

**UNIVERSIDADE REGIONAL DE BLUMENAU - FURB**  
**CENTRO DE CIÊNCIA TECNOLÓGICAS - CCT**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL - PPGEF**

**ALOMETRIA COM ÊNFASE NO VOLUME E NA FORMA DO FUSTE DE  
ESPÉCIES ARBÓREAS DA FLORESTA OMBRÓFILA DENSA EM SANTA  
CATARINA**

**ALINE RENATA KLITZKE**

**BLUMENAU**

**2019**

**ALINE RENATA KLITZKE**

**ALOMETRIA COM ÊNFASE NO VOLUME E NA FORMA DO FUSTE DE  
ESPÉCIES ARBÓREAS DA FLORESTA OMBRÓFILA DENSA EM SANTA  
CATARINA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Regional de Blumenau - FURB, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal, área de concentração Silvicultura e Manejo de Recursos Florestais.

Prof. Orientador: Dr. Alexander Christian Vibrans

**BLUMENAU**

**2019**

Ficha Catalográfica elaborada pela  
Biblioteca Universitária da FURB

---

K65a

Klitzke, Aline Renata, 1991-

Alometria com ênfase no volume e na forma do fuste de espécies arbóreas da floresta ombrófila densa em Santa Catarina / Aline Renata Klitzke. - Blumenau, 2019.

110 f. : il.

Orientador: Alexander Christian Vibrans.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau.

Inclui bibliografias.

1. Engenharia florestal. 2. Florestas. 3. Florestas - Santa Catarina. 4. Florestas - Conservação. 5. Levantamentos florestais. 6. Manejo florestal. I. Alexander Christian Vibrans, 1959-. II. Universidade Regional de Blumenau. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. III. Título.

---

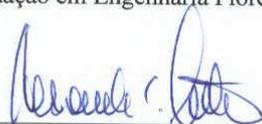
CDD 634.9

**“ALOMETRIA COM ÊNFASE NO  
VOLUME DE ESPÉCIES ARBÓREAS DA  
FLORESTA OMBRÓFILA DENSA EM  
SANTA CATARINA”**

por

**Aline Renata Klitzke**

Dissertação aprovada como requisito para obtenção do título de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal na Universidade Regional de Blumenau – FURB.



*Prof. Dr. Alexander Christian Vibrans*  
Orientador



*Prof. Dr. Lauri Amândio Schorn*  
Coordenador

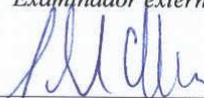
**Banca examinadora:**



*Prof. Dr. Alexander Christian Vibrans*  
Presidente



*Dr. Veraldo Liesenberg*  
Examinador externo (UDESC)



*Prof. Dr. Jackson Roberto Eleotério*  
Examinador interno (FURB)

Blumenau, 15 de março de 2019.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Elke e Gerhard pela confiança e motivação desde sempre, devo tudo a vocês.

Ao curso de Mestrado em Engenharia Florestal – FURB pela oportunidade de realizar o Mestrado no Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal.

À CAPES pelo financiamento da Bolsa de estudo.

Ao Professor Alexander Christian Vibrans, mestre e incentivador, obrigada pela confiança, oportunidade e por todo conhecimento compartilhado durante o trabalho no IFFSC e durante a realização deste trabalho.

Ao Professor Jackson Roberto Eleotério, mestre e amigo, obrigada pelo constante incentivo na carreira acadêmica e profissional.

À Professora Cyntia Bailer, obrigada pelo incentivo, conhecimento compartilhado e reflexões nas disciplinas de Inglês acadêmico deste programa de Pós-Graduação.

Aos Colegas da Turma VII, obrigada pelo apoio, incentivo e angústias compartilhadas.

Ao Inventário Florístico Florestal de Santa Catarina, agradeço pelo aprendizado durante o trabalho nesse projeto sensacional.

Aos colegas, Heitor Uller, Adilson Nicoletti, Murilo Schramm, Djeniffer Vieira, Laio Oliveira Zimmerman, Gabriel Bollmann, Daniel Augusto da Silva, Marcus Boeno, Yone Louise Brych, Manoela Drews de Aguiar, João Bragagnolo obrigada pela imensa ajuda na coleta de dados.

Aos colegas de trabalho e amigos Heitor Uller e Laio Oliveira Zimmerman, obrigada pela constante ajuda na coleta de dados em campo e pelo processamento dos dados no laboratório, respectivamente.

Ao colega de profissão Tiago de Conto e a empresa Forlidar, obrigada pela ajuda no processamento dos dados TLS, pela atenção, rapidez e qualidade do trabalho realizado.

Aos Professores Veraldo Liesenberg e Marcos Schimalski pelo equipamento TLS pertence ao curso de Engenharia Florestal da Universidade Estadual de Santa Catarina (UDESC) que foi gentilmente disponibilizado para realização do estudo.

Ao proprietário da área de estudos, Sr. Clemente Bisewski, pela permissão de acesso e execução das atividades

À FATMA pela autorização do manejo florestal em regime experimental, à FAPESC pelo financiamento do Projeto Madeira Nativa no período entre 2009 e 2014 (processo 18689/2009-9)

## RESUMO

Os trópicos abrigam as florestas mais biodiversas do planeta; em contrapartida, os trópicos estão entre as regiões com maior pressão antrópica sobre os seus recursos naturais. Os esforços de conservação são essenciais para manter a saúde e a produtividade sustentável das florestas do mundo, mas atualmente não são suficientes para alcançar esses objetivos. Sob esta premissa, nos últimos anos, o manejo florestal ganhou força como um componente benéfico dentro da lista de esforços que tem como objetivo a conservação dos ecossistemas florestais. A obtenção de variáveis dendrométricas acuradas é essencial para o planejamento da exploração dos recursos florestais. A quantificação do volume é considerada fundamental para o gerenciamento da floresta. O volume das árvores pode ser obtido por diferentes métodos como: modelos volumétricos, modelos de afilamento e mais recentemente através de equipamentos como o *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) que realiza varreduras do tronco com *Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)*, permitindo uma representação em 3D do tronco podendo alcançar precisão milimétrica. Com base nessa problemática, a instalação de uma unidade experimental de manejo possibilitou a colheita de um número considerável de árvores entre 2015 e 2017 que constituem um banco de dados para o ajuste de modelos de volume total e do fuste. Desta forma, este trabalho teve como objetivo ajustar e comparar o desempenho de modelos de volume total e do fuste, genéricos para espécies arbóreas e específicos (para *Miconia cinnamomifolia* (DC) Naudin. e *Hyeronima alchorneoides* Allemão); comparar o desempenho de modelos genéricos e específicos de afilamento do fuste para as mesmas espécies; extrair variáveis dendrométricas de árvores de dados obtidos de varredura do TLS e compará-los com medidas de campo. Os modelos de volume e afilamento foram ajustados e selecionados seguindo um procedimento estatístico robusto de validação cruzada. O RMSE encontrado para os modelos de volume variou de 0,05 m<sup>3</sup> a 0,18 m<sup>3</sup>; para os modelos de afilamento o RMSE apresentou intervalo de 2,43 a 4,47 cm. O ajuste de modelos específicos não apresentou desempenho superior aos modelos genéricos, tanto na modelagem de volume como no afilamento. O sortimento resultou em 865,6 m<sup>3</sup> de madeira para 23 parcelas amostradas. A comparação dos dados TLS com os dados de campo (DAP e afilamento) resultou em um RMSE de 1,89 a 2,58 cm. Este estudo permitiu a modelagem de volume da madeira e modelagem de afilamento das espécies ocorrentes na área de estudo, utilizando o método destrutivo e novas tecnologias na obtenção de variáveis dendrométricas como o TLS. Novos estudos e aplicação de novas tecnologias para obtenção das variáveis dendrométricas devem ser encorajadas para contribuir ao uso consciente das florestas nativas.

Palavras chave: Florestas secundárias. Modelos volumétricos. Afilamento. *Terrestrial Laser Scanner*

## ABSTRACT

The tropics shelter the most biodiverse forests on the planet; in contrast, the tropics are among the regions with greatest anthropogenic pressure on their natural resources. Conservation efforts are essential to maintain sustainable productivity of the world's forests but are currently not enough to achieve these goals. Under this premise, in recent years forest management has gained strength as a beneficial component within the list of efforts aimed at the conservation of forest ecosystems. Obtaining accurate dendrometric variables is essential for planning the exploitation of forest resources. Hence, quantification of the volume is considered fundamental for forest management. The tree volume can be obtained by different methods such as: volumetric models, taper equations and, more recently, by equipment such as Terrestrial Laser Scanner (TLS) that performs scans allowing a 3D representation of the trunk and achieving millimeter accuracy. Based on this problem, the installation of an experimental management unit allowed the harvesting of a considerable number of trees between 2015 and 2017 that constitute a database for fitting total and trunk volume models. In such a way, this work had as objectives: to fit and compare generic and species (for *Miconia cinnamomifolia* (DC) Naudin. *Hyeronima alchorneoides* Allemão) total volume and stem volume models; to fit and compare the performance of generic and specific taper equations for the same species; to obtain dendrometric variables using Terrestrial Laser Scanner (TLS) and to compare them with destructive field measurements. The volume and taper equations were fitted and selected following a robust cross-validation statistical procedure. The RMSE found for the volume models ranged from 0.05 m<sup>3</sup> to 0.18 m<sup>3</sup>; for the species-specific models the RMSE presented a range of 2.43 to 4.47 cm. The adjustment of specific models did not present superior performance to the generic models, in both volume and taper equations. The assortment resulted in 865.6 m<sup>3</sup> of wood for 23 sampled plots. The comparison of TLS data with field data (DAP and taper) resulted in an RMSE of 1.89 to 2.58 cm. This study allowed the modeling of wood volume and modeling of the tapering of the species occurring in the study area, using the destructive method and new technologies in obtaining dendrometric variables such as the Terrestrial Laser Scanner (TLS). Further studies and application of new technologies to obtain dendrometric variables should be encouraged to contribute to the conscious use of native forests.

Keywords: Secondary forests. Volumetric models. Taper equations. Terrestrial Laser Scanner

## APRESENTAÇÃO

Os trópicos abrigam as florestas mais biodiversas do planeta; em contrapartida, os trópicos estão entre as regiões com maior pressão antrópica sobre os recursos naturais (GARDNER et al., 2009; MYERS et al., 2000; ROBERTS et al., 2017). Este fato, que pode ser verificado através da redução da área *per capita* de floresta, indica que a população aumentou nessa região e a floresta teve sua extensão reduzida; houve a perda de 6,6 milhões de hectares de floresta tropical por ano entre 2010-2015 (FAO, 2015). Os esforços de conservação são essenciais para manter a saúde e a produtividade sustentável das florestas do mundo, mas atualmente não são suficientes para alcançar esses objetivos (DIEGUES, 2000; FAO, 2015). Sob esta premissa, nos últimos anos o manejo florestal ganhou força como um componente benéfico dentro da lista de esforços que tem como objetivo a conservação dos ecossistemas florestais (REDFORD; RICHTER, 1999; SIMINSKI et al., 2011).

A conservação pelo uso pode impedir a conversão de florestas em outros usos da terra; desta forma, também serão assegurados os demais benefícios que a floresta proporciona, como por exemplo, o equilíbrio do ciclo hidrológico (OJEA; MARTIN-ORTEGA, 2015). Além disso, acumulam-se evidências que as florestas consideradas “naturais” passaram ou até mesmo foram formadas por intervenções humanas em várias regiões do mundo (ROBERTS et al., 2017), como também no Brasil (REIS et al., 2018; RIBEIRO et al., 2014). As evidências de antropismo nas florestas também foram relatados pelo Inventário Florístico Florestal de Santa Catarina (IFFSC) (VIBRANS et al., 2013a). e por REIS et al. (2018) na América do Sul. Complementarmente, os trabalhos de FANTINI; SIMINSKI; GAIO (2016) e SIMINSKI et al. (2011) abordam a relação entre utilização e conservação, ou melhor, a dicotomia muitas vezes constatada entre legislação restritiva e seu efeito contraproducente para a desejada conservação das florestas nas áreas rurais de Santa Catarina.

Sob esta problemática, após anos de estudo sobre as florestas nativas de Santa Catarina, um termo de Cooperação Técnico-científico foi firmado entre a Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina (FATMA) – atual Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA) – e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), permitindo a implantação de uma unidade experimental de manejo florestal no estado. Na área experimental localizada em Massaranduba foi implantado o “Projeto Madeira Nativa” que versa sobre o potencial produtivo das florestas secundárias. No contexto do projeto citado acima, a coleta de dados de campo que embasam o presente estudo foi desenvolvida entre os anos de 2015 e 2017. Este estudo permitiu a modelagem de volume da madeira, bem como o afilamento das espécies

ocorrentes na referida área. Foi utilizado o método destrutivo e novas tecnologias na obtenção de variáveis dendrométricas como o *Terrestrial Laser Scanner* (TLS). Espera-se assim, contribuir para o manejo de florestas secundárias em Santa Catarina. Esta dissertação foi estruturada iniciando com esta apresentação, seguida pela introdução, que compreende a contextualização e justificativa do tema. Na sequência, os objetivos geral e específico são apresentados, seguidos da revisão bibliográfica que descreve as definições dos principais conceitos envolvidos. Desse ponto em diante a dissertação é subdividida e apresentada no formato de três artigos científicos de acordo com cada subtema: modelos de volume, modelos de afilamento e coleta de dados por TLS. Para cada um dos três artigos são apresentados novamente uma introdução. Neste caso trata-se de uma introdução breve e direcionada à publicação em periódico científico. Segue com a seção de material e métodos, que abrange a descrição da área de estudo, dos procedimentos de coleta e do processamento dos dados. Logo após, são apresentados os resultados e discussão, seguidos pelo fechamento de cada artigo com a respectiva conclusão.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>15</b>
<b>3 OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
3.1 OBJETIVO GERAL .....	16
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
3.2.1 Artigo 1 .....	16
3.2.2 Artigo 2 .....	16
3.2.3 Artigo 3 .....	16
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
4.1 MATA ATLÂNTICA - FLORESTA OMBRÓFILA Densa .....	18
4.2 MODELOS DE VOLUME PARA ESPÉCIES ARBÓREAS .....	18
4.3 MODELOS DE AFILAMENTO .....	21
4.4 TERRESTRIAL LASER SCANNER.....	24
<b>5 ARTIGO 1 – MODELOS VOLUMÉTRICOS ROBUSTOS PARA FLORESTAS SECUNDÁRIAS NA MATA ATLÂNTICA DO SUL DO BRASIL</b> .....	<b>28</b>
5.1 INTRODUÇÃO .....	28
5.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	30
5.2.1 Área de estudo.....	30
5.2.2 Coleta de dados .....	30
5.2.3 Ajuste, seleção e validação.....	31
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	33
5.3.1 Modelos genéricos.....	33
5.3.2 Modelos específicos .....	38
5.4 CONCLUSÃO .....	44
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>45</b>
<b>6 ARTIGO 2 – MODELOS DE AFILAMENTO E SORTIMENTO PARA FLORESTAS SECUNDÁRIAS NA MATA ATLÂNTICA DO SUL DO BRASIL</b> .....	<b>49</b>
6.1 INTRODUÇÃO .....	49
6.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	50
6.2.1 Área de estudo.....	50
6.2.2 Coleta de dados .....	51
6.2.3 Processamento dos dados .....	51
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	55
6.3.1 Modelos genéricos e modelos para espécies com potencial madeireiro .....	55
6.3.2 Modelos específicos de afilamento para <i>M. cinammomifolia</i> e <i>H. alchorneoides</i> .....	60

6.3.3 Sortimento .....	63
6.4 CONCLUSÃO .....	66
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>67</b>
<b>7 ARTIGO 3 – UTILIZAÇÃO DE TERRESTRIAL LASER SCANNER (TLS) E EXTRAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS NA FLORESTA OMBRÓFILA DENSA EM SANTA CATARINA .....</b>	<b>70</b>
7.1 INTRODUÇÃO .....	70
7.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	72
7.2.1 Área de estudo.....	72
7.2.2 Coleta de dados .....	72
7.2.3 Extração das variáveis dendrométricas .....	74
7.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	76
7.3.1 Comparação entre TLS e medidas de campo .....	76
7.4 CONCLUSÃO .....	81
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>82</b>
<b>8 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES GERAIS.....</b>	<b>86</b>
<b>REFERÊNCIAS DA DISSERTAÇÃO.....</b>	<b>87</b>
<b>APÊNDICE A - medidas de DAP campo versus TLS .....</b>	<b>98</b>
<b>APÊNDICE B - medidas de afilamento campo versus TLS .....</b>	<b>100</b>
<b>ANEXO A - Mapa topográfico de locação .....</b>	<b>110</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As florestas possuem importância incontestável no fornecimento de serviços ecológicos, econômicos e sociais (COSTANZA et al., 2014; PRÖBSTL-HAIDER, 2015). Esses serviços complementam-se e geralmente funcionam de forma integrada, incluindo o provimento de alimentos e de produtos da cadeia florestal; a proteção do solo; o equilíbrio térmico; a regulação do ciclo hidrológico; a manutenção da biodiversidade e o provimento de valores estéticos e recreativos para os seres humanos (sensação de bem-estar) (BONAN, 2008; BRANCALION et al., 2014; OJEA; MARTIN-ORTEGA, 2015; QIN et al., 2017; SCARANO; CEOTTO, 2015).

