para avaliar o diâmetro da copa apresentou resultados comparáveis aos obtidos pelo método convencional. Além disso, essa abordagem oferece diversas oportunidades para medições e avaliações versáteis, adequadas a diversos propósitos relacionados à análise da copa.

Portanto, a análise morfométrica nos três sítios distintos possibilitou a interpretação de características que impactam no crescimento da forma e dimensão das árvores, oferecendo insights sobre a dinâmica das árvores. Isso resulta em copas mais vigorosas, promovendo maior crescimento e desenvolvimento. Os resultados alcançados têm relevância significativa para o manejo florestal, uma vez que as relações interdimensionais e a densidade indicam possibilidades de intervenção para reduzir a competição, favorecendo o crescimento e a estabilidade do fragmento florestal, auxiliando nas tomadas de decisão em planos de manejo florestal.

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O emprego de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) está em constante crescimento, impulsionado pela acessibilidade crescente da tecnologia, preços mais acessíveis, maior confiabilidade e sensores cada vez mais precisos. Esses sistemas tornam-se cada vez mais simples de operar, tornando-os viáveis e eficazes para uso prático no campo.

Na área do manejo florestal, particularmente em florestas nativas, como as que abrigam a espécie de araucária, há uma limitação de estudos que envolvem o uso de geotecnologias. Nesse contexto, este trabalho destaca o potencial dessas ferramentas na otimização das medições e na elaboração eficiente, rápida e econômica de planos de manejo, apresentando resultados aproximados aos obtidos em trabalhos de campo.

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que as variações na altura de voo não exerceram uma influência significativa na qualidade dos produtos gerados pelo Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) nas diferentes áreas. Recomenda-se realizar o levantamento em alturas mais baixas quando se busca um nível de detalhamento maior e maior precisão, embora isso resulte em um tempo mais dispendioso. A altura de 120 metros atende às necessidades para levantamentos rápidos que demandam informações ágeis, oferecendo boas estimativas e precisão satisfatória.

O processamento digital de imagens em um computador comum pode ser desafiador devido às restrições de hardware e recursos disponíveis. Essas limitações incluem uma capacidade de processamento limitada. Além disso, a necessidade de uma quantidade considerável de memória RAM e as restrições na capacidade gráfica da placa de vídeo podem resultar em tempos prolongados de processamento. Recomenda-se recorrer a máquinas mais poderosas dedicadas ao processamento de imagens, este estudo foi realizado o processamento no computador da universidade com alta capacidade.

Dentre os produtos gerados no processamento digital das imagens, os ortomosaicos, foram utilizados para identificar as árvores de araucária no campo para posterior medição nas imagens. A identificação das árvores por meio visual, pode ser um fator de dificuldade para localização nas imagens. Para superar essas dificuldades, recomenda-se em estudos futuros, a criação de um código para automatizar esse processo, envolvendo aprendizado de máquina, com uso de algoritmos para detecção de árvores de araucária em meio à floresta e na medição nas nuvens de pontos, existem alguns estudos nesse sentido, porém para outras espécies arbóreas.

REFERÊNCIAS

AGISOFT, LLC, 2020. *Agisoft Metashape Professional*. Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia, Version 1.6.4, build 10928.

AGISOFT. **Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.5**. Agisoft LLC, p.139, 2019.

ANDRADE, J. B de. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998. 258p.

AGUERA-VEGA, F.; CARVAJAL-RAMÍREZ, F.; e MARTÍNEZ-CARRICONDO, P. 2017a. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle, **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, 98, p. 221–227.

AGUERA-VEGA, F.; CARVAJAL-RAMÍREZ, F.; e MARTÍNEZ-CARRICONDO, P. 2017b. Accuracy of digital surface models and orthophotos derived from unmanned aerial vehicle photogrammetry, **Journal of Surveying Engineering**, 143(2), p. 04016025.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L. de M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Vol. 22, No. 6, 711–728, 2013.

ALVES JUNIOR, A. P.; GOMES, L. N. Extração da Informação Posicional de Pontos de Projeção Cartográfica Geradas em Rotinas de Processamento para Geração de Ortofotos. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 74, n. 1, p. 122 –, 2022. DOI: 10.14393/rbcv74n1-56925. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/56925>. Acesso em: 22 ago. 2023.

ANAC - AGENCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. Regras da ANAC para uso de drones. Disponível em: http://www.anac.gov.br/noticias/2017/regas-da-anac-para-uso-de-drones-entram-em-vigor/release_drone.pdf/view. Acesso em 20 marc. 2023.

BACKES, A. Determinação da idade e regeneração natural de uma população de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O.Kuntze em um povoamento florestal localizado no município de Caxias do Sul, RS, Brasil. **Iheringia**. v. 56, p. 115- 130, Rio Grande do Sul. Marc. 2001.

BECKER, D.F. Desenvolvimento sustentável: necessidade e/ou possibilidade? In: Becker, D.F. (org.). Desenvolvimento Sustentável: necessidade e/ou possibilidade? **EDUNISC**. Santa Cruz do Sul, RS. 1997.

BECKERT SM. MAD ROSOT, NC ROSOT. 2014. Crescimento e dinâmica de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Ktze. em fragmento de Floresta Ombrófila Mista. **Scientia Forestalis**, 42, 209-218.