As intervenções humanas modificam a intensidade e a frequência de processos naturais de desenvolvimento, expansão e retração da floresta (RIBEIRO et al., 2009; TRUMBORE; BRANDO; HARTMANN, 2015). Contudo, essas intervenções podem também acelerar a mudança nos padrões de uso da terra, gerando o desflorestamento e/ou a fragmentação da cobertura florestal. Estes últimos podem provocar alterações climáticas locais, além de emissão de gases de efeito estufa. Ainda podem comprometer a sustentabilidade da floresta. Sabe-se que a qualidade das florestas remanescentes é tão importante quanto a sua quantidade (GROSS, 2018; TRUMBORE; BRANDO; HARTMANN, 2015; TUBIELLO et al., 2015). Desta forma, os impactos prejudiciais das emissões antrópicas de gases de efeito estufa (GEE) é um assunto consolidado e abordado em diversos estudos (GFOI, 2016; PINDYCK, 2016).

Além disso, as florestas tropicais são uma fonte importante de armazenamento de carbono; cerca de 25% do carbono terrestre global estão contidos nelas; conseqüentemente, elas tem o potencial de influenciar também o clima em uma escala global (BONAN, 2008; FRANKLIN; PINDYCK, 2018; PINDYCK, 2013; ZUIDEMA et al., 2013). Segundo estes autores, a importância da fixação de carbono da atmosfera pelas florestas foi reconhecida desde a década de 1990. No entanto, o desenvolvimento do chamado “crédito de carbono” não avançou da mesma maneira, ou seja, não tornou-se claro e operacional em todo planeta (POHJOLA et al., 2018). Uma das premissas para o monitoramento do ciclo do carbono e também para o funcionamento do seu mercado é a disponibilização de informações acuradas e atualizações das estimativas do carbono global nos diversos componentes (terrestre, marinho, florestas, agricultura, combustíveis fósseis, indústria). De acordo com a literatura especializada, estas estimativas podem ser obtidas de diferentes formas (GOFC-GOLD, 2016).

Um dos métodos para quantificar o carbono existente nas florestas propõe a aplicação de modelos alométricos para inicialmente estimar a biomassa e depois obter o conteúdo ou estoque de carbono (CHAVE et al., 2005, 2014). Os modelos alométricos podem fornecer informações acuradas, no entanto, deve-se ter cuidado na aplicação para estimativas globais (HENRY et al., 2015), pois quando os modelos são aplicados fora de seu domínio, fatores biogeográficos, estruturais, de composição, manejo e grau de conservação das florestas podem provocar erros sistemáticos (GFOI, 2016; HOUGHTON, 2005; TEMESGEN et al., 2015). Desta forma, dificilmente um único modelo servirá para todas as florestas do planeta. Somado a isso, o alto custo relacionado à coleta de dados também contribui para escassez de estudos de biomassa na Mata Atlântica.

O conhecimento do volume constitui uma etapa importante quando não é possível pesar todo material, pois permite a multiplicação do volume pela densidade média do material que resultará na estimativa de biomassa. Nesse caso, pode-se determinar o volume através de modelos alométricos previamente ajustados. Para realizar o ajuste são necessárias informações de campo acuradas, conseguidas através da pesagem de árvores individualmente ou de uma determinada área (método destrutivo) (PICARD; SAINT-ANDRÉ; HENRY, 2012).

As tecnologias de coleta, processamento e análise de informação estão em constante evolução, principalmente nas últimas décadas, possibilitando a utilização de um maior número de variáveis preditoras e novas metodologias de processamento de dados, também no setor florestal. Além disso, a agregação de posições geográficas às informações (informação georreferenciada) abre um campo vasto para combinação de áreas, como, por exemplo, do Sensoriamento Remoto (SR) com a biometria florestal clássica (LIANG et al., 2016). Através da aplicação de técnicas de SR é possível a obtenção de uma grande quantidade de dados em um intervalo de tempo curto. Portanto, torna-se um desafio o processamento de uma grande quantidade de dados e a transformação em informações úteis mantendo a qualidade inerente da informação (GIONGO et al., 2012).

A determinação dos parâmetros florestais pode ser realizada por métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos exigem esforço e tempo considerável, além disso são normalmente destrutivos (LIANG; HYYPPÄ, 2013). Por outro lado, a utilização de métodos indiretos (não destrutivos) que sejam acurados, precisos e rápidos é desejável (BIENERT et al., 2007). Ou seja, a acurácia garante que os valores médios se aproximem ao máximo do valor correto e a precisão garante que os valores apresentem uma pequena dispersão (MONICO et al., 2009).

Nos levantamentos de dados em campo convencionalmente utilizam-se equipamentos de baixo a médio custo e de fácil manuseio, como por exemplo a fita diamétrica, a suta e o hipsômetro. Estes equipamentos, embora amplamente utilizados, podem gerar incertezas, devido principalmente a erros do operador e limitações técnicas do instrumento (TEIXEIRA; FONSECA, 2014).

A quantificação do volume é considerada uma informação básica da floresta e pode ser obtida por diferentes métodos, através da xilometria, cubagem rigorosa, modelos volumétricos, modelos de afilamento e mais recentemente através de varreduras do tronco com *laser* (FIGUEIREDO FILHO; MACHADO; CARNEIRO, 2000; MACHADO et al., 2006). O conhecimento do volume é fundamental para o gerenciamento da floresta. Com base no que foi anteriormente mencionado, o planejamento e execução das atividades poderão garantir o melhor aproveitamento da madeira (BARRETO et al., 2014; RIBEIRO et al., 2010; SILVA; SANTANA, 2014).

A xilometria é um método de cubagem embasado na premissa de que o volume da tora é igual ao volume deslocado de água, quando ela é colocada no xilômetro. Apesar de ser considerado o método mais acurado, torna-se inviável em larga escala (FIGUEIREDO FILHO; MACHADO; CARNEIRO, 2000).

Os métodos de cubagem rigorosa mais difundidos como Smalian e Huber também apresentam estimativas de volume adequadas. No entanto, estes métodos são dispendiosos, pois exigem que sejam tomadas muitas medidas de diâmetro ou circunferência ao longo do tronco, com uso de fita diamétrica ou relascópio. Portanto, a cubagem rigorosa normalmente é considerada como uma etapa de calibração e tratada como a verdade de campo na aplicação de modelos volumétricos (THIERSCH et al., 2006).

A construção de modelos para prever volume ou biomassa necessita de medições precisas das variáveis de interesse em campo (LEITE; ANDRADE, 2003). Assim, os métodos convencionais de estimativa de variáveis como volume e biomassa estão fundamentados na aplicação de modelos matemáticos que sintetizam a relação entre a variável de interesse (e.g., volume) e variáveis como diâmetro à altura do peito e altura (CHAVE et al., 2005; PICARD; SAINT-ANDRÉ; HENRY, 2012). Os modelos volumétricos para determinar o volume foram amplamente estudados para espécies exóticas (Souza et al., 2008), porém ainda são pouco disponíveis para espécies da Floresta Ombrófila Densa (FOD) na Mata Atlântica e, em especial, em Santa Catarina.

Atualmente, a necessidade de medidas precisas (dados de campos) permite a inserção do SR para o aperfeiçoamento da mensuração florestal. Neste contexto, o equipamento de

varredura a *laser* terrestre (TLS) surge com potencial para aprimorar o levantamento de dados e possibilitar a obtenção de variáveis dendrométricas de forma automatizada (GIONGO et al., 2010). Outro aspecto vantajoso atribuído ao uso do TLS é sua capacidade de mapeamento tridimensional (3D), permitindo através da nuvem de pontos gerada a recuperação de parâmetros estruturais da floresta em diferentes escalas (SILVA et al., 2013; TEIXEIRA; FONSECA, 2014).

Esta evolução na mensuração florestal avança paralelamente à percepção de que o manejo florestal pode ser um componente ativo na conservação da biodiversidade (ZARIN et al., 2005). O manejo florestal pode ser uma alternativa para almejar o uso sustentável do estoque de madeira presente nas florestas secundárias em Santa Catarina (FANTINI; SIMINSKI; GAIO, 2016). O uso sustentável pode trazer renda para pequenos proprietários rurais que atualmente praticam a extração predatória e ilegal de produtos não madeireiros (palmito, plantas ornamentais e medicinais, cipós, sementes, entre outros). Este uso também pode prevenir ou minimizar a conversão da terra para outro uso, interrompendo o processo de sucessão natural da floresta. Essa interrupção é justificada pelos proprietários rurais pela atual impossibilidade de realizar legalmente manejo da floresta nos estágios médio e avançado de regeneração em decorrência das restrições da Resolução CONAMA 04/94 (ANDREACCI; MARENZI, 2017; SIMINSKI; FANTINI, 2004; SIMINSKI; FANTINI; REIS, 2013).

## 2 JUSTIFICATIVA

A obtenção de variáveis dendrométricas acuradas é essencial para o planejamento da exploração dos recursos florestais. Inicialmente, a utilização de tabelas de volume e modelos volumétricos eram as técnicas mais utilizadas (SILVA; SANTANA, 2014). A dificuldade em obter dados a partir de amostragem destrutiva é uma das razões para a escassez de modelos de volume para as tipologias da Mata Atlântica no Brasil. No entanto, a evolução da tecnológica na engenharia florestal também foi observada na área da mensuração florestal. O equipamento TLS pode aperfeiçoar a coleta de dados e por ser uma tecnologia nova, necessita de estudos metodológicos e de aprofundamento (SAARINEN et al., 2017).

Com base nessa problemática, a instalação da unidade experimental de manejo possibilitou a colheita de um número considerável de árvores entre 2015 e 2017 que constituem um banco de dados para o ajuste de modelos de volume total e do fuste. Além, disso, com uma autorização adicional do órgão ambiental do estado (FATMA), foi possível implantar uma parcela amostral de corte raso, possibilitando a aplicação de coleta de dados por varredura de TLS e posterior cubagem rigorosa pelo método destrutivo. Assim, puderam ser comparadas as estimativas de volume obtidos pelo método convencional e por um método inovador.

Embora nas últimas duas décadas pesquisas envolvendo o TLS na área florestal tenham recebido maior destaque, ainda são escassos os estudos em florestas nativas subtropicais (CALDERS et al., 2015; HOPKINSON et al., 2004; SIMONSE et al., 2003). Além disso, o desenvolvimento e melhoria do processamento e extração de informações da nuvem de pontos geradas pela varredura tem sido, ultimamente, o foco de muitos pesquisadores desse campo (TEIXEIRA; FONSECA, 2014). Logo, a área experimental de manejo no município de Guaramirim (SC) permitiu realizar algo inédito na Floresta Ombrófila Densa (FOD) — conduzir a varredura TLS de árvores em pé com a posterior colheita e cubagem rigorosa das árvores escaneadas.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GERAL

Investigar as relações alométricas de espécies de florestas secundárias (FOD) em Santa Catarina, com ênfase em estimativas de volume e na forma do fuste.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

##### 3.2.1 Artigo 1

(i) Testar modelos genéricos e específicos de espécies para volume total e do fuste utilizando um procedimento estatístico robusto;

(ii) Comparar o desempenho de modelos genéricos e específicos de espécies abundantes e economicamente relevantes como o jacatirão-açú - *Miconia cinnamomifolia* (DC) Naudin e a licurana - *Hyeronima alchorneoides* Allemão;

##### 3.2.2 Artigo 2

(i) Testar modelos genéricos e específicos para afilamento do fuste utilizando um procedimento estatístico robusto;

(ii) Comparar o desempenho de modelos genéricos e específicos de espécies abundantes e economicamente relevantes como o jacatirão-açú – *M. cinnamomifolia* e a licurana – *H. alchorneoides*;

##### 3.2.3 Artigo 3

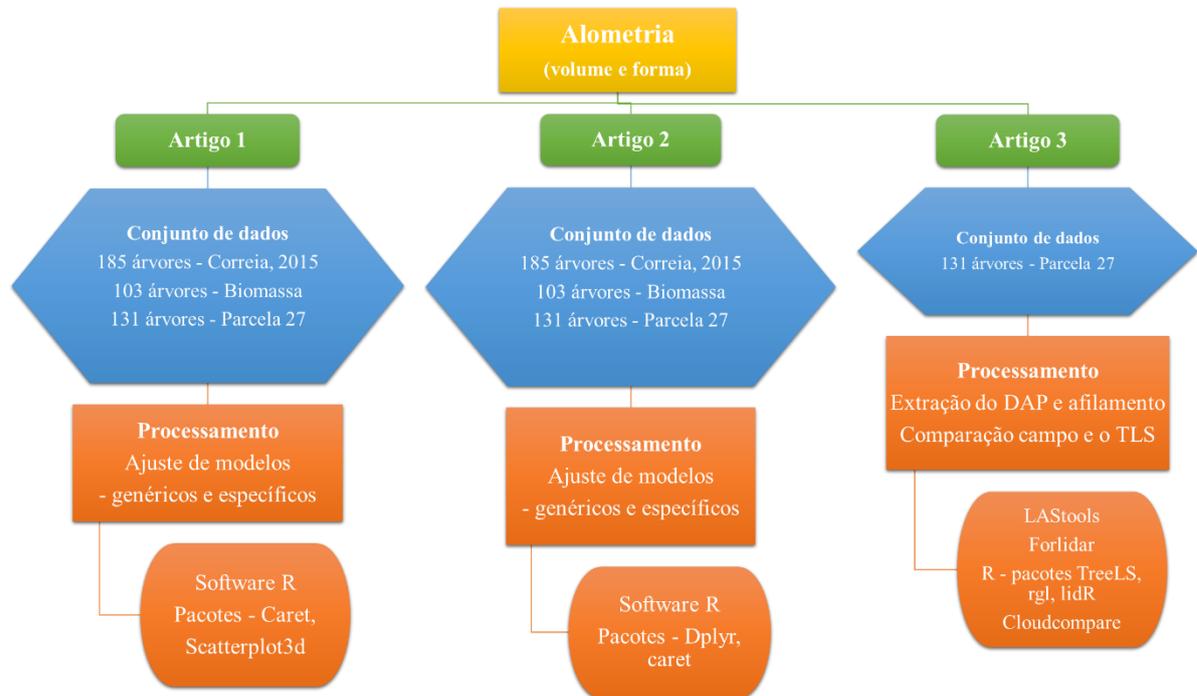
(i) Realizar pela primeira vez o escaneamento de árvores na FOD de Santa Catarina com uso do TLS;

(ii) Extrair variáveis dendrométricas das árvores da parcela (DAP e afilamento);

(iii) Comparar o DAP e afilamento obtidos pelos TLS com as medidas de campo.

O estudo possui três fontes de dados, portanto com intuito de esclarecer o banco de dados utilizado para cada artigo foi criada a figura 1.

Figura 1. Organograma da fonte de dados utilizada em cada artigo da dissertação.



Fonte: a autora.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 MATA ATLÂNTICA - FLORESTA OMBRÓFILA DENSA

Entre todos os domínios da vegetação brasileira, a Mata Atlântica é a mais impactada, resultado da fragmentação e degradação florestal ocasionada pelas atividades humanas (RIBEIRO et al., 2009). A extensão dos remanescentes varia muito entre os estados no domínio da Mata Atlântica. Particularmente, o estado de Santa Catarina possui ainda 29% do seu território coberto por florestas nativas, no entanto, os remanescentes florestais encontra-se muito fragmentados, 80% deles são menores que 50 ha (VIBRANS et al., 2013a).

A Mata Atlântica pode ser dividida em três tipologias: Floresta Ombrófila Densa (FOD), Floresta Ombrófila Mista (FOM) e Floresta Estacional Decidual (FED) (IBGE, 2008). A FOD ainda cobre 40,5% da sua extensão original, sendo a maior proporção entre as três tipologias florestais (VIBRANS et al., 2013b). Porém, a maioria desses remanescentes, cerca de 95%, são compostos por florestas em regeneração, onde as espécies pioneiras e secundárias dominam o processo sucessional (SCHORN; GALVÃO, 2006; SIMINSKI; FANTINI, 2004).

Neste contexto, espécies de crescimento relativamente rápido, como a licurana (*H. alchorneoides*), o jacatirão-açú (*M. cinnamomifolia*) e as canelas (*Nectandra* spp.) são abundantes nessas formações e produzem madeira de qualidade. Portanto, o gerenciamento de florestas secundárias torna-se atraente aos produtores rurais (FANTINI; SIMINSKI; GAIO, 2016). Além disso, vários autores concordam sobre os potenciais dessas espécies em um possível cultivo homogêneo ou misturado e até em sistemas agrossilviculturais (CORADIN; SIMINSKI; REIS, 2011; FANTINI; SIMINSKI; GAIO, 2016; ROLIM, 2018; SCHUCH; SIMINSKI; FANTINI, 2008; SIMINSKI; DOS SANTOS; WENDT, 2016).

### 4.2 MODELOS DE VOLUME PARA ESPÉCIES ARBÓREAS

A realização de um projeto de manejo florestal que vise a conservação e uso consciente das florestas exige um planejamento acurado, que por sua vez, necessita de um conjunto de ferramentas, incluindo modelos de volume de madeira, biomassa e estoque de carbono (JARA et al., 2015). Desta maneira, o volume de madeira é uma das informações essenciais no desenvolvimento do manejo florestal sustentável (ZIANIS et al., 2005). Portanto, são necessários modelos volumétricos estatisticamente robustos que forneçam

estimativas acuradas para o gerenciamento da floresta (PICARD; SAINT-ANDRÉ; HENRY, 2012).

A modelagem através da análise de regressão tem sido amplamente utilizada como solução de muitos problemas florestais relacionados ao manejo. Principalmente, quando o interesse está em estimativas de parâmetros da floresta que utilizam relações biométricas e/ou alométricas, pois possibilitam estimar valores de forma indireta através de equações de regressão (PEREIRA, 2016).

Os modelos de volume de árvores em função de variáveis independentes (DAP e H) começaram a ser desenvolvidos nos anos 1900, justamente após o surgimento das técnicas de análise de regressão. Contudo, a partir da década de 1960, com o surgimento dos computadores, que a modelagem se tornou mais difundida (ANDRADE; SCHMITT, 2017). Os modelos podem ser divididos em: simples entrada, quando utilizam apenas uma variável independente (DAP) ou modelos de dupla entrada, quando utilizam as variáveis DAP e H para estimar o volume (ZIANIS et al., 2005).

O processo de modelagem deve seguir a etapa de: I) amostragem, que no caso do estudo do volume consiste na cubagem rigorosa de indivíduos que representem a população (geralmente distribuídos em classes diamétricas); II) ajuste, que determina os coeficientes e métricas de qualidade e III) seleção dos modelos, onde é realizada a escolha do melhor modelo, de acordo com os critérios estabelecidos (MOSER; OLIVEIRA, 2017).

A cubagem rigorosa estabelece a divisão do fuste em “n” seções, onde ocorre a medição de diâmetros ou circunferências sucessivas em alturas pré-determinadas. Esse procedimento pode ser realizado pelo método destrutivo (derrubada da árvore) ou método não-destrutivo (com a árvore em pé). Portanto, com os comprimentos das seções e diâmetros medidos calcula-se o volume das seções (toras) usando diferentes métodos de cubagem (FINGER, 1992).

Os métodos de cubagem rigorosa são denominados de absolutos ou relativos; absolutos são aqueles em que o comprimento da seção (tora) não tem vínculo com o comprimento total da árvore. Nos métodos relativos, o comprimento da seção (tora) representa um percentual do comprimento total da árvore. O método relativo mais consagrado é o de Hohenadl e os métodos absolutos mais difundidos são Smalian, Huber e Newton (NICOLETTI et al., 2016). O método de Smalian é indicado para formas do fuste paraboloides e utiliza demarcações fixas de distância e as medições dos diâmetros acontecem na base ou no topo de cada seção (GIMENEZ et al., 2015), sendo este o método utilizado no presente estudo.

Modelos ajustados de acordo com a tipologia florestal ou a determinadas espécies são necessários e produzem estimativas do volume de madeira de forma mais precisa, pois foram ajustados às particularidades estruturais e de composição de cada tipo de floresta e/ou à arquitetura de uma espécie (VIBRANS et al., 2015). A maioria dos estudos relacionados a volumetria de árvores no Brasil restringe-se aos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* (CORREIA; FANTINI; PIAZZA, 2017). Somado a isso, o estudo de volume para espécies nativas está concentrado na região Amazônica e no Cerrado devido a possibilidade de manejo florestal perante a legislação nessas formações florestais. Como o exemplo de Barreto et al. (2014) que desenvolveram modelos volumétricos para um projeto de manejo florestal comunitário no Estado do Pará, utilizando dados de 132 árvores de 23 espécies comerciais.

Na Mata Atlântica os estudos são limitados, pode-se destacar estudos relacionados a FOD em São Paulo (NUNES, 2013). No estado do Paraná pode-se destacar o estudo de Santos et al., (2006) e no Rio Grande do Sul de Borsoi, (2004) para FOM. Além disso, modelos volumétricos foram desenvolvidos para espécies com interesse econômico, como a bracatinga - *Mimosa scabrella* Benth (MACHADO et al., 2008), a canela-imbuia - *Ocotea porosa* Nees & Mart (SANTOS et al., 2012) e a canjerana (*Cabralea canjerana*) (Vell.) Mart (DURLO; DENARDI, 1998) e também para as espécies de interesse comercial na floresta estacional semidecidual em Minas Gerais (SCOLFORO et al., 2008; SCOLFORO; MELLO; LIMA, 1994).

O estado de Santa Catarina segue essa tendência; dentre as poucas publicações existentes pode-se destacar o estudo de Silveira, (2008), além de trabalhos específicos para o jacatirão-açú – *M. cinnamomifolia* (SCHUCH; SIMINSKI; FANTINI, 2008) e para *Tibouchina pulchra* Cogn. (OLLER, 2011). Além dessas publicações, Vibrans et al. (2015) propuseram modelos de volume genéricos e específicos para o fuste nas três tipologias florestais em Santa Catarina, utilizando dados do IFFSC de 2.127 árvores com DAP variando de 10 a 76 cm. Contudo, o estudo mais recente foi realizado por Correia; Fantini; Piazza, (2017) em uma formação secundária da FOD.

Com base nessa problemática, a instalação da unidade experimental de manejo possibilitou a colheita de um número considerável de árvores. As informações coletadas geraram um banco de dados para o estudo do ajuste de modelos de volume total e do fuste, representativo em áreas declivosas das florestas iniciais e secundárias de Santa Catarina.

#### 4.3 MODELOS DE AFILAMENTO

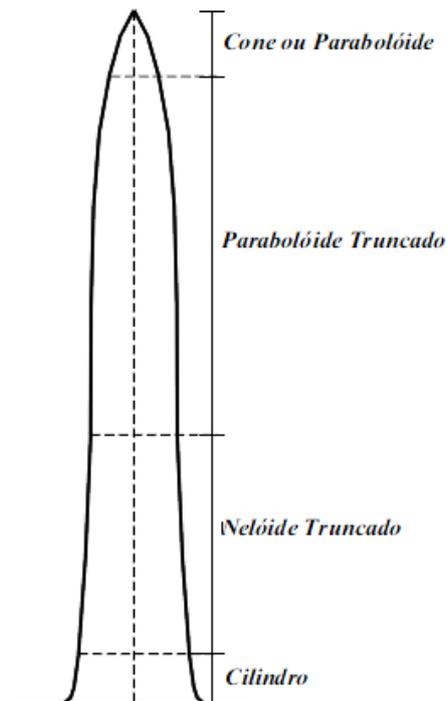
A utilização potencial das florestas nativas depende da correta determinação do seu potencial produtivo, sendo que, o conhecimento do volume de madeira representa uma das informações essenciais no desenvolvimento do manejo sustentável (JARA et al., 2015). Desta forma, avançando nas metodologias de estimativa de volume de madeira surgem os modelos de afilamento (DE-MIGUEL et al., 2012). Além disso, o ajuste de modelos de afilamento para espécies nativas da FOD pode soar utópico; no entanto, a possibilidade de otimizar o uso da floresta nativa que é uma preocupação importante diante dos estoques relativamente baixos de madeira e também do crescimento mais lento, comparado com o das espécies dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, representa o real sentido do uso consciente (ANDRAE; SCHNEIDER; DURLO, 2018).

Ademais, a oferta de madeira de crescimento relativamente rápido com potencial de comercialização é existente, desta forma o gerenciamento de florestas incluindo o interesse em manejar ou até mesmo em sistemas agrossilviculturais precisa ser discutido (FANTINI; SIMINSKI; GAIO, 2016). Ao mesmo tempo cresce a necessidade de estudos e informações essenciais para que o próximo passo seja tornar essa ideia atraente aos produtores rurais e assim conciliar os objetivos de conservação com o uso direto dos recursos florestais da região (ROLIM, 2018).

No contexto do manejo florestal é importante quantificar o sortimento das árvores a serem colhidas, o que possibilita estimar seu potencial comercial e decidir sobre a viabilidade financeira do manejo previsto. Os modelos de afilamento são uma das ferramentas para a quantificação dos sortimentos (ANDRADE; SCHMITT, 2017). O afilamento do tronco é descrito como a diminuição do diâmetro ao longo do fuste, partindo da base para o topo do fuste, que pode ser expressa através de modelos matemáticos (HUSCH et al., 2003). Esses modelos podem ser denominados ainda de *taper equations* ou funções de forma, capazes de descrever o perfil do fuste com acurácia (FAVALESSA et al., 2012). Contudo, existem variações intraespecíficas e interespecíficas ao longo do fuste, que podem ser causadas pelo manejo empregado (densidade), idade, qualidade do sítio, entre outros fatores (MULLER; FINGER; SCHNEIDER, 2005).

Além disso, a forma do fuste geralmente não pode ser identificada com um único sólido geométrico. A representação gráfica que melhor descreve o fuste é o seu seccionamento em quatro sólidos geométricos truncados denominados cilindro, neilóide, parabolóide e cone (Figura 2).

Figura 2. Representação da forma do fuste segmentado.



Fonte: Adaptado de Finger, 1992.

A importância do estudo do afilamento é reconhecida há mais de 100 anos (FANG; BAILEY, 1999). De acordo Nicoletti et al. (2016), inicialmente Hojer (1903) usou funções matemáticas para descrever a forma do fuste de *Picea abies* L. e Jonson (1910) adicionou uma constante biológica a esse modelo; em seguida, Behre (1924,1927) desenvolveu uma expressão hiperbólica simples. Contudo, segundo Andrade (2014), a partir da década de 60 intensificou-se o estudo desse assunto na área florestal e modelos desenvolvidos naquela época são utilizados ainda hoje. Ainda, de acordo com Nicoletti et al. (2016), dentre esses estudos de modelos de afilamento podem ser destacados os de Schöpfer (1966) - também conhecido como polinômio do 5º, Kozak et al. (1969), Demaerschalk (1972), Ormerod (1973), Goulding e Murray (1976), Hradetzky (1976), Max e Burkhart (1976).

O processo de modelagem do afilamento do fuste segue as mesmas etapas descritas na modelagem do volume, sendo: a amostragem, o ajuste e a seleção dos modelos. A mudança ocorre no banco de dados, nos modelos de afilamento o ajuste é realizado utilizando todos os dados da cubagem rigorosa, ou seja, cada informação de altura e diâmetro coletada em campo.

Como estudo inicial de afilamento no Brasil pode-se destacar o trabalho de Friedl (1989), com a espécie *Araucaria angustifolia*. O surgimento e aprimoramento dos

computadores possibilitou um crescimento desses estudos em todo mundo, assim como no Brasil. A partir da década de 1990 houve um aumento dos modelos de *taper*, destacando trabalhos iniciais para o gênero *Pinus* e *Eucalyptus* como: Figueiredo-Filho et al. (1996), Schneider et al. (1996), Fischer et al. (2001), Assis et al. (2001), que difundiram-se rapidamente.

Em contrapartida, quando considera-se espécies nativas são encontrados poucos trabalhos, como os de Chichorro, Resende, Leite (2003) que utilizaram espécies da Mata Atlântica; Leite et al. (2006) que trabalharam com *Virola surinamensis* (Rol. ex Rottb.) Warb.; Queiroz et al. (2008) que relataram sobre a espécie *M. scabrella*; Soares et al. (2011) que investigaram diferentes espécies florestais brasileiras; Lansanova et al. (2013) que utilizaram espécies comerciais de uma Floresta Amazônica mato-grossense; e, mais recentemente, Figueiredo Filho et al. (2015) que pesquisaram povoamentos de *A. angustifolia* e Nunes e Görgens (2016) que estudaram a aplicação de inteligência artificial no processo da modelagem do afilamento. Pode-se destacar ainda o trabalho de Favalessa et al. (2012) com *Tectona grandis* L.f; embora não seja uma nativa brasileira, ela é considerada uma espécie produtora de madeira nobre.

Apesar desses trabalhos relatados anteriormente, ainda são escassas as informações para espécies nativas da FOD. Somado a isso, a acurácia das estimativas de volume a partir de modelos de afilamento dependerá do modelo utilizado e da forma do tronco, portanto, novamente justifica-se o ajuste adaptado as particularidades estruturais e de composição de cada tipologia florestal (VIBRANS et al., 2015). Modelos de afilamento são ligeiramente mais complexos comparado com os modelos de volume, no entanto, oferecem uma maior quantidade de informações. Quanto mais se qualifica os produtos advindos da madeira, mais se torna necessária a utilização das equações de afilamento.

Os modelos de afilamento podem ser divididos em segmentados quando são formados por modelos justapostos, cada um representado uma porção do fuste; e não segmentados quando um modelo único explica toda extensão do fuste (ANDRADE; SCHMITT, 2017). Devido a esta flexibilidade, as funções de afilamento se destacam na determinação do volume de árvores pois permitem estimar: o diâmetro em qualquer ponto do fuste, a altura no fuste em que se encontra um determinado diâmetro e o volume entre dois pontos quaisquer no fuste (KOHLER; KOEHLER; FIGUEIREDO FILHO, 2013).

Desse modo, os modelos de afilamento podem representar uma importante ferramenta que possibilita a otimização dos recursos florestais, observando o conceito de múltiplos produtos da floresta. Além disso, através dessa modelagem é possível representar a forma do

fuste, que também tem influência na qualidade e quantidade de produtos (FIGUEIREDO FILHO et al., 2014; KOHLER; KOEHLER; FIGUEIREDO FILHO, 2013). A determinação e interpretação das relações entre a forma do fuste possibilita posteriormente influenciá-la e prognosticar os produtos que serão obtidos do povoamento (MULLER; FINGER; SCHNEIDER, 2005).

Adicionalmente, os desperdícios da utilização da madeira oriundos pela falta de conhecimento de técnicas e processos necessários para transformação, principalmente em espécies nativas, estimulam a pesquisa e o desenvolvimento de modelos robustos estatisticamente aplicados ao manejo florestal. Portanto, aprimorar o aproveitamento madeireiro torna os projetos de manejo mais rentáveis (ASSIS et al., 2002; YOSHITANI JUNIOR et al., 2012).

Novamente, as dificuldades mencionadas anteriormente podem justificar a escassez de modelos de afilamento para FOD. Sob este aspecto, a instalação da unidade experimental de manejo possibilitou a colheita de um número considerável de árvores. As informações coletadas geraram um banco de dados também para o estudo sob o ponto de vista dos modelos de afilamento das florestas secundárias catarinenses com características de sítio semelhantes.

#### 4.4 TERRESTRIAL LASER SCANNER

Conforme mencionado anteriormente, o levantamento do volume de madeira presente na floresta é uma informação básica para o aproveitamento adequado do seu potencial. Desse modo, seguindo uma evolução surgem novas tecnologias na obtenção de variáveis dendrométricas, que são utilizadas na estimativa de volume de madeira.

O volume da árvore individual ou na parcela é tradicionalmente calculado usando relações alométricas de DAP e altura. A coleta desses parâmetros *in situ* é realizada durante o inventário florestal e geralmente é manual (PICARD; SAINT-ANDRÉ; HENRY, 2012). A coleta pode ser demorada, dispendiosa e suscetível a erros, nem sempre rastreáveis. Como por exemplo, nas estimativas de altura de árvores, onde a acurácia e a precisão são limitados pela experiência do observador e do uso do instrumento. Além disso, as condições adversas do local podem dificultar a obtenção de medições (LIANG et al., 2018). Sob essa problemática, os recentes avanços nas tecnologias de levantamento a *laser* têm o potencial de realizar uma mensuração de campo semi ou automatizada e não destrutiva. Por consequência, a obtenção

das variáveis dendrométricas por meio desta tecnologia torna-se uma possibilidade (LIANG et al., 2016).

As limitações tecnológicas presentes na época do surgimento do *laser* levaram ao maior desenvolvimento dessa tecnologia somente a partir da década de 1950. A utilização do *laser* em meados de 1960 possibilitou o avanço na exatidão dos levantamentos topográficos e geodésicos. Além disso, ela promoveu a evolução desta para o surgimento da tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) que utiliza a energia *laser* para equipamentos de varredura na obtenção de dados bidimensionais ou tridimensionais acerca dos alvos (GIONGO et al., 2010; LINGNAU et al., 2009). Durante a década de 1980, a tecnologia *laser* recebeu implementos como o *NASA's Atmospheric Oceanographic Lidar* (AOL) e *Airborne Topographic Mapper* (ATM), instrumentos com a função de medição de distância. Na década de 1990, foram criados sensores mais confiáveis, como o *Shuttle Laser Altimeter* (SLA) e o *Mars Observer Laser Altimeter* (MOLA), idealizados para realizar medidas de extensas áreas do oceano e da superfície terrestre (BUFTON et al., 1995; FLOOD, 2001; GIONGO et al., 2010).