BERGENS, David dos Santos. TEIXEIRA, Niel Nascimento. **Avaliação do levantamento planialtimétrico com drone em projetos de terraplenagem**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 10, Vol. 09, pp. 15-27 Outubro de 2018. ISSN:2448-0959.

BERNI, Jose AJ et al. Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. **IEEE Transactions on geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 3, p. 722-738, 2009.

KRUCEK, M.; TROCHTA, J.; CIBULKA, M.; KRÁL, K. Beyond the cones: How crown shape plasticity alters aboveground competition for space and light – Evidence from terrestrial laser scanning. **Agric. And For. Meteor.** 2019, 264, 188-189. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.016>.

BOA MORTE, Caio de Lima; DE CARVALHO, Luiz Felipe Salomon Guaycuru; DE BARROS, Rafael Silva. Uso de VANT como ferramenta para estimativa de altura de dossel em manguezal: Um estudo investigativo em Guaratiba, Rio de Janeiro, Brasil. **Revista Tamoios**, [S.l.], v. 16, n. 3, dez. 2020. ISSN 1980-4490.

BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. Modeling forest trees and stands. Springer Science, p. 85- 106, 2012.

CANETTI A, CC RU, PP MATTOS, EM BRAZ. 2014. Dinâmica de crescimento de espécies de um remanescente de Floresta Ombrófila Mista em Colombo, PR. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 34, 31-37. <https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.77.602>.

CATTANEO, N. et al. Sex-related, growth-climate association of *Araucaria angustifolia* in the neotropical ombrophilous woodlands of Argentina. **Dendrochronologia**, Italy, v. 31, p.147-152, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2013.01.005>.

COELHO, L.; BRITO, J. **Fotogrametria digital**. 2. ed. Rio de Janeiro: EDUERJ, 2007. 196 p.

COSTA, E. A. et al. The crown efficiency of Parana-Pine. **Aust. J. Basic ; Appl. Sci.**, v. 11, n. 13, p. 86-92, Austrália. Marc. 2017.

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

COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G.; FLEIG, F. D. Modelagem do espaço de crescimento para araucária. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 725-734, 2018. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509832085>.

- COSTA, EA, FINGER CAG, HESS AF (2015) Modelo de incremento em área basal para árvores de araucária de uma floresta inequiânea. **Pesquisa Florestal Brasileira**. Colombo, v. 35, n. 83, p. 239-245. doi: 10.4336/2015.pfb.35.83.792.
- COSTA EA, CAG FINGER, FD FLEIG, AF HESS, GP MARANGON. 2016c. Density management diagram for araucaria uneven aged forest. **Floresta**, 46, 173-184. <https://doi.org/10.5380/rfv46i243449>.
- COSTA EA, AF HESS, CAG FINGER. 2017a. Estructura y crecimiento de los bosques de *Araucaria angustifolia* en el sur de Brasil. **Bosque**, 38, 229-236.
- COSTA, E.A.; FINGER, C.A.G. Efeito da Competição nas Relações Dimensionais de Araucária. **Floresta Ambient**. 2017, vol.24, e20150145. Epub Nov 16, 2016. ISSN 1415-0980.
- COSTA EA, CAG FINGER, FD FLEIG. 2018b. Modelling growing space for araucaria. **Ciência Florestal**, 28, 725-734. <https://doi.org/10.5902/1980509832085>.
- CORDEIRO, G. M.; LIMA NETO, E. A. **Modelos paramétricos**. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Estatística e Informática, 2006. 256 p.
- CYSNEIROS, V. C.; AMORIM, T. A.; MENDONÇA-JÚNIOR, J. O.; GAUI, T. D.; MORAES, J. C. R. et al. Distribuição diamétrica de espécies da Floresta Ombrófila Densa no Sul do Estado do Rio de Janeiro. **Pesquisa Florestal Brasileira**. Colombo, v. 37, n. 89, p. 1-10, jan./mar. 2017.
- CURTO RA, PP MATTOS, EM BRAZ, R ZACHOW, SP Netto. 2014. Caracterização da estrutura e desenvolvimento de modelos para quantificação do potencial madeireiro em povoamento não manejado de *Araucaria angustifolia*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 34, 303-319. <https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.80.764>.
- CURTO, R. de A. **Avaliação do crescimento e potencial de manejo em plantio superestocado de *Araucaria angustifolia* (Bertol) O. Kuntze**. 251f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba – PR. 2015.
- DANDOIS, J. P. Olano, M. and Ellis, E. C. 2015. Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision UAV estimates of forest structure, *Remote Sensing*, 7(10), p. 13895–13920.
- DEMÉTRIO, L.; HESS, A.F.; de SOUSA, A.N.; COSTA, E.A.; LIESENBERG, V.; FREISLEBEN, M.J.; SHIMALSKI, M.B.; FINGER, C.A.G.; HOFIÇO, N.d.S.A.; BISPO, P.d.C. Can We Predict Male Strobili Production in *Araucaria angustifolia* Trees with Dendrometric and Morphometric Attributes? *Forests* **2022**, 13, 2074. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13122074>.

DÍAZ-VARELA, Ramón A. et al. High-resolution airborne UAV imagery to assess olive tree crown parameters using 3D photo reconstruction: application in breeding trials. **Remote Sensing**, v. 7, n. 4, p. 4213-4232, 2015.

DRONENG. Case Técnico Topografia x Fotogrametria. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/0B64h_BNFmTbnVTY0WW5LQzBSVKE/view>. Acesso em: 20/07/2023.

DRONES E CIÊNCIA [recurso eletrônico]: teoria e aplicações metodológicas/Gonzalo Prudkin, Fábio Marcelo Breunig (organizadores). Santa Maria, RS: FACOS-UFMS.2019. 98 p.

DRUSZCZ, J. P.; NAKAJIMA, N. Y.; PÉLLICO NETTO, S.; YOSHITANI JÚNIOR, M. Comparação entre os métodos de amostragem de Bitterlich e de área fixa com parcela circular em plantação de *Pinus taeda* L. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 739-754, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v40i4.20326>.

EISFELD, R. L. **Pesquisa, legislação, plantio e manejo de *Araucaria angustifolia*** (Bertol.) O. Kuntze: **Perspectivas e soluções**. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, 2020. 261 p.

EMBRAPA - **SISTEMA BRASILEIRO DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS**. Brasília.2012.418p.

FORRESTER, D.I. (2017). Processos ecológicos e fisiológicos em povoamentos mistos versus monoespecíficos. In: Pretzsch, H., Forrester, D., Bauhus, J. (orgs) *Florestas de Espécies Mistas*. Springer, Berlim, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54553-9_3.

FREY, J. KOVACH, K. STEMMLER, S. and KOCH, B. 2018. UAV photogrammetry of forests as a vulnerable process. a sensitivity analysis for a structure from motion RGB-image pipeline, *Remote Sensing*, 10(6), p. 912.

FRITZ, Andreas; KATTENBORN, Teja; KOCH, B. UAV-based photogrammetric point clouds–tree stem mapping in open stands in comparison to terrestrial laser scanner point clouds. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 40, p. 141-146, 2013.

GARCIA, M.V.Y.; OLIVEIRA, H.C. The influence of flight configuration, câmera calibration, and ground control points for digital Terrain model and orthomosaic Generation using unmanned earial vehicles imagery. *Bulletin of Geodetic Sciences*. 27(2): e2021015, 2021. DOI [10.1590/s1982-21702021000200015](https://doi.org/10.1590/s1982-21702021000200015).

GASPER, A. L.; OLIVEIRA, L. Z.; LINGNER, D. V.; VIBRANS, A. C. **Inventário Florístico Florestal de Santa Catarina**, Volume VII, Espécies arbóreas raras de Santa Catarina. Blumenau, Edifurb, 2017. 256 p.

HESS, A.F.; SILVEIRA, A.C.DA.; KREFTA, S.M.; SANTOS, D.V.DOS.; FILHO, M.D.H.V.; ATANAZIO, K.A.; SCHORR, L.P.B.; SOUZA, I.A.; BORSOI, G.B.;

STEPKA, T.F.; COSTA, E.A.; LIESENBERG, V. Crown dynamics of Brazilian pine (*Araucaria angustifolia*) in Santa Catarina region of Brazil. **Aust. J. Crop Sci.** 2018(a). 12(03):449-457.

HESS, A. F.; LOIOLA, T.; SOUZA, I. A.; NASCIMENTO, B. Morfometría de la copa de *Araucaria angustifolia* en sitios naturales en el sur de Brasil. **Bosque (Valdivia)** vol.37 no.3 Valdivia, 2016, p. 603-611. Abr. 2016.

HESS, AF, da Silveira, AC, Krefta, SM, dos santos, DV, Vieira Filho, MDH, Atanazio, KA, Schorr, LPB, Souza, I A, Borsoi, GA, Stepka, TF Costa, EA, & Liesenberg, V. (2018c) Dinâmica da coroa de pinheiro brasileiro (*Araucaria angustifolia*) na região de Santa Catarina do Brasil. **Australian Journal of Crop Science**, 12(3), 449-457. <http://dx.doi.org/10.21475/ajcs.18.12.03.pne928>.

HESS, A. F.; et al. Aplicação dos modelos lineares generalizados para estimativa do crescimento em altura. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 427-433, Colombo. Out.2015.

HESS AF, S SCHUTTER DV Santos, EA Costa, M MINATTI, P RICKEN, DR KLEIN, AC SILVEIRA, V LIESENBERG, IA SOUSA, L DENEGA. 2021. Form of distribution of dendro/morphometric variables for Brazilian pine in southern Brazil. **Journal of Agricultural Science**, 13, 69-83. <https://doi.org/10.5539/jas.v13n8p69>.

HUNT, E. Raymond et al. Avaliação de fotografia digital de aeromodelos para sensoriamento remoto de biomassa de culturas e status de nitrogênio. **Agricultura de Precisão**, v. 6, p. 359-378, 2005.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro: Fundação IBGE, 2012. 271 p.

JENSEN, John R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em Recursos Terrestres**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2011. 598 p. (978-85-60507-06-1). Tradução José Carlos Neves Epíhanio.

KAPS, M., LAMBERSON, W. R. **Biostatistics for Animal Science**. CABI Publishing, London, UK, 2004.

KOCH, B. et al. Automatische baumartenerkennung auf der Grundlage digitalisierter CIR-luftbilder. **173. JAHRGANG 2002 HEFT 7/8 JULI/AUGUST JD SAUERLANDER'S VERLAG· FRANKFURT AM MAIN**, p. 131, 2002.