A tecnologia LiDAR é útil em diversas áreas da engenharia e tem grande potencial de aplicação na mensuração florestal (PAREJA; PABLOS; OLIVA, 2013). Por meio da aplicação de princípios de SR, ela possibilita a coleta de dados (dendrométricos) com alta precisão e de forma não destrutiva (LINGNAU et al., 2009; MAAS et al., 2008). Os equipamentos LiDAR são classificados em ALS (*Airborne Laser Scanner*), MLS (*Mobile Laser Scanning*) e TLS (*Terrestrial Laser Scanner*); ambos os sistemas podem fazer varreduras com precisão milimétrica entre o equipamento e o objeto, dependendo da especificação técnica do equipamento. No entanto, o ALS necessita de um avião ou um veículo aéreo não tripulado (VANT) para a condução do procedimento de coleta de dados, o que o torna mais custoso que o TLS (GIONGO et al., 2010; SILVA et al., 2013).

A tecnologia TLS está se difundindo na determinação de variáveis dendrométricas e permite, através de múltiplas varreduras, o mapeamento em 3D da vegetação (SILVA et al., 2013). Portanto, o TLS pode vir a ser uma excelente ferramenta com potencial de reduzir incertezas na estimativa do volume, biomassa e, conseqüentemente, do estoque de carbono nas florestas (CALDERS et al., 2015; SAARINEN et al., 2017).

Os métodos convencionais de estimativa de variáveis como volume e biomassa estão fundamentados na aplicação de modelos matemáticos que sintetizam a relação entre a variável de interesse (e.g., volume) e variáveis como diâmetro à altura do peito e altura (CHAVE et al., 2005). A construção de modelos para prever volume ou biomassa necessita de medições

precisas em campo das variáveis de interesse. À vista disso, o TLS pode contribuir ao processo de coleta de dados, uma vez que a precisão atingida pode vir a ser maior que a alcançada adotando-se métodos convencionais de mensuração (ÅKERBLOM et al., 2016; HUDAK; EVANS; STUART SMITH, 2009). Contudo, os sistemas TLS são classificados conforme seu princípio de funcionamento, sendo denominados como: triangulação (*Triangulated Scanner*), tempo de percurso do *laser* (*Time-of-flight*) e mudança de fase (*Phase-difference*) (SILVA et al., 2013).

Ademais, dados LiDAR podem tornar-se matéria prima para diversos estudos científicos e podem ser combinados com ferramentas para o monitoramento global de estimativas de carbono, entre outros. Pode ainda, mapear detalhadamente áreas restritas que podem ser utilizadas para calibrar/validar ferramentas globais como dados coletados por satélites (e.g., Landsat). De forma prática, estudos desta natureza podem contribuir ao monitoramento de variáveis ambientais como, por exemplo, o estoque de carbono, aspecto muito comum na formulação de políticas climáticas (DASSOT et al., 2012).

Apesar da tecnologia ser mais antiga (década de 1980), o primeiro TLS comercial foi introduzido no mercado em 1998. Desde então, esse equipamento passou por melhorias no seu tamanho, peso e até preço. Além disso, obteve ganho em resolução espacial e velocidade de medição. Nas últimas duas décadas, houve um progresso expressivo nas pesquisas envolvendo o TLS no setor florestal e inúmeros aspectos foram abordados (CABO et al., 2018; LIANG et al., 2016).

Inicialmente, os estudos concentravam-se na detecção de árvores em parcelas, e obtenção de informações dendrométricas básicas, como DAP, H e frequência (ASCHOFF; SPIECKER, 2004; BIENERT et al., 2006; HOPKINSON et al., 2004; MAAS et al., 2008; MURPHY; ACUNA; DUMBRELL, 2010; PFEIFER; GORTE; WINTERHALDER, 2004; SIMONSE et al., 2003). Atualmente, com o avanço dos algoritmos para processamento dos dados, o TLS mostra-se uma ferramenta para obtenção de atributos florestais de alta qualidade (LIANG et al., 2018), além da modelagem completa da árvore em 3D (CÔTÉ; FOURNIER; EGLI, 2011; DASSOT et al., 2012; DELAGRANGE; JAUVIN; ROCHON, 2014; LEFSKY; MCHALE, 2008; SCHILLING; SCHMIDT; MAAS, 2012).

Além disso, o TLS também vem sendo usado em estudos de ecologia florestal, como por exemplo, na estimativa do índice de área foliar (IAF) e distribuição da área foliar (BÉLAND et al., 2011; HOPKINSON et al., 2013; HOSOI; OMASA, 2006; HUANG; PRETZSCH, 2010; JUPP et al., 2008; STRAHLER et al., 2008; ZHENG; MOSKAL; KIM, 2013) (Hosoi e Omasa, 2006; Strahler et al., 2008; Jupp et al., 2009; Huang e Pretzsch, 2010;

Hopkinson et al., 2013; Zheng et al., 2013, Béland et al., 2011). Nesse contexto, a partir de 2014 foi lançado um projeto internacional de estudos com TLS pela Organização Europeia de Pesquisa em Dados Espaciais e coordenado pelo Instituto de Pesquisa Geoespacial Finlandês. O Projeto é composto por 18 grupos de pesquisa de três continentes, Ásia, Europa e América do Norte. Os principais objetivos desse projeto são avaliar o potencial de aplicação de TLS na digitalização de florestas, avaliar a capacidade de algoritmos recentes, estabelecer procedimentos padrões e criar referências confiáveis.

Para variar um pouco: No entanto, , as pesquisas com TLS ainda são escassas em florestas nativas subtropicais (CALDERS et al., 2015; HOPKINSON et al., 2004; SIMONSE et al., 2003; TEIXEIRA; FONSECA, 2014). Desta forma, a área experimental de manejo no município de Guaramirim (SC) contribuiu para realizar algo inédito na FOD de Santa Catarina — conduzir a varredura TLS de árvores em pé com a posterior colheita destas.

## 5 ARTIGO 1 – MODELOS VOLUMÉTRICOS ROBUSTOS PARA FLORESTAS SECUNDÁRIAS NA MATA ATLÂNTICA DO SUL DO BRASIL

### 5.1 INTRODUÇÃO

As florestas são uma fonte indispensável de recursos ecológicos, sociais e econômicos, especialmente nos trópicos que abrigam as florestas mais biodiversas do planeta (COSTANZA et al., 2014; PRÖBSTL-HAIDER, 2015). No entanto, essa também é a região com maior pressão antrópica. Sob o ponto de vista da vegetação brasileira, a Mata Atlântica é o domínio mais impactado, resultado da fragmentação e degradação florestal ocasionada pelas atividades humanas (RIBEIRO et al., 2009b). O estado de Santa Catarina possui ainda 29% do seu território coberto por florestas nativas. No entanto, os remanescentes florestais encontram-se muito fragmentados, 80% deles são menores que 50 ha (VIBRANS et al., 2013a).

A FOD em SC ainda cobre 40,5% da sua extensão original, sendo a maior proporção entre as três tipologias (FOD, FOM, FED) da Mata Atlântica (VIBRANS et al., 2013b). Contudo, cerca de 95% desses remanescentes são compostos por florestas em regeneração, nos quais as espécies pioneiras e secundárias dominam o processo sucessional (SCHORN; GALVÃO, 2006; SIMINSKI; FANTINI, 2004). Nesta conjuntura, espécies de crescimento relativamente rápido, como a licurana (*H. alchorneoides*), o jacatirão-açú (*M. cinnamomifolia*) e as canelas (*Nectandra* spp.) são abundantes nessas formações e produzem madeira de qualidade. Portanto, o gerenciamento de florestas secundárias torna-se atraente aos produtores rurais (FANTINI; SIMINSKI; GAIO, 2016). Além disso, vários autores concordam sobre o potencial das florestas secundárias, até mesmo em sistemas agrossilviculturais (ROLIM, 2018).

A conservação pelo uso exige um planejamento apurado e depende de ferramentas adequadas que incluem modelos de volume de madeira, biomassa e estoque de carbono (JARA et al., 2015). Desta maneira, o volume de madeira é uma das informações essenciais no desenvolvimento do manejo sustentável (ZIANIS; SEURA, 2005). Portanto, são necessários modelos volumétricos estatisticamente robustos que forneçam estimativas acuradas para o gerenciamento da floresta (PICARD; SAINT-ANDRÉ; HENRY, 2012).

A modelagem de volume de árvores em função de variáveis independentes (DAP e H) é consolidada, seu início data de 1900, após o surgimento das técnicas de análise de regressão. Contudo, a partir da década de 1960, com o surgimento dos computadores, que a modelagem

se tornou mais difundida (CONCEIÇÃO, 2004). Modelos ajustados de acordo com a tipologia florestal ou a determinadas espécies são necessários e produzem estimativas do volume de madeira de forma mais precisa, pois foram ajustados às particularidades estruturais e de composição de cada tipo de floresta e/ou à arquitetura de uma espécie (VIBRANS et al., 2015).

Na Mata Atlântica os estudos são limitados, pode-se destacar estudos relacionados a FOD em São Paulo (NUNES, 2013) e no Espírito Santo (JORGE, 1982; SOUZA e JESUS, 1991; CHICHORRO; RESENDE; LEITE, 2003). No estado do Paraná pode-se destacar o estudo de Santos et al., (2006) e no Rio Grande do Sul o de Borsoi, (2004) para FOM. Além disso, modelos volumétricos foram desenvolvidos para espécies com interesse econômico, como a bracatinga – *M. scabrella* Benth (MACHADO et al., 2008) a canela-imbuia – *O. porosa* Nees & Mart (SANTOS et al., 2012) e a canjerana – *C. canjerana* (Vell.) Mart (DURLO; DENARDI, 1998). Também para as espécies de interesse comercial na floresta estacional semidecidual em Minas Gerais (SCOLFORO et al., 2008; SCOLFORO; MELLO; LIMA, 1994).

O estado de Santa Catarina segue essa tendência, dentre as poucas publicações existentes pode-se destacar o estudo de Silveira, (2008), além de trabalhos específicos para o jacatirão-açú – *M. cinnamomifolia* (SCHUCH; SIMINSKI; FANTINI, 2008) e para *T. pulchra* (OLLER, 2011). Além dessas publicações, (VIBRANS et al., 2015) propuseram modelos de volume genéricos e específicos para o fuste nas três tipologias florestais em Santa Catarina, utilizando dados do IFFSC de 2.127 árvores com diâmetros na altura do peito (D) variando de 10 a 76 cm. Contudo, o estudo mais recente foi realizado por Correia; Fantini; Piazza (2017) em uma formação secundária da FOD.

Com base nesse assunto, esse artigo tem objetivo de (i) testar modelos genéricos e específicos de espécies para volume total e do fuste utilizando um procedimento estatístico robusto de validação cruzada; (ii) Comparar o desempenho de modelos genéricos e específicos de espécies abundantes e economicamente relevantes como o jacatirão-açú – *M. cinnamomifolia*. e a licurana – *H. alchorneoides*.

## 5.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.2.1 Área de estudo

A área de estudo foi denominada de Projeto Madeira Nativa e compreende aproximadamente 42 ha localizados em Guaramirim, Santa Catarina (lat. 26°32'01" S; long. 49°02'30" W) pertencente a Floresta Ombrófila Densa (IBGE, 2008) também classificada como Floresta Subtropical Pluvial (KLEIN, 1978; OLIVEIRA-FILHO, 2015). O local de estudo possui uma floresta secundária com aproximadamente 35 anos, sem intervenções nos últimos 30 anos, resultante da sucessão após o abandono da pastagem e parcialmente enriquecida com espécies florestais (*M. cinnamomifolia*, *H. alchorneoides* e *Nectandra* spp.) típicas da região. Segundo Silva, Klitzke e Uller (2015), essa floresta tem uma densidade de 1.807,6 árvores.ha<sup>1</sup> (DAP  $\geq$  5 cm) e uma área basal de 32,3 m<sup>2</sup>.ha<sup>1</sup>; as espécies *H. alchorneoides* e *M. cinnamomifolia* são dominantes, contribuindo para 23,2% e 6,5% da área basal, respectivamente. De acordo com a classificação de Köppen, o local de estudo é influenciado pelo clima Cfa – subtropical mesotérmico, com um verão quente e sem estação seca (ALVARES et al., 2013). De acordo com Steinbach et al., (2015) a precipitação é uniformemente distribuída durante todo o ano, variando entre 1500 e 1700 mm e a temperatura média anual entre 20 e 21 °C. O mapa de localização do Projeto Madeira Nativa está disponível no Anexo I.

### 5.2.2 Coleta de dados

O banco de dados utilizado para o estudo dos modelos de volume contém informações de 419 árvores, que foram colhidas em diferentes etapas. As informações das árvores da primeira etapa (185 indivíduos) foram obtidas do estudo de Correia, 2015; a segunda etapa foi composta por 103 indivíduos utilizados para amostragem de biomassa arbórea e a terceira etapa consiste no corte raso de 131 indivíduos de uma nova parcela instalada na área de estudo, denominada de parcela 27 (40 x 40 m).

Desta forma, determinou-se o volume total e do fuste de 419 árvores, pertencentes a 35 famílias e 83 espécies, pelo uso do método de Smalian. O diâmetro do fuste foi medido nas alturas de 0,1; 0,3; 0,7; 1,0; 1,3; 2,0; 3,0 m e consecutivamente a cada metro até a extremidade superior, que foi definida por uma bifurcação significativa do fuste principal. O

diâmetro dos galhos em cada metro desde sua base até o limite de diâmetro de 5 cm também foi medido. Os diâmetros foram medidos usando fita diamétrica ou suta. Ao usar a suta, foram registradas duas medidas perpendiculares em cada seção. Somado a isto, registrou-se a altura total e do fuste usando uma trena (Figura 3).

Figura 3. Detalhamento do procedimento de cubagem rigorosa. A – Medição dos diâmetros até o DAP antes da derrubada; B – Derrubada da árvore; C e D – marcação e medição dos diâmetros ao longo do fuste, em C com fita diamétrica, em D, com suta.



Fonte: a autora.

### 5.2.3 Ajuste, seleção e validação

Foram ajustados dez modelos genéricos (Tabela 1) para prever o volume total e do fuste com casca, através do método dos mínimos quadrados ordinários. Cada modelo foi ajustado a um subconjunto de 70% (n=294) do total de dados. O subconjunto restante (n = 125) foi utilizado para avaliar o desempenho do modelo e posterior seleção e validação. Os subconjuntos foram selecionados aleatoriamente. Observações influentes (*outliers*) foram investigadas através da associação da distância de Cook, calculada para cada observação nos subconjuntos de ajuste - e o percentil de distribuição F com graus de liberdade p e n - p, onde p é o número de parâmetros de regressão, e n é o número de observações no subconjunto de ajustes. Observações que apresentaram  $F > 0.5$  foram consideradas influentes e, portanto, foram retiradas do conjunto de ajuste (NETER et al., 1996).

Da mesma forma, foram ajustados modelos específicos para as duas espécies mais abundantes no local do estudo, sendo *M. cinnamomifolia* (n = 36; DAP: 14,0-41,0 cm; altura do fuste (Ht): 14,9-25,6 m; altura do fuste (Hf): 4,6-16,9 m) e *H. alchorneoides* (n = 53; DAP: 6,2-46,9 cm; (Ht): 6,5-27,8 m; intervalo de Hf: 2,5-25,2 m). Devido aos tamanhos de amostra menores, optou-se pela abordagem de validação cruzada *leave-one-out*. O Viés (%),  $R^2$  \*, RMSE e MAPE (%) dos modelos foram calculados com as mesmas equações. Também se

comparou o desempenho do melhor modelo genérico para o volume total e o tronco, aplicando-os usando cada observação "omitida".