KLEIN, D. R. et al. Relações morfométricas para *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em Santa Catarina. **Floresta**, v. 47, n. 4, p. 501-512, 2017. <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v47i4.49667>.

LALIBERTE, Andrea S. et al. Acquisition, orthorectification, and object-based classification of unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for rangeland monitoring. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 76, n. 6, p. 661-672, 2010.

LISEIN, Jonathan et al. Um fluxo de trabalho fotogramétrico para a criação de um modelo de altura do dossel florestal a partir de imagens de pequenos sistemas aéreos não tripulados. **Florestas**, v. 4, n. 4, pág. 922-944, 2013.

LIMA NETO, Everaldo Marques de et al. Fotografias aéreas para mensuração da área de copa das árvores de ruas de Curitiba–PR. 2012.

LIMA, R.B.; APARICIO, P.S.; SILVA, W.C.; SILVA, D.A.S.; GUEDES, A.C.L. Emprego da distribuição diamétrica na predição do estado de perturbação em florestas de várzea, Macapá-AP. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v.9, n.16; p.1026, 2013.

LOETSCH, F.; ZÖHRER, F.; HALLER, K.E. Forest Inventory. München: BLV Verlagsgesellschaft mbH, 1973. 469 p.

MACHADO, S. A., AUGUSTYNCZIK, A. L. D., NASCIMENTO, R. G. M., FIGURA, M. A., SILVA, L. C. R., MIGUEL, E. P., TÊO, S. J. Distribuição Diamétrica de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. em um Fragmento de Floresta Ombrófila Mista. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.10, n.2, p.103-110, Mar./Apr. 2009.

MACHADO, S.A.; OLIVEIRA, E.B.; BARTOSZECK, A.C.P.S. Estudo da estrutura diamétrica em florestas naturais de *Araucaria angustifolia* nos estados da região sul do Brasil. **Revista Floresta**, Curitiba, v.26, n.1-2, p.59-70, 1998.

MARASCIULO, Alessandra Silva. **Avaliação da arquitetura de copa da espécie de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze com uso de geotecnologia na região central de Santa Catarina**/Alessandra Silva Marasciulo - 2017.

MARCHETTI, D. A. B.; GARCIA, G. J. **Princípios de Fotogrametria e Fotointerpretação**. São Paulo: Nobel, 1986. 264p.

MARTÍNEZ-CARRICONDO, P. et al. 2018. Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 72, p. 1–10.

MEDEIROS, F. A. **Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em agricultura de precisão**. 2007. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

METSARANTA, J.M.; LIEFFERS, V.J. Inequality of size and size increment in *Pinus banksiana* in relation to stand dynamics and annual growth rate. **Annals of Botany**, Volume 101, Edição 4, março de 2008, páginas 561-571, <https://doi.org/10.1093/aob/mcm320>.

METSARANTA, JM, LIEFFERS, VJ. Patterns of inter-annual variation in the size asymmetry of growth in *Pinus banksiana*. *Oecologia* **163**, 737–745 (2010). <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1559-7>.

MIRANDA, D. L. C.; FRANCIO, J.; SANTOS, J. P. SANQUETTA, C. R., DALLA CORTE, A. P. Precisão e eficiência relativa de métodos de amostragem em teca. **Pesquisa Floresta Brasileira**, Colombo, v.35, n.83, p. 247-254, 2015.

- MOFFITT, F. H.; MIKHAIL, E. M. **PHOTOGRAMMETRY**. 3 ed. Nova York: Harper & Row Publishers, 1980. 648 p.
- MONTIBELLER-FILHO, G. Crescimento econômico e sustentabilidade. Uberlândia, **Sociedade & Natureza**. n. 19(1), p. 81-89, 2007.
- NAESSET, Erik. Previsão de características de povoamentos florestais com varredura a laser aerotransportada usando um procedimento prático de duas etapas e dados de campo. **Sensoriamento remoto do ambiente**, v. 80, n. 1, pág. 88-99, 2002.
- NAKAJIMA, N. Y. **Comparison of four ground – survey methods when used as permanent samples in the continuous forest inventory for forest management**. 1997. 91 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – The United Graduate School of Agricultural Sciences, Kagoshima University, Kagoshima, 1997.
- NURUL AIN MOHD ZAKI, ZULKIFLEE, ABD LATIF e MOHD NAZIP SURATMAN (2018) Modelling above-ground live trees biomass and carbon stock estimation of tropical lowland Dipterocarp forest: integration of field-based and remotely sensed estimates, *International Journal of Remote Sensing*, 39:8, 2312-2340, DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1421793>.
- PADILLA-MARTÍNEZ, JR, CORRAL-RIVAS, JJ, REYES, JB, PAUL, C., SERRANO, ML, e GADOW, KV (2020). Padrões de Densidade e Produção nas Florestas Comunitárias da Sierra Madre Occidental, México. **Florestas**, 11(3), 307. <http://dx.doi.org/10.3390/f11030307>.
- PALERMO, R. de A.; LEITE, T. C. **Integração de Levantamento Fotogramétrico Aéreo com o uso de Vant e Levantamento Fotogramétrico Terrestre Para o Mapeamento Tridimensional das Ruínas de São Miguel das Missões**. [S.l.]: UFRS - Universidade Federal do Rio, 2013.
- PAULA, G. A.; **Modelos de regressão com apoio computacional**. Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo, 2010. Disponível em: http://www.ime.unicamp.br/~cnaber/Livro_MLG.pdf . Acesso em: 28/07/2022.
- PATRICIO MARTÍNEZ-CARRICONDO, FRANCISCO AGUERA-VEGA e FERNANDO CARVAJAL-RAMÍREZ (2023). Accuracy assessment of RTK/PPK UAV-photogrammetry projects using differential corrections from multiple GNSS fixed base stations, *Geocarto International*, 38:1,2197507, DOI: [10.1080/10106049.2023.2197507](https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2197507).
- PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. **Inventário florestal**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1997. 316 p.
- PEDREIRA, Wallace John. Avaliação da Acurácia Altimétrica de Mapeamento Cartográfico Topográfico Usando VANT. Cruz das Almas. 2017.
- PESSOA, G. G. et al. 2020. Assessment of UAV-based digital surface model and the effects of quantity and distribution of ground control points, *International Journal of Remote Sensing*, 42(1), p. 65-83.