Após o ajuste dos modelos, a incerteza associada à estimação dos parâmetros de regressão foi avaliada através do erro padrão relativo percentual (PRSE) (Eq. 1). O parâmetro atinge a significância estatística se  $PRSE \leq 50\%$ , considerando uma amostra com pelo menos 30 graus de liberdade e  $\alpha = 0,05$  (SILESHI, 2014; MOSER e OLIVEIRA 2017). A qualidade do ajuste foi avaliada através das métricas calculadas com valores na escala original de medição; sendo: o Viés (Eq. 2); o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ); raiz do erro quadrático médio (RMSE, Eq. 3) e o erro percentual absoluto médio (MAPE, Eq. 4) (SILESHI, 2014). O  $R^2$  pode ser denotado como pseudo- $R^2$  ( $R^{2*}$ ) quando calculado para modelos não-lineares, pois seus pressupostos subjacentes não são completamente cumpridos (ANDERSON-SPRECHER, 1994). O procedimento foi repetido 1.000 vezes, a partir do qual os valores médios dos parâmetros de regressões e seus PRSE, juntamente com os valores médios das métricas de desempenho (viés, RMSE, MAPE) foram obtidos. Os parâmetros da regressão foram calculados da seguinte maneira:

$$PRSE(\%) = \frac{1}{R} \sum_{R=1}^R \frac{SE(\hat{\theta}_k)}{|\hat{\theta}_k|} \times 100 \quad (\text{Eq.1})$$

$$Viés(\%) = \frac{1}{R} \sum_{R=1}^R \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\hat{V}_i - V_i}{V_i} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$RMSE = \frac{1}{R} \sum_{R=1}^R \left( \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_i)^2}{n} \right)^{1/2} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$MAPE(\%) = \frac{1}{R} \sum_{R=1}^R \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|V_i - \hat{V}_i|}{V_i} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde,  $\hat{\theta}_k$  = parâmetro de regressão estimado; SE = erro padrão;  $V_i$  = volume observado da  $i^a$  árvore;  $\hat{V}_i$  = volume previsto para a  $i^a$  árvore;  $n$  = número de árvores utilizadas no procedimento de validação;  $R$  = número de iterações, ou seja, 1.000;  $p$  = número de parâmetros de regressão; SSE = soma de erros quadrados da regressão.

A seleção dos melhores modelos é embasada nos menores valores RMSE, Viés e MAPE (Sileshi, 2014; Wagenmakers; Farrell, 2004). Da mesma forma, o PRSE dos melhores modelos foi avaliado.

O fator de correção de Baskerville (1972) (BCF) foi aplicado aos valores dos volumes preditos derivados de modelos linearizados. O BCF é dado por  $\exp(s^2_{res})/2$ , onde  $s^2_{res}$  é a variância residual obtida a partir da ANOVA da regressão. As previsões geradas pelo melhor modelo selecionado foram plotadas contra os valores observados em um gráfico 1:1. Os valores observados (eixo y) foram plotados em relação aos valores previstos (eixo dos x) para avaliar a distribuição residual de padrões incomuns. Os procedimentos de ajuste foram realizados no software R (R CORE TEAM).

### 5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.3.1 Modelos genéricos

Os modelos genéricos para o volume do fuste apresentaram RMSE variando de 0,07 a 0,14 m<sup>3</sup> e MAPE variando de 9,5 a 44,4%. O modelo nº 9 apresentou o melhor desempenho, pois gerou RMSE = 0,07 m<sup>3</sup> e MAPE = 9,5%, e seus parâmetros eram estáveis (PRSE <50%; Tabela 1). O modelo mostrou viés positivo, embora tenha sido próximo de zero (1,0%). O modelo nº 8 também apresentou os menores valores Viés e MAPE e parâmetros estáveis; além disso o modelo nº 4 apresentou resultados semelhantes ao modelo nº 8, no entanto, o intercepto mostrou-se instável, PRSE  $\geq$  50% desencorajando o uso desse modelo. Os modelos de volume de fuste necessitam a adição da variável H.

Os modelos genéricos para o volume total apresentaram menor desempenho em comparação aos modelos de volume do fuste. O RMSE variou de 0,14 a 0,18 m<sup>3</sup> e o MAPE variou de 15,2 a 60,2%. O melhor desempenho foi novamente alcançado pelo modelo nº 9; RMSE = 0,16 m<sup>3</sup> e MAPE = 15,2% (Tabela 1). Adicionalmente, esse modelo produziu um viés próximo de zero (2,5%). O gráfico 1: 1 dos resíduos também revelou um bom ajuste do modelo aos dados e nenhuma evidência de heterocedasticidade forte foi constatada.

Os modelos nº 8 e nº 10 apresentaram valores de Viés, RMSE e MAPE semelhantes ao modelo 9, com parâmetros estáveis PRSE <50%. O modelo 5 apresentou o menor valor de Viés, no entanto, os parâmetros são muito elevados (instáveis), devido a colinearidade entre as variáveis preditoras que inflam o PRSE e invalidam o modelo, pois provocam a perda de

significância dos parâmetros. O Modelo nº 7, apenas com a variável preditora DAP apresentou bons resultados e pode ser uma alternativa quando há incerteza na estimativa de H (altura).

A qualidade geral dos modelos pode ser considerada satisfatória, fornecendo ferramentas úteis na estimativa de volume em operações de manejo florestal na Floresta Ombrófila Densa em Santa Catarina. Os modelos de volume de fuste superaram os modelos de volume total de árvore, como esperado. Os dados do volume do fuste são geralmente mais homogêneos do que os dados do volume total das árvores devido ao fato de os atributos geométricos dos fustes serem melhor abordados por uma combinação de diâmetro (DAP) e altura (H) ou a dificuldade do modelo de considerar galhos. Embora os modelos para estimar o volume total de árvores obtiveram um menor desempenho, ainda são úteis, especialmente diante da falta de tais modelos para espécies nativas. Como mencionado anteriormente, o processo de coleta de dados pelo método destrutivo justifica parcialmente a escassez de modelos, ainda mais para volume total.

Apesar disso, Scolforo et al. (2008) construiu modelos para prever o volume total de árvores para espécies nativas de interesse comercial em Minas Gerais. Além disso, quando o volume da copa é proporcionalmente alto em relação ao volume total da árvore, isso se torna um ponto crítico. De fato, no presente estudo, os galhos grossos ( $\geq 5$  cm) representaram 35% do volume total das árvores. Essa quantidade de madeira não deve ser negligenciada em sistemas de manejo conduzidos em florestas secundárias, pois ser comercializada como lenha ou para a produção de carvão. A madeira de *M. cinnamomifolia* e *H. alchorneoides* fornece alto poder calorífico, comparável às espécies de *Eucalyptus* (BRAND et al., 2013).

Modelos genéricos para estimar o volume total da árvore usando apenas DAP como variável preditora apresentaram um desempenho aceitável, com valores de MAPE inferiores a 20% (por exemplo, modelos nº 7 e nº 10). No caso de modelos genéricos que estimam o volume do fuste utilizando apenas DAP como preditora, os valores de MAPE foram superiores a 25%.

De fato, modelos de volume do fuste para espécies tropicais que não incluem o H podem produzir um erro quadrático médio duas vezes maior que os modelos incluindo DAP e H (BRANDEIS; KUEGLER; KNOWE, 2005). Por conseguinte, (BANIN et al., 2012)Feldpausch et al., (2011) relataram que os modelos de biomassa pantropical incluindo H superaram os modelos sem incluí-lo. Diante desses resultados, modelos usando apenas DAP para prever o volume total da árvore são úteis porque a medição precisa da altura em florestas densas (sub) tropicais é inviável na maioria das situações ou muito cara. Além disso, a medida

de H pode representar uma nova fonte de incerteza nas previsões de volume ou biomassa e a necessidade de aplicar técnicas de propagação de erro (SEGURA; KANNINEN, 2005; TEMESGEN et al., 2015).

Em relação aos aspectos metodológicos, esse estudo expôs um tópico geralmente negligenciado, porém destacado por Sileshi, (2014): modelos com termos colineares ou não explicativos podem produzir parâmetros com alto erro padrão (PRSE), apesar do desempenho satisfatório transmitido por métricas como RMSE e Viés (por exemplo, os modelos nº5 e nº6 na Tabela 1). Portanto, sugere-se o uso de PRSE e conseqüentemente, modelos com parâmetros elevados (não significativos) devem ser descartados. O PRSE deve ser avaliado considerando as observações de Picard et al., (2015) e Moser e Oliveira (2017), principalmente ao adotarem o limiar de exclusão de parâmetros sugerido por Sileshi (2014). O uso de pelo menos uma das estatísticas mencionadas é obrigatório, de acordo com as diretrizes fornecidas por Jara et al., 2015).

**Tabela 1.** Modelos genéricos de volume do fuste e total para espécies da Floresta Ombrófila Densa em Santa Catarina.  $a$  = intercepto;  $b, c, d, e$  = parâmetros médios da regressão e seu PRSE médio (%) com 1000 repetições. Viés (%) = viés do modelo;  $R^{2*}$  = pseudo  $R^2$  ajustado; RMSE ( $m^3$ ) = raiz do erro quadrático médio; MAPE (%) = erro percentual absoluto médio; BCF = fator de correção de Baskerville. Valores entre parênteses ao lado do RMSE e MAPE referem-se ao coeficiente de variação (%) com 1000 repetições.

Modelo	$A$	$B$	$c$	$D$	$e$	Viés (%)	$R^{2*}$	RMSE ( $m^3$ )	MAPE (%)	BCF
<hr/>										
(1) $\hat{V} = a + b.D^2 + \varepsilon$										
Fuste	-0.0397 (30%)	0.0007 (2%)	-	-	-	-4.3	0.86	0.14 (11.0)	44.4 (15.6)	-
Total	-0.0977 (13%)	0.0011 (1%)	-	-	-	-38.6	0.94	0.16 (17.1)	60.2 (18.9)	-
<hr/>										
(2) $\hat{V} = a + b.D + c.D^2 + \varepsilon$										
Fuste	0.0372 (321%)	-0.0076 (212%)	0.0008 (8%)	-	-	20.9	0.86	0.14 (11.0)	38.5 (15.5)	-
Total	0.0631 (188%)	-0.0165 (24%)	0.0014 (5%)	-	-	6.5	0.94	0.16 (14.7)	24.2 (24.8)	-
<hr/>										
(3) $\hat{V} = a + b.D^2H + \varepsilon$										
Fuste	0.0195 (28%)	0.0001 (1%)	-	-	-	18.2	0.95	0.09 (16.5)	27.6 (16.0)	-
Total	0.0079 (453%)	0.00005 (1%)	-	-	-	16.3	0.94	0.15 (14.2)	26.1 (31.6)	-
<hr/>										
(4) $\hat{V} = a + b.D^2 + c.D^2H + \varepsilon$										
Fuste	-0.0082 (341%)	0.0002 (8%)	0.00004 (3%)	-	-	-1.2	0.97	0.07 (16.2)	14.7 (19.6)	-
Total	-0.0430 (34%)	0.0005 (17%)	0.00003 (13%)	-	-	-11.7	0.95	0.14 (15.9)	29.7 (22.7)	-
<hr/>										
(5) $\hat{V} = a + b.D + c.D^2 + d.DH + e.D^2H + \varepsilon$										

Fuste	-0.0048 (566%)	0.0011 (295%)	0.0002 (197%)	-0.0002 (229%)	0.00005 (10%)	4.7	0.96	0.07 (17.3)	16.2 (21.5)
Total	0.0780 (449%)	-0.0227 (150%)	0.0011 (150%)	0.0007 (2091%)	0.00001 (651%)	1.7	0.95	0.15 (17.1)	23.4 (21.2)

---


$$(6) \hat{V} = a + b.D^2 + c.D^2H + d.DH^2 + e.H^2 + \varepsilon$$

Fuste	-0.0004 (1388%)	0.0001 (111%)	0.00007 (5%)	-0.0001 (21%)	0.0006 (267%)	7.1	0.97	0.07 (20.2)	15.6 (14.6)
Total	-0.0360 (320%)	0.0004 (48%)	0.00003 (81%)	-0.00001 (337%)	0.00002 (1132%)	-8.9	0.95	0.15 (16.1)	27.9 (23.7)

---


$$(7) \ln(\hat{V}) = \ln(a) + b.\ln(D) + \varepsilon$$

Fuste	-8.7834 (1%)	2.3933 (2%)	-	-	-	9.3	0.86	0.14 (11.5)	31.7 (11.4)	1.05
Total	-9.2965 (1%)	2.6875 (1%)	-	-	-	3.5	0.94	0.18 (19.2)	19.2 (8.1)	1.03

---


$$(8) \ln(\hat{V}) = \ln(a) + b.\ln(D^2H) + \varepsilon$$

Fuste	-9.1752 (1%)	0.9368 (1%)	-	-	-	1.9	0.96	0.08 (15.6)	13.7 (7.0)	1.02
Total	-10.4420 (1%)	1.0499 (1%)	-	-	-	2.8	0.94	0.16 (15.2)	15.6 (8.1)	1.02

---


$$(9) \ln(\hat{V}) = \ln(a) + b.\ln(D) + c.\ln(H) + \varepsilon$$

Fuste	-9.2520 (0%)	2.0600 (1%)	0.7073 (2%)	-	-	1.0	0.97	0.07 (16.3)	9.5 (7.4)	1.01
Total	-10.1183 (1%)	2.2709 (2%)	0.7470 (8%)	-	-	2.5	0.94	0.16 (17.2)	15.2 (8.0)	1.02

---


$$(10) \ln(\hat{V}) = \ln(a) + b.\ln(D) + c.(1/D) + \varepsilon$$

Fuste	-7.2772 (8%)	2.0072 (7%)	-6.1157 (39%)	-	-	9.4	0.86	0.14 (10.2)	31.6 (11.8)	1.05
Total	-7.7591 (5%)	2.2916 (4%)	-6.1899 (23%)	-	-	3.2	0.94	0.15 (14.2)	18.3 (8.1)	1.03

---

Fonte: a autora.

### 5.3.2 Modelos específicos

Conforme observado nas tabelas 2 e 3, para ambas as espécies, os modelos de volume de fuste usando DAP e H superaram os modelos usando apenas DAP. Os últimos modelos apresentaram RMSEs variando de 0,16 a 0,18 m<sup>3</sup> e MAPE > 20%. Para *M. cinnamomifolia*, três modelos específicos de volume de fuste (n° 9, n° 4 e n° 6) apresentaram melhor desempenho do que o modelo genérico de volume de fuste (modelo n°9) no procedimento *leave one-out*. No entanto, o modelo n° 6 deve ser descartado pela colinearidade entre as variáveis, assim como o modelo n° 4 que apesar de produzir bom ajuste possui PRSE elevado no intercepto. Desta forma, o modelo n° 9, ajustado para *M. cinnamomifolia* apresentou o melhor desempenho considerando todas as métricas (Tabela 2).

Para *H. alchorneoides*, nenhum dos modelos de volume de fuste específico superou o modelo genérico de volume de fuste. Apenas o modelo n°9 apresentou desempenho semelhante ao modelo genérico. O modelo genérico mostrou um desempenho ligeiramente melhor que o melhor modelo específico (n° 9); esse último gerou viés = 1,1%, MAPE = 9,3%, RMSE = 0,05 m<sup>3</sup>.

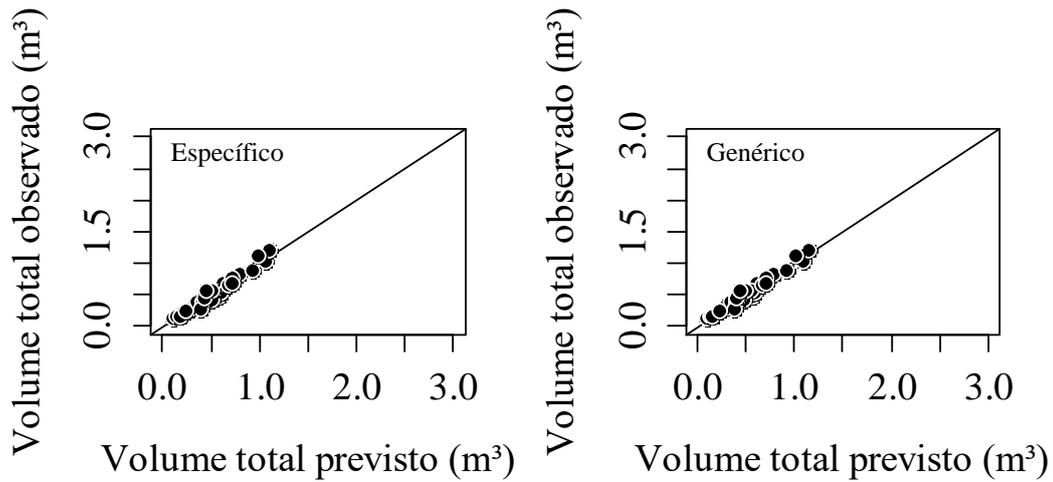
O modelo n° 8 de volume total específico para *M. cinnamomifolia* superou ligeiramente o melhor modelo genérico nas métricas RMSE (0,09 m<sup>3</sup>) e MAPE (10%). Para *H. alchorneoides* os modelos específicos de volume total apresentaram desempenho ligeiramente maior apenas no Viés (2,3%) nos modelos n° 7, n° 8, n° 9, n° 10. Para ambas as espécies o modelo n° 7, que inclui apenas DAP como variável preditora (Tabelas 2 e 3) apresentou bons resultados.

A heteroscedasticidade nos resíduos foi observável, especialmente para *H. alchorneoides*. O padrão de megafone é esperado em dados biológicos, pois a magnitude dos resíduos aumenta com o aumento da magnitude das variáveis preditoras (PICARD; SAINT-ANDRÉ; HENRY, 2012). No entanto, a heterocedasticidade é um problema apenas quando a estimativa de intervalos de confiança para previsões é necessária (NETER et al., 1996).

A comparação entre modelos genéricos e específicos de espécies revelou descobertas importantes. Para espécies com arquitetura característica e regular como *M. cinnamomifolia*, modelos específicos podem ser úteis para obter melhores previsões. Modelos específicos foram mais precisos para *M. cinnamomifolia* do que para *H. alchorneoides*, possivelmente porque a primeira espécie tem uma arquitetura mais regular. No entanto, o melhor desempenho de modelos específicos de espécies pode não justificar esforços extras exigidos

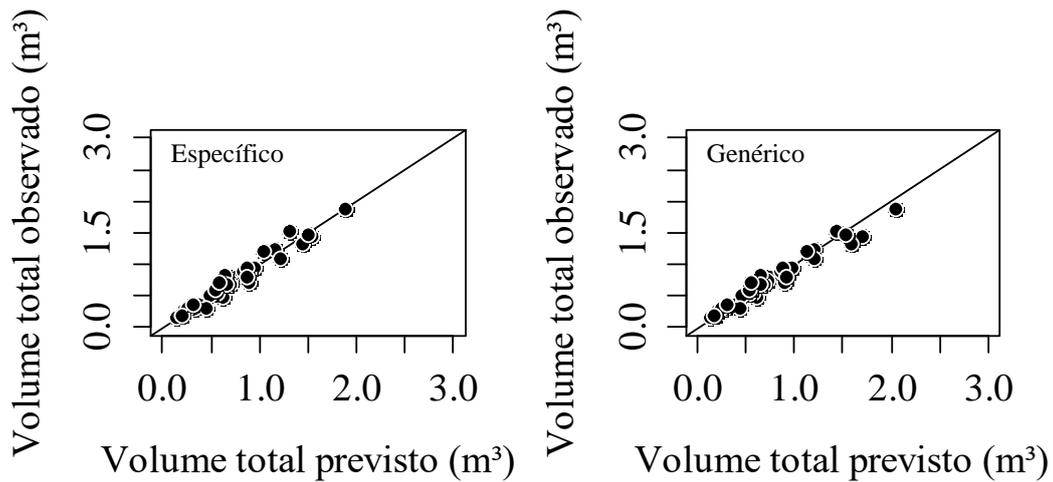
na coleta de dados de amostras confiáveis ( $n \geq 30$ ), mesmo para espécies com grande potencial de manejo, para o qual uma previsão de volume extra precisa seria útil. O gráfico 1:1 demonstra a sutileza na predição de dados com modelo específico comparado ao modelo genérico (Figura 4 e Figura 5).

Figura 4. Gráfico 1:1 dos valores previstos e observados para volume do fuste com melhor modelo específico comparado ao melhor modelo genérico para *M. cinammomifolia*.



Fonte: a autora.

Figura 5. Gráfico 1:1 dos valores previstos e observados para volume total com melhor modelo específico comparado ao melhor modelo genérico para *H. alchorneoides*.



Fonte: a autora

**Tabela 2.** Modelos específicos de volume do fuste e total para *M. cinnamomifolia*.  $a$  = intercepto;  $b, c, d, e$  = parâmetros médios da regressão e seu PRSE médio (%) com o procedimento *leave-one-out*. Viés (%) = viés do modelo;  $R^{2*}$  = pseudo  $R^2$  ajustado; RMSE ( $m^3$ ) = raiz do erro quadrático médio; MAPE (%) = erro percentual absoluto médio; BCF = fator de correção de Baskerville. Valores entre parênteses ao lado do RMSE e MAPE referem-se ao coeficiente de variação (%) com 1000 repetições.

Modelo	$A$	$B$	$C$	$D$	$E$	Viés (%)	$R^{2*}$	RMSE ( $m^3$ )	MAPE (%)	BCF
<hr/>										
(1) $\hat{V} = a + b.D^2 + \varepsilon$										
Fuste	-0.0787 (80%)	0.0006 (13%)	-	-	-	9.6	0.56	0.17	26.0	-
Total	-0.0824 (51%)	0.0011 (5%)	-	-	-	1.8	0.92	0.12	13.0	-
<hr/>										
(2) $\hat{V} = a + b.D + c.D^2 + \varepsilon$										
Fuste	-0.2830 (143%)	0.0277 (148%)	0.0001 (1304%)	-	-	6.9	0.51	0.18	24.1	-
Total	-0.0348 (1033%)	-0.0036 (1568%)	0.0011 (30%)	-	-	2.1	0.91	0.12	13.1	-
<hr/>										
(3) $\hat{V} = a + b.D^2H + \varepsilon$										
Fuste	0.0454 (47%)	0.0001 (4%)	-	-	-	2.0	0.94	0.06	10.0	-
Total	0.0261 (112%)	0.00005 (3%)	-	-	-	2.3	0.96	0.09	10.4	-
<hr/>										
(4) $\hat{V} = a + b.D^2 + c.D^2H + \varepsilon$										
Fuste	0.0144 (149%)	0.0001 (29%)	0.00005 (6%)	-	-	0.9	0.95	0.06	9.0	-
Total	0.0167 (313%)	0.0001 (542%)	0.00004 (21%)	-	-	2.3	0.95	0.09	10.4	-
<hr/>										
(5) $\hat{V} = a + b.D + c.D^2 + d.DH + e.D^2H + \varepsilon$										
Fuste	0.0202 (9641%)	0.0056 (197%)	-0.00005 (639%)	-0.0005 (110%)	0.0001 (24%)	1.7	0.94	0.06	9.8	-

Total	-0.0631 (486%)	0.0037 (1961%)	0.00003 (4242%)	0.0001 (1793%)	0.00004 (119%)	1.7	0.95	0.09	10.7	
<hr/>										
(6) $\hat{V} = a + b.D^2 + c.D^2H + d.DH^2 + e.H^2 + \varepsilon$										
Fuste	0.0338 (136%)	0.0001 (171%)	0.0001 (25%)	-0.00002 (185%)	0.0001 (461%)	1.5	0.94	0.06	9.5	-
Total	-0.0167 (1631%)	0.0002 (226%)	0.00004 (93%)	-0.00001 (980%)	0.00002 (4418%)	2.0	0.95	0.09	10.7	
<hr/>										
(7) $\ln(\hat{V}) = \ln(a) + b.\ln(D) + \varepsilon$										
Fuste	-6.5877 (8%)	1.7724 (9%)	-	-	-	4.0	0.59	0.17	23.0	1.07
Total	-7.9117 (4%)	2.2862 (4%)	-	-	-	1.4	0.92	0.12	12.5	1.02
<hr/>										
(8) $\ln(\hat{V}) = \ln(a) + b.\ln(D^2H) + \varepsilon$										
Fuste	-8.7247 (4%)	0.8901 (4%)	-	-	-	1.0	0.94	0.06	9.8	1.02
Total	-9.7156 (3%)	0.9750 (3%)	-	-	-	0.9	0.96	0.09	10.0	1.02
<hr/>										
(9) $\ln(\hat{V}) = \ln(a) + b.\ln(D) + c.\ln(H) + \varepsilon$										
Fuste	-8.6601 (3%)	1.8935 (4%)	0.7076 (8%)	-	-	0.7	0.95	0.06	9.0	1.01
Total	-9.7197 (5%)	1.9491 (6%)	0.9774 (25%)			1.0	0.95	0.09	10.2	1.02
<hr/>										
(10) $\ln(\hat{V}) = \ln(a) + b.\ln(D) + c.(1/D) + \varepsilon$										
Fuste	-7.2772 (8%)	2.0072 (7%)	-6.1157 (39%)	-	-	4.1	0.53	0.17	22.9	1.07
Total	-7.3747 (37%)	2.1587 (30%)	-3.0458 (7843%)			1.5	0.92	0.12	13.0	1.02

Fonte: a autora.

**Tabela 3.** Modelos específicos de volume do fuste e total para *Hyeronima alchorneoides*.  $a$  = intercepto;  $b, c, d, e$  = parâmetros médios da regressão e seu PRSE médio (%) com o procedimento *leave-one-out*. Viés (%) = viés do modelo;  $R^{2*}$  = pseudo  $R^2$  ajustado; RMSE ( $m^3$ ) = raiz do erro quadrático médio ( $m^3$ ); MAPE (%) = erro percentual absoluto médio; BCF = fator de correção de Baskerville. Valores entre parênteses ao lado do RMSE e MAPE referem-se ao coeficiente de variação (%) com 1000 repetições.

Modelo	$A$	$B$	$C$	$D$	$E$	Viés (%)	$R^{2*}$	RMSE ( $m^3$ )	MAPE (%)	BCF
<hr/>										
(1) $\hat{V} = a + b.D^2 + \varepsilon$										
Fuste	-0.0151 (244%)	0.0006 (7%)	-	-	-	13.8	0.70	0.16	26.0	-
Total	-0.1494 (23%)	0.0012 (3%)	-	-	-	-17.8	0.91	0.16	33.7	-
<hr/>										
(2) $\hat{V} = a + b.D + c.D^2 + \varepsilon$										
Fuste	0.0291 (629%)	-0.0038 (314%)	0.0007 (31%)	-	-	18.4	0.69	0.16	24.1	-
Total	0.0747 (183%)	-0.0191 (52%)	0.0016 (12%)	-	-	4.1	0.91	0.17	15.8	-
<hr/>										
(3) $\hat{V} = a + b.D^2H + \varepsilon$										
Fuste	0.0596 (23%)	0.0001 (3%)	-	-	-	16.5	0.92	0.08	10.0	-
Total	0.0240 (152%)	0.0001 (4%)	-	-	-	12.5	0.89	0.18	22.2	-
<hr/>										
(4) $\hat{V} = a + b.D^2 + c.D^2H + \varepsilon$										
Fuste	0.0011 (7745%)	0.0002 (13%)	0.00004 (5%)	-	-	4.0	0.95	0.07	9.0	-
Total	-0.1210 (36%)	0.0010 (22%)	0.00001 (95%)	-	-	-13.5	0.91	0.16	29.1	-
<hr/>										
(5) $\hat{V} = a + b.D + c.D^2 + d.DH + e.D^2H + \varepsilon$										
Fuste	0.0024 (1783%)	0.0048 (111%)	0.00003 (483%)	-0.0006 (62%)	0.0001 (18%)	7.2	0.95	0.07	9.8	-

Total	0.3932 (58%)	-0.0811 (48%)	0.0031 (33%)	0.0021 (59%)	-0.0001 (64%)	12.5	0.90	0.17	27.8	
<hr/>										
(6) $\hat{V} = a + b.D^2 + c.D^2H + d.DH^2 + e.H^2 + \varepsilon$										
Fuste	0.0253 (65%)	0.00003 (82%)	0.0001 (6%)	-0.00005 (23%)	0.0004 (77%)	7.9	0.97	0.05	9.5	-
Total	-0.1449 (67%)	0.0006 (55%)	0.00001 (64%)	-0.0001 (88%)	0.0010 (107%)	-12.3	0.88	0.19	31.8	
<hr/>										
(7) $\ln(\hat{V}) = \ln(a) + b.\ln(D) + \varepsilon$										
Fuste	-7.8393 (4%)	2.0873 (5%)	-	-	-	10.1	0.70	0.16	23.0	1.07
Total	-9.1622 (2%)	2.6699 (2%)	-	-	-	2.5	0.92	0.16	15.9	1.04
<hr/>										
(8) $\ln(\hat{V}) = \ln(a) + b.\ln(D^2H) + \varepsilon$										
Fuste	-8.9811 (2%)	0.9202 (2%)	-	-	-	1.9	0.93	0.08	9.8	1.02
Total	-10.2243 (2%)	1.0335 (2%)	-	-	-	2.3	0.90	0.18	15.2	1.04
<hr/>										
(9) $\ln(\hat{V}) = \ln(a) + b.\ln(D) + c.\ln(H) + \varepsilon$										
Fuste	-9.1017 (1%)	2.0147 (2%)	0.7134 (4%)	-	-	1.1	0.97	0.05	9.0	1.01
Total	-9.8163 (3%)	2.3216 (5%)	0.6112 (30%)			2.3	0.91	0.17	14.7	1.03
<hr/>										
(10) $\ln(\hat{V}) = \ln(a) + b.\ln(D) + c.(1/D) + \varepsilon$										
Fuste	-6.4554 (22%)	1.7399 (21%)	-6.1553 (102%)	-	-	9.9	0.69	0.17	22.9	1.07
Total	-8.6638 (9%)	2.5449 (8%)	-2.2205 (153%)			2.3	0.91	0.16	16.1	1.04
<hr/>										
Fonte:										a
										autora.

## 5.4 CONCLUSÃO

As conclusões deste estudo podem ser organizadas da seguinte forma: (i) a qualidade geral dos modelos foi satisfatória e, portanto, esses modelos podem ser considerados ferramentas de estimativa de volume adaptadas e úteis no manejo florestal na FOD do Sul do Brasil; (ii) modelos específicos demonstraram-se ligeiramente melhores que modelos genéricos. Assim, fica claro que o esforço adicional não superou os modelos genéricos; (iii) Modelos com DAP sendo a única variável preditora são uma solução aceitável devido às questões em relação à medição operacional de H em florestas densas subtropicais. Eventualmente, tais modelos podem até superar os mais complexos no caso de espécies com arquitetura mais regular (por exemplo, *M. cinnamomifolia*); (iv) a quantificação da incerteza na estimação de parâmetros de regressão revela informações críticas para seleção e validação de modelos.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSON-SPRECHER, R. Model comparisons and  $R^2$ . **The American Statistician**, v. 48, n. 2, p.113–117, 1994.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- BANIN, L. et al. What controls tropical forest architecture? Testing environmental, structural and floristic drivers. **Global Ecology and Biogeography**, v. 21, n. 12, p. 1179–1190, 2012.
- BORSOI, G. A. **Subsídios para o manejo de uma floresta ombrófila mista em estágio avançado de regeneração natural**. Universidade Federal de Santa Maria, 2004.
- BRANCALION, P. H. S. et al. Cultural Ecosystem Services and Popular Perceptions of the Benefits of an Ecological Restoration Project in the Brazilian Atlantic Forest. **Restoration Ecology**, v. 22, n. 1, p. 65–71, 2014.
- BRAND, M. A. et al. Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal produzido a partir da espécie *Miconia cinnamomifolia* (De Candolle) Naudin (Jacatirão-açu) na agricultura familiar, em Biguaçu, Santa Catarina. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 99, p. 401–410, 2013.
- BRANDEIS, T. J.; KUEGLER, O.; KNOWE, S. A. Equations for merchantable volume for subtropical moist and wet forests of Puerto Rico. **Southern Research Station**, p. 15, 2005.
- CHICHORRO, J. F.; RESENDE, J. L. P.; LEITE, H. G. Equações de volume e de taper para quantificar multiprodutos da madeira em Floresta Atlântica. **Revista Árvore**, v. 27, n. 6, p. 799–809, 2003.
- CONCEIÇÃO, M. B. DA. **Comparação de métodos de estimativa de volume em diferentes idades em plantações de *Eucalyptus grandis* Hill ex - Maiden**. Universidade Federal do Paraná, 2004.
- CORREIA, J.; FANTINI, A.; PIAZZA, G. Equações Volumétricas e Fator de Forma e de Casca para Florestas Secundárias do Litoral de Santa Catarina. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.
- COSTANZA, R. et al. Changes in the global value of ecosystem services. **Global Environmental Change**, v. 26, n. 1, p. 152–158, 2014.
- DURLO, M. A.; DENARDI, L. Morfometria de *Cabralea canjerana*, em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, v. 8, n. 1 p. 30-55, 1998.
- FANTINI, A. C.; SIMINSKI, A.; GAIO, M. F. Madeira de florestas secundárias em SC : Nova fonte de renda para os agricultores. **Agropecuária Catarinense**, v. 29, n. 2, p. 15–18, 2016.
- FELDPAUSCH, T. R. et al. Height-diameter allometry of tropical forest trees. **Biogeosciences**, v. 8, n. 5, p. 1081–1106, 2011.

IBGE. Mapa da Área de Aplicação da Lei no 11.428 de 2006. 2008.

JARA, M. C. et al. Guidelines for documenting and reporting tree allometric equations. **Annals of Forest Science**, v. 72, n. 6, p. 763–768, 2015.

JORGE, L. A. B. Equações de volume comercial com casca em floresta tropical pluvial no norte do Espírito Santo. **Anais do Congresso Brasileiro sobre Essências Nativas**. São Paulo, v.16, n.1, p. 456-467, 1982.

KLEIN, R. M. Mapa fitogeográfico do Estado de Santa Catarina. In: REITZ, R. (Ed.). **Flora Ilustrada Catarinense**. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues, p. 1–24, 1978.

MACHADO, S. DO A. et al. Modelagem volumétrica para bracatinga (*Mimosa scabrella*) em povoamentos da Região Metropolitana de Curitiba. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 56, p. 17–29, 2008.

MOSER, P., OLIVEIRA, L. Z. 2017. **Regressão linear aplicada à dendrometria: uma introdução e iniciação ao R**, Blumenau. 152p, 2017.

NETER, J. et al. **Applied linear statistical models**. Boston: McGraw-Hill Inc, 1996.