PRETZSCH, H. (2017). Estrutura e Crescimento de Árvores Individuais em Povoamentos Mistos em Comparação com Povoamentos Monoespecíficos. In: Pretzsch, H., Forrester, D., Bauhus, J. (orgs) *Florestas de Espécies Mistas*. Springer, Berlim, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54553-9_6.

PRETZSCH, H.; DIELER, J. The dependency of the size-growth relationship of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) in forest stands on long-term site conditions, drought events, and ozone stress. *Trees-Struct. Funct. Árvores* **25**, 355–369 (2011). <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0510-1>.

PRETZSCH, H.; FORRESTER, D. I.; BAUHUS, J. **Mixed-Species Forests: ecology and management**. Freiburg: Springer, 2017. 653 p.

PRZYBILLA H. J. et al. 2019. Investigations on the geometric quality of cameras for UAV applications using the high- precision UAV test field Zollern colliery. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences XLII-2/W13*, 2019 ISPRS Geospatial Week 2019, 10–14 June 2019, Enschede, The Netherlands, p. 531-538.

RANGEL, J. M. G. GONCALVES, G. R. and PÉREZ, J. A. 2018. The impact of number and spatial distribution of GCPs on the positional accuracy of geospatial products derived from low-cost UASs, *International Journal of Remote Sensing*, 39(21), p. 7154–7171.

RANGO, Albert et al. Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and management. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 3, n. 1, p. 033542, 2009.

R. DUNFORD, K. Michel, M. GAGNAGE, H. PIÉGAY e M. L. TRÉMELO (2009) Potencial e restrições da tecnologia de veículos aéreos não tripulados para a caracterização da floresta ciliar mediterrânea, *International Journal of Remote Sensing*, 30:19, 4915-4935, DOI: [10.1080/01431160903023025](https://doi.org/10.1080/01431160903023025).

RICKEN, Pollyni. Crescimento e produção de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em diferentes gradientes ecológicos em Santa Catarina como subsídio ao manejo florestal sustentável / Pollyni Ricken. – Curitiba, 2020. 132 f.

SÁ, C. A. de S.; DE MOURA, M. S. B.; GALVÍNCIO, J. D.; MIRANDA, R. de Q.; DA SILVA, M. J.; DOS SANTOS, C. V. B. Detecção semiautomática de árvores em pomar de mangueira irrigada a partir de imagens obtidas por drone. **IRRIGA**, [S. l.], v. 26, n. 3, p. 507–524, 2021. DOI: 10.15809/irriga.2021v26n3p507-524. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4452>. Acesso em: 12 ago. 2023.

SAS Institute. **The SAS System for Windows**. Cary: SAS Institute. 2004.

SANQUETTA, C.R, et al. Equações para estimativa do diâmetro de copa para Acácia negra. **Floresta e Ambiente**. Rio de Janeiro. Vol.21. n.2. p192-205, 2014.

SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; RODRIGUES, A. L.; WATZLAWICK, L. F. **Inventários florestais: planejamento e execução**. 4. ed. Curitiba: Multi-Graphic, 2014. 406 p.

SANTIAGO E CINTRA. Como funciona o sistema RTK (Real Time Kinematic). 2018. Disponível em: <<https://www.santiagoecintra.com.br/blog/geo-tecnologias/como-funciona-o-sistema-rtk-real-time-kinematic-y>>. Acesso em: 18 jul. 2023.

SEIDEL, D., LEUSCHNER, C., MULLER, A. e KRAUSE, B. (2011). Plasticidade da coroa em florestas mistas – Quantificando a assimetria como medida de competição usando varredura a laser terrestre. **Ecologia e Manejo Florestal**, 261, 2123-2132.

SCHAAF, L. B. et al. Alteração na estrutura diamétrica de uma floresta ombrófila mista no período entre 1979 e 2000. **Revista Árvore**, v.30, n.2, p.283-295, 2006.

SCHORR, L.P.B. Dinâmica e relações alométricas para a espécie arbóreas em Floresta Ombrófila Mista sob Regime de não manejo no sul do Brasil. Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal. Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages,SC, Brasil, 2019.

SCOLFORO, J.R.S. **Biometria florestal: modelos de crescimento e produção florestal** Lavras: UFLA/FAEPE, 2006. 393p.