NUNES, M. H. **Stem profile modeling in Cerrado and tropical forests formations in Brazil**. Universidade de São Paulo, 2013.

OLIVEIRA-FILHO, A. T. Um Sistema de Classificação Fisionômico-Ecológico da Vegetação Neotropical: segunda aproximação Introdução. **Fitossociologia No Brasil - Volume 2**, p. 452–474, 2015.

OLLER, D. C. **Ecologia e Manejo de Floresta Secundárias Dominadas por *Tibouchina pulchra* Cogn**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

PICARD, N. et al. Should tree biomass allometry be restricted to power models? **Forest Ecology and Management**, v. 353, p. 156–163, 2015.

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

PRÖBSTL-HAIDER, U. Cultural ecosystem services and their effects on human health and well-being – A cross-disciplinary methodological review. **Journal of Outdoor Recreation and Tourism**, v. 10, p. 1–13, 2015.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2013. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

RIBEIRO, M. C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, 2009.

ROLIM, S. G. **Silvicultura e Tecnologia de Espécies da Mata Atlântica**. Belo Horizonte: Editora Rona, 2018.

SANTOS, A. T. DOS et al. Equação de volume e relação hipsométrica para plantio de *Ocotea porosa*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 69, p. 13–21, 2012.

SANTOS, K. DOS et al. Equações Volumétricas por Classe Diamétrica para Algumas Espécies Folhosas da Floresta Ombrófila Mista no Paraná, Brasil. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 8, n. 1, p. 99–112, 2006.

SCHORN, L. A.; GALVÃO, F. Dinâmica da Regeneração Natural em Três Estágios Sucessionais de uma Floresta Ombrófila Densa em Blumenau, SC. **Floresta**, v. 36, n. 1, p. 59–74, 2006.

SCHUCH, C.; SIMINSKI, A.; FANTINI, A. C. Uso e potencial madeireiro do jacatirão-açu (*Miconia cinnamomifolia*(de Candolle)Naudin) no litoral de Santa Catarina. **Floresta**, v. 38, n. 4, p. 735–741, 2008.

SCOLFORO, J. R. et al. Equações de volume, peso de matéria seca e carbono para diferentes fisionomias da flora nativa. p. 1–65, 2008.

SCOLFORO, J. R.; MELLO, J. M. DE; LIMA, C. S. DE A. Obtenção de relações quantitativas para estimativa de volume do fuste em floresta estacional semidecídua montana. **Cerne**, v. 1, p. 123–134, 1994.

SEGURA, M.; KANNINEN, M. Allometric Models for Tree Volume and Total Aboveground Biomass in a Tropical Humid Forest in Costa Rica. **Biotropica**, v. 37, n. 1, p. 2–8, 2005.

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

SILVA, D. A., KLITZKE, A. R., ULLER, H. F. Alterações na estrutura fitossociológica do estrato arbóreo causadas pelo corte seletivo em uma área de manejo florestal em Santa Catarina. In: SCHNEIDER et al., **6º simpósio latino-americano sobre manejo florestal**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria. p. 77–83, 2015.

SILVEIRA, P. **Métodos indiretos de estimativa do conteúdo de biomassa e do estoque de carbono em um fragmento de floresta ombrófila densa**. Universidade Federal do Paraná, 2008.

SOUZA, A.; JESUS, R. Equações de volume comercial e fator de forma para espécies da Mata Atlântica ocorrentes na reserva florestal da Companhia Vale do Rio Doce, Linhares, ES. **Revista árvore**, v. 15, n. 3, p. 257-273, 1991.

STEINBACH, A. J., TOMASELLI, C. C., REFOSCO, J. C. **Atlas da bacia hidrográfica do rio Itapocu**. AMVALI. Jaraguá do Sul. p. 147. 2015.

TEIXEIRA, P. H.; FONSECA, L. G. Algoritmo para a reconstrução de árvores individuais a partir de dados de varredura tridimensional a laser. **XI Simpósio de Mecânica Computacional**, p. 28–30, 2014.

TEMESGEN, H. et al. A review of the challenges and opportunities in estimating above ground forest biomass using tree-level models. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 30, n. 4, p. 1–10, 2015.

VIBRANS, A. C. et al. **Floresta Ombrófila Densa**. Blumenau: Edifurb, 2013a.

VIBRANS, A. C. et al. Using satellite image-based maps and ground inventory data to estimate the area of the remaining Atlantic forest in the Brazilian state of Santa Catarina. **Remote Sensing of Environment**, v. 130, p. 87–95, 2013b.

VIBRANS, A. C. et al. Generic and specific stem volume models for three subtropical forest types in southern Brazil. **Annals of Forest Science**, v. 72, n. 6, p. 865-874, 2015.

WAGENMAKERS, E.-J.; FARRELL, S. AIC model selection using Akaike weights. **Psychonomic Bulletin & Review**, v. 11, n. 1, p. 192–196, 2004.

WAGENMAKERS, E.-J.; FARRELL, S. AIC model selection using Akaike weights. **Psychonomic Bulletin & Review**, v. 11, n. 1, p. 192–196, 2004.

ZIANIS, D. et al. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. **Silva Fennica Monographs**. v. 4, p.1-63, 2005.

## 6 ARTIGO 2 – MODELOS DE AFILAMENTO E SORTIMENTO PARA FLORESTAS SECUNDÁRIAS NA MATA ATLÂNTICA DO SUL DO BRASIL

### 6.1 INTRODUÇÃO

As florestas são uma fonte indispensável de recursos ecológicos, sociais e econômicos, especialmente nos trópicos que abrigam as florestas mais biodiversas do planeta (COSTANZA et al., 2014; PRÖBSTL-HAIDER, 2015). No entanto, essa também é uma das regiões com maior pressão antrópica sobre os recursos naturais. Sob o ponto de vista da vegetação brasileira, a Mata Atlântica é o domínio mais impactado, resultado da fragmentação e degradação florestal ocasionadas pelas diversas atividades humanas (RIBEIRO et al., 2009b).

O estado de Santa Catarina possui ainda 29% do seu território coberto por florestas nativas e atualmente a FOD cobre 40,5% da sua extensão original, sendo a maior proporção entre as três tipologias (FOD, FOM, FED) da Mata Atlântica (VIBRANS et al., 2013b). Contudo, cerca de 95% desses remanescentes são compostos por florestas em regeneração, onde as espécies pioneiras e secundárias dominam o processo sucessional (SCHORN; GALVÃO, 2006; SIMINSKI; FANTINI, 2004). Portanto, espécies de crescimento relativamente rápido, como a licurana (*H. alchorneoides*), o jacatirão-açú (*M. cinnamomifolia*) e as canelas (*Nectandra* spp.), produtoras de madeiras de qualidade, são abundantes nessas formações.

A utilização das florestas nativas depende da correta determinação do seu potencial produtivo, sendo que o conhecimento do volume de madeira representa uma das informações essenciais no desenvolvimento do manejo sustentável (JARA et al., 2015). O ajuste de modelos de afilamento para espécies nativas da FOD pode não parecer uma realidade aplicável a curto prazo. No entanto, a possibilidade de otimizar o uso da floresta nativa que é uma preocupação importante diante dos estoques relativamente baixos de madeira e do crescimento mais lento, comparado com o das espécies dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, representa o real sentido do uso consciente (ANDRAE; SCHNEIDER; DURLO, 2018).

Ademais, a produção de madeiras de espécies com crescimento relativamente rápido e com potencial de comercialização é reconhecida (FANTINI; SIMINSKI; GAIO, 2016) Desta forma, o gerenciamento de florestas nativas, incluindo o interesse em manejar espécies arbóreas nativas até mesmo em sistemas agrossilviculturais precisa ser discutido. Ao mesmo tempo cresce a necessidade de estudos para obter informações para que se possa realizar o

próximo passo para conciliar os objetivos de conservação e de uso direto dos recursos florestais: tornar essa ideia atraente para os produtores rurais (ROLIM, 2018).

O afilamento pode ser definido como a diminuição do diâmetro no sentido base topo da árvore, sendo assim, a importância do seu estudo e modelagem é reconhecida há mais de 100 anos (FANG; BAILEY, 1999). Inicialmente, Hojer (1903) usou funções matemáticas para descrever a forma do fuste de *Picea abies* L. e Jonson (1910) adicionou uma constante biológica a esse modelo; em seguida Behre (1924,1927) desenvolveu uma expressão hiperbólica simples (NICOLETTI et al., 2016). De acordo com Andrade (2014) se intensificou-se o estudo desse assunto na área florestal a partir da década de 1960 e modelos desenvolvidos naquela época são utilizados ainda hoje. Dentre esses estudos pode-se destacar o de Schöpfer (1966) - também conhecido como polinômio do 5º, de Kozak et al. (1969), Demaerschalk (1972), Ormerod (1973), Goulding e Murray (1976), Hradetzky (1976) e Max e Burkhart (1976).

Desse modo, os modelos de afilamento podem representar uma importante ferramenta que possibilita a otimização dos recursos florestais, observando o conceito de múltiplos produtos da floresta. Além disso, através desse processo de modelagem é possível representar a forma do fuste, que também tem influência na qualidade e quantidade dos produtos madeireiros (FIGUEIREDO FILHO et al., 2014; KOHLER; KOEHLER; FIGUEIREDO FILHO, 2013).

Sob essa premissa, o artigo tem objetivo de (i) testar modelos genéricos e específicos para afilamento do fuste utilizando um procedimento estatístico robusto; (ii) comparar o desempenho de modelos genéricos, modelos para espécies com potencial madeireiro e modelos específicos de espécies abundantes e economicamente relevantes como o jacatirão-açú – *M. cinnamomifolia* e a licurana – *H. alchorneoides*.

## 6.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 6.2.1 Área de estudo

A área de estudo foi denominada de Projeto Madeira Nativa e compreende aproximadamente 42 ha localizados em Guaramirim, Santa Catarina (lat. 26°32'01" S; long. 49°02'30" W). A vegetação do local pertence à Floresta Ombrófila Densa (IBGE, 2008), também classificada como Floresta Subtropical Pluvial (KLEIN, 1978; OLIVEIRA-FILHO, 2015). O local de estudo possui uma floresta secundária com aproximadamente 35 anos, sem

intervenções nos últimos 30 anos, resultante da sucessão após o abandono da pastagem e o enriquecimento (parcial) com espécies florestais da região, como *M. cinnamomifolia*, *H. alchorneoides* e *Nectandra* spp.). Este plantio foi realizado no fim da década de 1970. Segundo Silva, Klitzke e Uller (2015), essa floresta tem uma densidade de 1.807,6 árvores.ha<sup>1</sup> (DAP  $\geq$  5 cm) e uma área basal de 32,3 m<sup>2</sup>.ha<sup>1</sup>; as espécies *H. alchorneoides* e *M. cinnamomifolia* são dominantes, contribuindo com 23,2% e 6,5% da área basal, respectivamente. De acordo com a classificação de Köppen, o local de estudo é influenciado pelo clima Cfa – subtropical mesotérmico, com um verão quente e sem estação seca (ALVARES et al., 2013). De acordo com Steinbach et al., (2015) a precipitação é uniformemente distribuída durante todo o ano, variando entre 1500 e 1700 mm e a temperatura média anual entre 20 e 21 °C. O mapa de localização do Projeto Madeira Nativa está disponível no Anexo I.

#### 6.2.2 Coleta de dados

O banco de dados utilizado para o estudo dos modelos de afilamento foi gerado a partir de três amostras diferentes. As informações das árvores da primeira amostra (182 indivíduos) foram obtidas do estudo de Correia, 2015; a segunda amostra foi composta por 103 indivíduos utilizados para amostragem de biomassa arbórea e a terceira amostra consiste no corte raso de 131 indivíduos de uma nova parcela instalada na área de estudo, denominada de parcela 27 (40 x 40 m).

Desta forma, registrou-se o diâmetro e altura de 417 árvores, pertencentes a 35 famílias e 83 espécies. O diâmetro do fuste foi medido nas alturas de 0,1; 0,3; 0,7; 1,0; 1,3; 2,0; 3,0 m e consecutivamente a cada metro até a extremidade superior, que foi definida por uma bifurcação significativa do fuste principal. Os diâmetros foram medidos usando fita diamétrica ou suta. Ao usar a suta, foram registradas duas medidas perpendiculares em cada seção. Somado a isto, registrou-se a altura total e do fuste usando uma trena.

#### 6.2.3 Processamento dos dados

##### 6.2.3.1 Modelos genéricos

Foram ajustados sete modelos genéricos (Tabela 4) para prever os diâmetros, através do método dos mínimos quadrados ordinários. Cada modelo foi ajustado a um subconjunto de

70% (n=292) do total de dados. O subconjunto restante (n = 125) foi utilizado para avaliar o desempenho do modelo e posterior seleção e validação. Os subconjuntos foram selecionados aleatoriamente, considerando cada árvore como observação, visto que se deve considerar os diâmetros relativos pertencentes a uma série dentro de cada árvore.

Observações influentes (outliers) foram investigadas através da associação da distância de Cook - calculada para cada observação nos subconjuntos de ajuste - e o percentil de distribuição F com graus de liberdade  $p$  e  $n - p$ , onde  $p$  é o número de parâmetros de regressão, e  $n$  é o número de observações no subconjunto de ajustes. Observações que apresentaram  $F > 0,5$  foram consideradas influentes e, portanto, foram retiradas do conjunto de ajuste (NETER et al., 1996).

Após o ajuste dos modelos, a incerteza associada à estimação dos parâmetros de regressão foi avaliada através do erro padrão relativo percentual (PRSE) (Eq. 1) Este parâmetro atinge a significância estatística quando foram  $\leq 50\%$ , considerando uma amostra com pelo menos 30 graus de liberdade e  $\alpha = 0,05$  (SILESHI, 2014; MOSER e OLIVEIRA, 2017). A qualidade do ajuste foi avaliada através das seguintes métricas calculadas com valores na escala original de medição: o viés (Eq. 2); o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ); a raiz do erro quadrático médio (RMSE, Eq. 3) e o erro percentual absoluto médio (MAPE, Eq. 4) (SILESHI, 2014). O  $R^2$  pode ser denotado como pseudo- $R^2$  ( $R^{2*}$ ), quando calculado para modelos não-lineares, pois neste caso, seus pressupostos subjacentes não são completamente cumpridos (ANDERSON-SPRECHER, 1994). Os parâmetros da regressão foram calculados da seguinte maneira:

$$PRSE(\%) = \frac{1}{R} \sum_{R=1}^R \frac{SE(\hat{\theta}_k)}{|\hat{\theta}_k|} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$Viés(\%) = \frac{1}{R} \sum_{R=1}^R \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\hat{d}_i - d_i}{d_i} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$RMSE = \frac{1}{R} \sum_{R=1}^R \left( \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \hat{d}_i)^2}{n} \right)^{1/2} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$MAPE(\%) = \frac{1}{R} \sum_{R=1}^R \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|d_i - \hat{d}_i|}{d_i} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde,  $\hat{\theta}_k$  = parâmetro de regressão estimado; SE = erro padrão;  $d_i$  = diâmetro da  $i^a$  medida da árvore;  $\hat{d}_i$  = diâmetro previsto para a  $i^a$  medida da árvore;  $n$  = número de árvores utilizadas no procedimento de validação;  $R$  = número de iterações, nesse caso, 1.000;  $p$  = número de parâmetros de regressão; SSE = soma de erros quadrados da regressão.

A seleção dos melhores modelos é embasada nos menores valores RMSE, Viés e MAPE (Sileshi, 2014; Wagenmakers; Farrell, 2004). Da mesma forma, o PRSE dos melhores modelos foi avaliado.

As previsões geradas pelo melhor modelo selecionado foram plotadas contra os valores observados em um gráfico 1:1. Os valores observados (eixo y) foram plotados em relação aos valores previstos (eixo dos x) para avaliar a distribuição residual de padrões incomuns. Os procedimentos de ajuste foram realizados no software R (R CORE TEAM).