SELKOWITZ, David J. et al. Uma abordagem lidar multissensor, multispectral e multiangular para mapear a altura do dossel em regiões de floresta boreal. **Sensoriamento Remoto do Meio Ambiente**, v. 121, p. 458-471, 2012.

SILVA, F. A. et al. Caracterização de índices morfométricos para *Araucaria angustifolia* plantada na Região Norte do Rio Grande do Sul. **Adv. For. Sci.**, Cuiabá, v.4, n.3, p.143-146, Abr. 2017.

SILVA NETO, Manoel (Ed.). **Planejamento de Voo e GSD**. 2015. Disponível em: <http://blog.droneng.com.br/planejamento-de-voo/>. Acesso em: 18 jul. 2023.

SILVEIRA, AC, HESS, AF, SCHORR, LPB, STEPKA, TF, KREFTA, SM, e ATANAZIO, KA (2021). Variáveis de copa na determinação da densidade máxima de florestas de *Araucária angustifolia* (Bertol) Kuntze. **Ciência Forestalis**, 49(130), e3545. <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n130.16>.

SOUZA AL, JESUS, RM. Distribuição diamétrica de espécies arbóreas da Floresta Atlântica: análise de agrupamento. Serviço do Instituto de Florestas; 1994.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa: Ed. UFV, 2006.

TORRES-SÁNCHEZ, Jorge et al. High-throughput 3-D monitoring of agricultural-tree plantations with unmanned aerial vehicle (UAV) technology. **PloS one**, v. 10, n. 6, p. e0130479, 2015.

TUOMINEN, Sakari et al. Unmanned aerial system imagery and photogrammetric canopy height data in area-based estimation of forest variables. **Silva Fennica**, v. 49, n. 5, 2015. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.1348>.

TURKMAN, M. A. A.; SILVA, G. L. **Modelos Lineares Generalizados – da teoria à prática**. Universidade de Lisboa, 2000. Disponível em: <http://docentes.deio.fc.ul.pt/maturkman/mlg.pdf>. Acesso em 30 de maio de 2022.

UDIN, W. S. AHMAD, A. 2014. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation flying altitude using unmanned aerial vehicle. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 18, p. 012027.

VILLANOVA, LONGHI, RÉGIS, SCHNEIDER, PAULO RENATO, FAGNER DE SOUZA E LIRA, DAVID, dos SANTOS LISBOA GERSON. Projeção da distribuição diamétrica em floresta com araucária explorada seletivamente no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** [en linea]. 2017, 12(2), 210-219.

WENYAN, X; WEIWEI, Z; YUNMING, C. Climate mediates the effects of forest gaps on tree crown allometry. **For. Ecol. Manage.** 2022, 525,1-12. DOI: [10.1016/j.foreco.2022.120563](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120563).

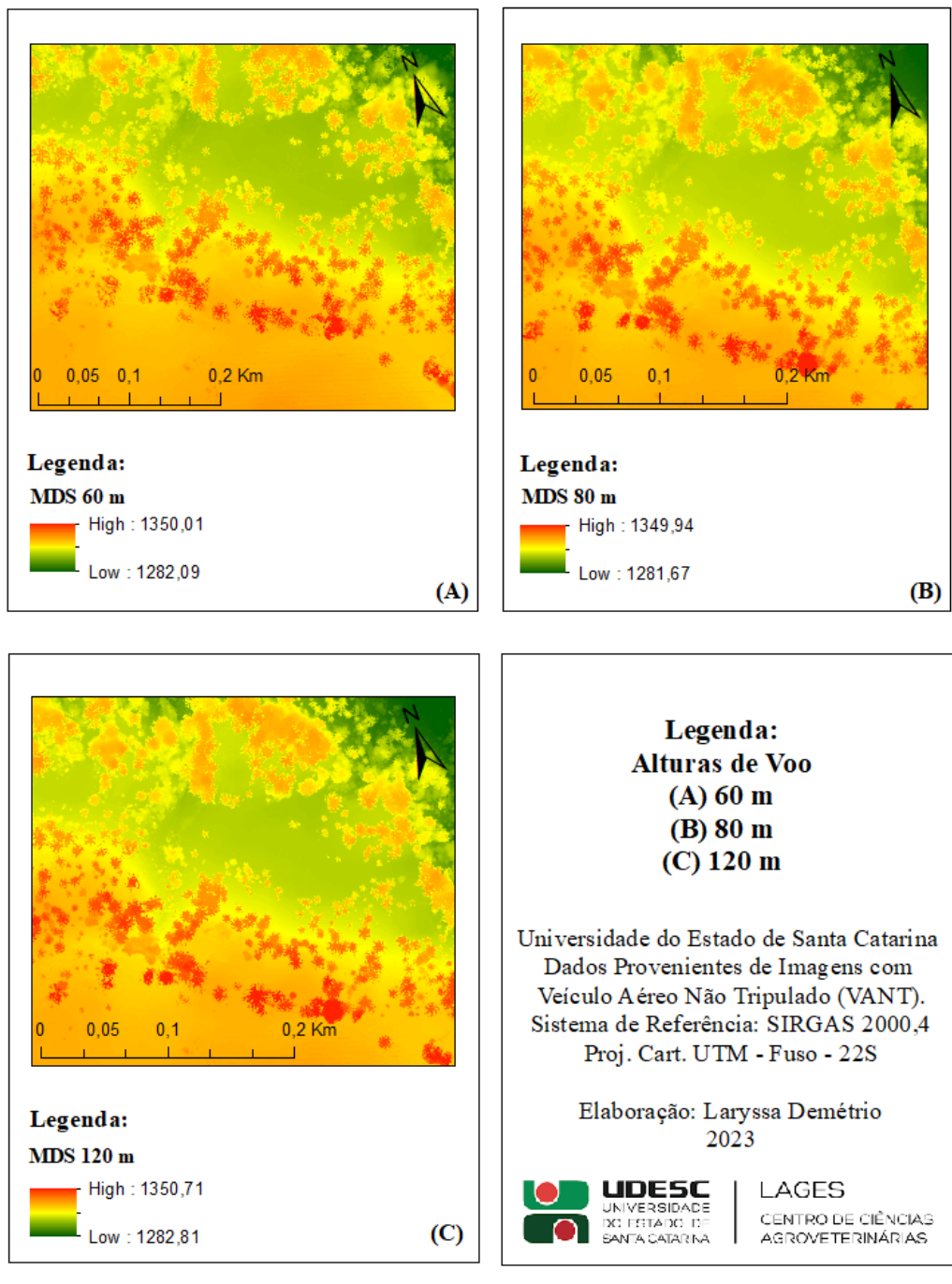
ZARCO-TEJADA, Pablo J. et al. Quantificação da altura das árvores usando imagens de altíssima resolução adquiridas de um veículo aéreo não tripulado (UAV) e métodos automáticos de foto-reconstrução em 3D. **Revista Europeia de Agronomia**, v. 55, p. 89-99, 2014.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A.; WILKINSON, B. E. **Elements of photogrammetry with applications in GIS**. 4 ed. Estados Unidos: McGraw-Hill Education, 2014. 676 p.

YING LI, WENZEL KROBER, HELGE BRUELHEIDE, WERNER HARDTLE, GODDERT VON OHEIMB. Características da coroa e das folhas como preditores de taxas de crescimento de mudas de árvores subtropicais, **Journal of Plant Ecology**, Volume 10, Edição 1, 1 de fevereiro de 2017, páginas 136-145. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtw041>.

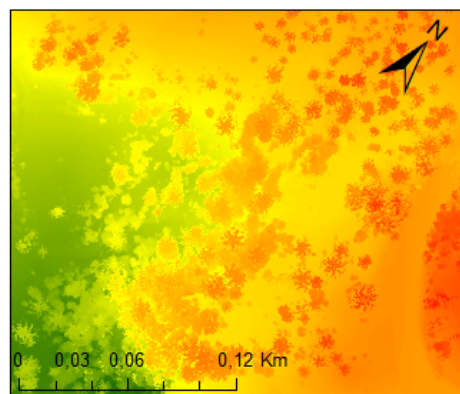
ANEXOS

MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE (MDS) SÍTIO I - URUBICI/SC



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE (MDS) SÍTIO II - URUBICI/SC

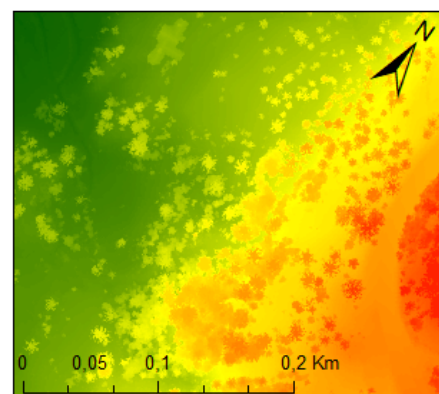


Legenda:

MDS 60 m

High : 1389,49
Low : 1312,42

(A)

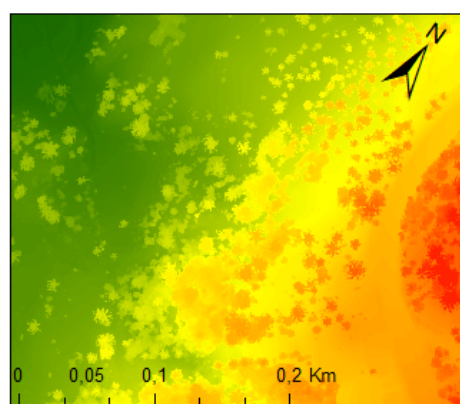


Legenda:

MDS 80 m

High : 1408,44
Low : 1317,63

(B)



Legenda:

MDS 120 m

High : 1413,24
Low : 1316,24

(C)

Legenda:
Alturas de Voo
(A) 60 m
(B) 80 m
(C) 120 m

Universidade do Estado de Santa Catarina
Dados Provenientes de Imagens com
Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT).
Sistema de Referência: SIRGAS 2000,4
Proj. Cart. UTM - Fuso - 22S

Elaboração: Laryssa Demétrio
2023



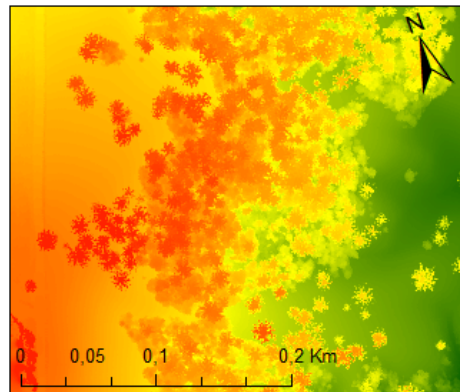
UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA

LAGES

CENTRO DE CIÊNCIAS
AGROVETERINÁRIAS

Fonte: Elaborada pela autora (2022).

MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE (MDS) SÍTIO III - BOM RETIRO/SC



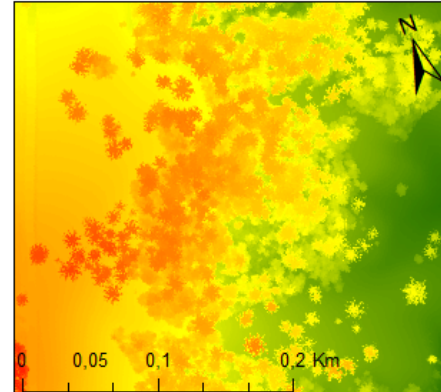
Legenda:

MDS 60 m

High : 937,851

Low : 861,547

(A)



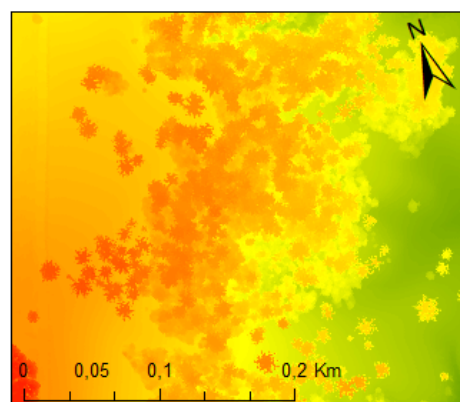
Legenda:

MDS 80 m

High : 945,222

Low : 858,267

(B)



Legenda:

MDS 120 m

High : 945,633

Low : 838,773

(C)

Legenda:
Alturas de Voo
(A) 60 m
(B) 80 m
(C) 120 m

Universidade do Estado de Santa Catarina
Dados Provenientes de Imagens com
Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT).
Sistema de Referência: SIRGAS 2000,4
Proj. Cart. UTM - Fuso - 22S

Elaboração: Laryssa Demétrio
2023



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA

LAGES

CENTRO DE CIÊNCIAS
AGROVETERINÁRIAS

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

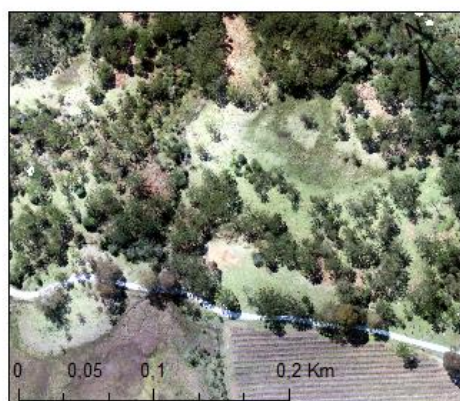
ORTOMOSAICO SÍTIO I - URUBICI/SC



(A)



(B)



(C)

Legenda:
Alturas de Voo
 (A) 60 m
 (B) 80 m
 (C) 120 m

Universidade do Estado de Santa Catarina
 Dados Provenientes de Imagens com
 Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT).
 Sistema de Referência: SIRGAS 2000,4
 Proj. Cart. UTM - Fuso - 22S

Elaboração: Laryssa Demétrio
 2023



LAGES
 CENTRO DE CIÊNCIAS
 AGROVETERINÁRIAS

Fonte: Elaborada pela autora (2022).

ORTOMOSAICO SÍTIO II - URUBICI/SC



(A)



(B)



(C)

Legenda:
Alturas de Voo
 (A) 60 m
 (B) 80 m
 (C) 120 m

Universidade do Estado de Santa Catarina
 Dados Provenientes de Imagens com
 Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT).
 Sistema de Referência: SIRGAS 2000,4
 Proj. Cart. UTM - Fuso - 22S

Elaboração: Laryssa Demétrio
 2023



LAGES
 CENTRO DE CIÊNCIAS
 AGROVETERINÁRIAS

Fonte: Elaborada pela autora (2022).

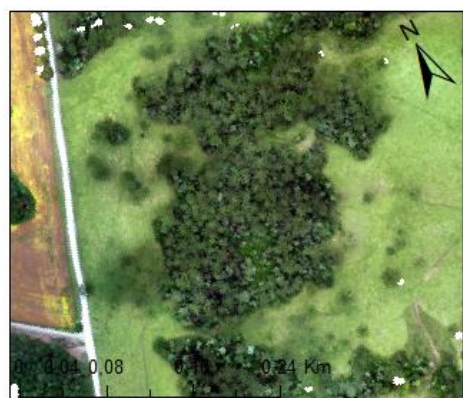
ORTOMOSAICO SÍTIO III - BOM RETIRO/SC



(A)



(B)



(C)

Legenda:
Alturas de Voo
(A) 60 m
(B) 80 m
(C) 120 m

Universidade do Estado de Santa Catarina
Dados Provenientes de Imagens com
Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT).
Sistema de Referência: SIRGAS 2000,4
Proj. Cart. UTM - Fuso - 22S

Elaboração: Laryssa Demétrio
2023



LAGES
CENTRO DE CIÊNCIAS
AGROVETERINÁRIAS

Fonte: Elaborada pela autora (2023).