#### 6.2.3.2 Modelos para espécies com potencial madeireiro

Foram ajustados modelos específicos para espécies com potencial madeireiro. A classificação das espécies com potencial madeireiro considerou os estudos de Piazza; Zambí, (2017); Carvalho 2008, 2006 e 2003; Klein et al. (1978), Vibrans et al. (2013) e informações fornecidas pelo madeireiro proprietário da floresta estudada (BISEWKI, 2017). Foi levado em consideração para escolha das espécies aspectos como a forma do fuste, a possibilidade de atingir o dossel (exclusão de plantas de sub-bosque) e a capacidade de atingir um diâmetro mínimo comerciável. Desta forma, houve uma redução de 420 para 318 indivíduos de 48 espécies (DAP: 5,4-71,8 cm; Ht: 6,5-32,9 m; Hf: 1,5-25,2 m) que também foram divididos aleatoriamente em um conjunto de 70% dos dados para ajuste e 30% para validação e seleção do melhor modelo. As espécies com potencial madeireiro foram: *Alchornea glandulosa*, *Alchornea triplinervia*, *Andira fraxinifolia*, *Annona cacans*, *Annona neosericea*, *Brosimum* sp., *Cabralea canjerana*, *Cedrela fissilis*, *Centrolobium robustum*, *Citharexylum mirianthum*, *Cordia silvestris*, *Coussapoa microcarpa*, *Cryptocarya* sp., *Cupania oblongifolia*, *Cupania vernalis*, *Ficus adhatodifolia*, *H. alchorneoides*, *Lonchocarpus campestris*, *Machaerium* sp., *Magnolia ovata*, *Margaritaria nobilis*, *Matayba intermedia*, *Miconia cabucu*, *M. cinnamomifolia*, *Myrsine coriacea*, *Myrcia pubipetala*, *Myrcia splendens*, *Nectandra membranacea*, *Nectandra oppositifolia*, *Ocotea mandiocanna*, *Ocotea puberula*, *Ormosia arborea*, *Piptocarpha axillaris*, *Platimiscium floribundum*, *Protium kleinii*, *Prunus myrtifolia*, *Pseudobombax grandiflorum*, *Pterocarpus rohri*, *Schizolobium parahyba*, *Seguiera*

*langsdorffii*, *Sloanea guianensis*, *Tetrorchidium rubrivenium*, *Trichilia lepidota*, *Vernonanthura* sp., *Virola bicuhyba*, *Xylopia brasiliensis*, *Zanthoxylum rhoifolium*, *Zanthoxylum* sp.

#### 6.2.3.3 Modelos afileamento para *M. cinnamomifolia* e *H. alchorneoides*

Além dos modelos acima citados, foram ajustados modelos de afileamento específicos para as duas espécies mais abundantes no local do estudo, sendo *M. cinnamomifolia* (n = 36; DAP: 14,0-41,0 cm; Ht: 14,9-25,6 m; Hf: 4,6-16,9 m) e *H. alchorneoides* (n = 52; DAP: 6,2-46,9 cm; intervalo de Ht: 6,5-27,8 m; Hf: 2,5-25,2 m). Devido aos tamanhos de amostra menores, optou-se por realizar a separação do conjunto de ajuste 90% e 10% para validação, também realizado com 1.000 iterações. O Viés (%), R<sup>2</sup> \*, RMSE e MAPE (%) dos modelos foram calculados e confrontados com o melhor modelo genérico.

#### 6.2.3.4 Sortimento

Após a etapa de ajuste e seleção do melhor modelo, foi realizado o cálculo do sortimento para as parcelas instaladas no Projeto Madeira Nativa, com o intuito de verificar o potencial madeireiro da área amostrada (3,68 ha). O banco de dados usado foi o inventário pré-colheita de 23 parcelas, nas quais todos os indivíduos acima de 5 cm de DAP foram registrados e medidos (Anexo 1). Após uma análise das planilhas de inventário e exclusão de indivíduos com informações com incertezas, foram encontradas 4705 árvores utilizadas para o cálculo do sortimento.

O sortimento foi dividido em duas classes: classe 1 - toras com comprimento de 3,1 m e classe 2 - lenha (com comprimento de 1,0 m). A altura do toco considerada foi de 20 cm. Os diâmetros das classes foram estabelecidos da seguinte forma: 5,0-15,0 cm de diâmetro da ponta fina destinado a lenha e acima de 15,0 cm de diâmetro da ponta fina para toras. Os indivíduos foram agrupados em classes de frequência em intervalo de 5,0 em 5,0 cm e tiveram seu DAP, altura e frequência determinados (Tabela 6). O cálculo do volume potencial de cada classe foi realizado com a integral do melhor modelo selecionado no ajuste, validação e seleção.

## 6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.3.1 Modelos genéricos e modelos para espécies com potencial madeireiro

Os modelos genéricos de afilamento apresentaram RMSE variando de 2,62 a 4,47 cm e MAPE variando de 8,0 a 18,1%. O modelo nº 6 inicialmente apresentou o melhor desempenho, pois gerou RMSE = 2,62 cm e MAPE = 8,0%. No entanto, nem todos seus parâmetros foram estáveis (PRSE <50%; Tabela 4). Esse modelo mostrou viés positivo, embora tenha sido próximo de zero (1,6%).

O modelo nº 1 também apresentou os menores valores de RMSE = 2,62 cm, MAPE = 8,4% e viés = 2,3%. Além disso, todos os parâmetros deste modelo foram estáveis. O PRSE dos parâmetros pode ser enviesado pela autocorrelação da série de dados. Esse fato não foi abordado neste estudo, sendo recomendado um estudo mais aprofundado de acordo com ROJO et al., (2005) quando utiliza-se dados em série. Desta forma, o polinômio do 5º grau (modelo nº 1) mostra-se mais estável e estatisticamente mais robusto que o modelo nº 6 (Tabela 4).

Os modelos de afilamento para as potencialmente madeireiras apresentaram um desempenho ligeiramente melhor em comparação aos modelos genéricos de afilamento. O RMSE variou de 2,38 a 4,29 cm e o MAPE variou de 7,9 a 18,1%. O melhor desempenho foi novamente alcançado pelo modelo nº 6; RMSE = 2,38 cm e MAPE = 7,9% (Tabela 4). Ademais, esse modelo produziu um viés próximo de zero (1,4%). Os modelos nº 5 e nº 1 apresentaram valores de Viés, RMSE e MAPE semelhantes ao modelo nº 6, além disso os parâmetros destes modelos (nº 5 e nº1) mostraram-se estáveis (PRSE <50%).

A qualidade geral dos modelos pode ser considerada satisfatória, fornecendo ferramentas úteis para estimativas do afilamento em um cenário de manejo florestal na FOD secundária em Santa Catarina. Os modelos genéricos não superaram os modelos específicos, sendo assim, os modelos genéricos considerados adequados para estimativas dos diâmetros ao longo do fuste.

Conforme mencionado previamente, a impossibilidade de manejo da floresta catarinense e o processo de coleta de dados pelo método destrutivo justificam a escassez de modelos de afilamento árvores nativas. A escassez de pesquisas permanece quando considera-se o Brasil, dentre os poucos estudos que abordam florestas nativas, pode-se destacar Chichorro; Resende; Leite (2003). O autor considerou uma amostra com 62 espécies,

próximo as 83 espécies utilizadas na presente pesquisa. Porém, na amostra de Chichorro; Resende; Leite, (2003) foram coletados apenas indivíduos retos, com boa qualidade do fuste. O autor relatou que o modelo de Demaerschalk (1972) gerou as melhores estimativas de diâmetros ao longo do fuste.

Bem como, para espécies florestais comercialmente exploradas na Amazônia Mato-grossense, Lansanova et al., (2013) também verificou que o modelo de Demaerschalk (1972) apresentou maior acurácia na estimativa dos diâmetros. O estudo de Soares et al., (2011) ajustou modelos de afilamento para onze espécies florestais. O autor utilizou informações de árvores plantadas em parcelas experimentais na década de 40 e encontrou o modelo de Biging (1984) superior aos demais para descrever o perfil do fuste.

Embora Chichorro; Resende; Leite, (2003) tenham investigado a significância dos parâmetros e o gráfico 1:1, a metodologia utilizada pelos estudos citados acima, na avaliação do ajuste é considerada obsoleta; pois os autores utilizaram para avaliação da qualidade do ajuste o coeficiente de determinação, o erro padrão de estimativa em porcentagem e a análise gráfica dos resíduos, enquanto atualmente é indicado o uso de métricas de qualidade como RMSE e MAPE, além da investigação da estabilidade dos parâmetros, através do PRSE (PICARD et al., 2015; MOSER & OLIVEIRA, 2017).

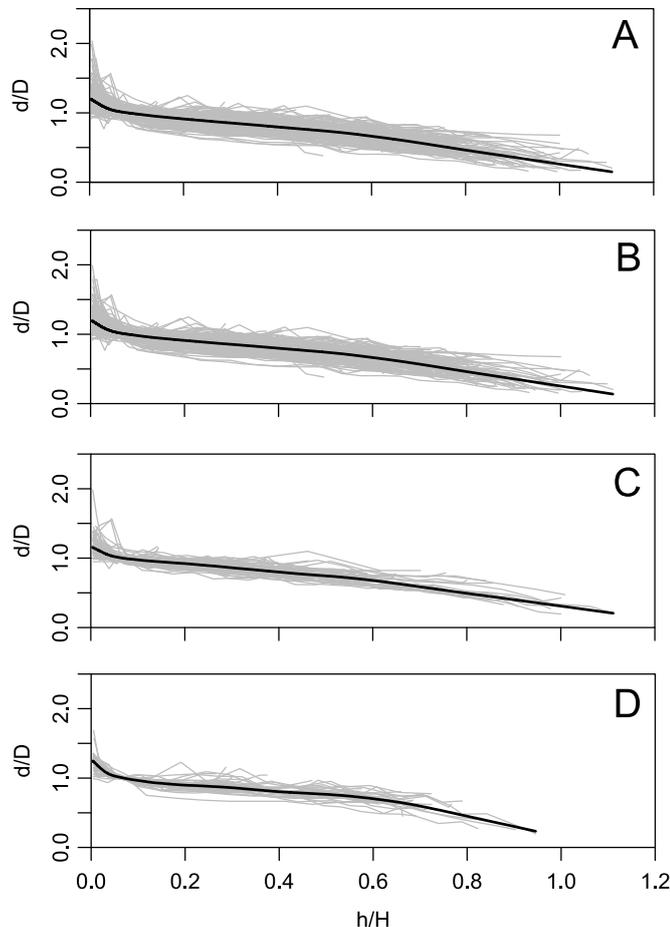
Portanto, o presente estudo apresentou um tópico geralmente negligenciado, porém destacado por (Sileshi, 2014): modelos com termos colineares ou não explicativos podem produzir parâmetros com alto erro padrão (PRSE), apesar do desempenho satisfatório transmitido por métricas como RMSE e Viés (por exemplo, o modelo nº6 na Tabela 4). Portanto, sugere-se o uso de PRSE e conseqüentemente, modelos com parâmetros elevados (não significativos) devem ser descartados. O PRSE deve ser avaliado considerando as observações de Picard et al. (2015) e Moser e Oliveira (2017), principalmente ao adotarem o limiar de exclusão de parâmetros sugerido por Sileshi, (2014b). O uso de pelo menos uma das estatísticas mencionadas é obrigatório, de acordo com as diretrizes fornecidas por Jara et al., (2015).

Na revisão de trabalhos sobre modelos de afilamento, Andrade; Schmitt (2017) e Nicoletti et al., (2016) investigaram os modelos utilizados em mata nativa e diferentes espécies florestais plantadas no Brasil. Os autores verificaram que o polinômio do 5º grau, Hradetzky (1976), Demaerschalk (1972), Garay (1979) e Biging (1984) são os mais difundidos no Brasil para avaliação e quantificação de multiprodutos em diversas espécies florestais, mesmo em nativas do Brasil. Dentre estes, o modelo do polinômio do 5º grau e os de Hradetzky (1976) e Demaerschalk (1972) são os três modelos de *taper* preferenciais.

A forma do fuste de árvores em florestas tropicais nativas é bastante irregular, tornando um grande desafio a meta de estabelecer funções de afilamento com acuracidade e, conseqüentemente, estimar o volume comerciável. Essa irregularidade se reflete até de forma intraespecífica, pois mesmo separando as espécies *M. cinnamomifolia* e *H. alchorneoides* não houve ganho no desempenho dos modelos, fato que pode ser visualizado pelos quatros conjuntos comportarem-se de maneira semelhante (Figura 6).

Mais recentemente, Nunes; Görgens, (2016) propuseram o uso de Redes Neurais – *Neural Network* na modelagem do afilamento. O RMSE encontrado pelo autor foi de 0,43 cm para seu conjunto de validação na FOD no Parque Estadual Carlos Botelho – SP. Essa abordagem pode ser uma alternativa para lidar com os problemas mencionados anteriormente, presentes nas florestas tropicais. A Inteligência artificial é promissora por não ser necessário assumir uma distribuição prévia (isto é distribuição normal), pode implicitamente detectar relações não-lineares complexas entre variáveis, além disso, permite a implementação contínua.

Figura 6. Relação dos diâmetros e alturas relativas dos agrupamentos amostrados. A= todas as espécies; B=espécies potencialmente madeireiras; C= *M. cinnamomifolia*; D = *H. alchorneoides*.



**Tabela 4.** Modelos de afilamento para espécies da Floresta Ombrófila Densa em Santa Catarina. a = intercepto; b, c, e, f, g = parâmetros médios da regressão e seu PRSE médio (%) com 1000 repetições. Viés (%) = viés do modelo; R<sup>2\*</sup> = pseudo R<sup>2</sup> ajustado; RMSE (m<sup>3</sup>) = raiz do erro quadrático médio (m<sup>3</sup>); MAPE (%) = erro percentual absoluto médio. Valores entre parênteses ao lado do RMSE e MAPE referem-se ao coeficiente de variação (%) com 1000 repetições.

Modelo	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>C</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	Viés (%)	R <sup>2*</sup>	RMSE (cm)	MAPE (%)
<b>(1) <math>d/D = a + b.(h/H) + c.(h/H)^2 + d.(h/H)^3 + e.(h/H)^4 + f.(h/H)^5 + \varepsilon</math></b>										
Genérico	1.2092 (0%)	-3.4098 (4%)	14.0806 (7%)	-29.2581 (9%)	26.4657 (12%)	-8.7407 (15%)	2.3	0.94	2.62	8.4
P. Mad	1.1977 (0%)	-3.2981 (4%)	13.4610 (7%)	-27.5821 (9%)	24.5212 (12%)	-7.9836 (15%)	1.4	0.95	2.41	8.2
<b>(2) <math>(d/D)^2 = a + b.(h/H) + c.(h/H)^2 + \varepsilon</math></b>										
Genérico	1.2793 (1%)	-2.1309 (2%)	1.1396 (5%)	-	-	-	3.7	0.93	2.96	10.2
P. Mad	1.2590 (1%)	-2.0331 (2%)	1.0290 (5%)	-	-	-	2.8	0.94	2.72	9.7
<b>(3) <math>(d/D)^2 = a + b.((h/H) - 1) + c.(h/H)^2 - 1) + \varepsilon</math></b>										
Genérico	0.2880 (8%)	-2.1309 (2%)	1.1396 (5%)	-	-	-	3.7	0.93	2.96	10.2
P. Mad	0.2549 (8%)	-2.0331 (2%)	1.0290 (5%)	-	-	-	2.8	0.94	2.72	9.7
<b>(4) <math>(d/D)^2 = a + b. (1 - 2. (h/H) + (h/H)^2) + \varepsilon</math></b>										
Genérico	0.2464 (3%)	1.0266 (1%)	-	-	-	-	3.5	0.93	2.93	9.9
P. Mad	0.2479 (3%)	1.0101 (1%)	-	-	-	-	2.7	0.94	2.71	9.6
<b>(5) <math>d/D = a + b.(H-h)/(H-1,3) + c.(H-h).(h-1,3)/D + d.((H-h).(h-1,3).H)/D + e.((H-h).(h 1,3).(H+h+1,3))/D + \varepsilon</math></b>										
Genérico	0.3115 (4%)	0.7346 (2%)	0.0162 (48%)	-0.0063 (8%)	0.0035 (9%)		1.6	0.94	2.69	8.5

P. Mad	0.2986 (4%)	0.7470 (2%)	0.0187 (26%)	-0.0062 (8%)	0.0035 (8%)	1.5	0.95	2.48	8.5
<hr/>									
$(6) d/D = a + b.(H-h)/(H-1,3) + c.((H-h)/(H-1,3))^2 + d. (H-h)/(H-1,3)^3 + e. (H-h)/(H-1,3)^4 + \varepsilon$									
Genérico	0.3448 (5%)	0.1817 (322%)	3.0997 (15%)	-5.2743 (11%)	2.6710 (8%)	1.6	0.94	2.62	8.0
P. Mad	0.3101 (5%)	0.3121 (92%)	3.1002 (14%)	-5.5973 (9%)	2.8977 (7%)	1.4	0.95	2.38	7.9
<hr/>									
$(7) (d/D)^2 = a + b.(H-h)/(H-1,3) + c.((H-h)/(H-1,3))^2 + d. (H-h)/(H-1,3)^3 + \varepsilon$									
Genérico	-0.0708(60%)	2.4142 (7%)	-3.7159 (8%)	2.4628 (6%)	-	-9.1	0.87	4.47	18.1
P. Mad	-0.0712 (48%)	2.4337 (6%)	-3.7612 (76%)	2.4905 (6%)	-	-9.1	0.88	4.29	18.1

Fonte: a autora.

### 6.3.2 Modelos específicos de afilamento para *M. cinammomifolia* e *H. alchorneoides*

Os modelos específicos apresentaram  $RMSE = 2,43$  a  $4,41$  cm e  $MAPE = 9,64$  a  $21,63\%$  (Tabela 5). Para *M. cinammomifolia*, de maneira geral, nenhum dos modelos específicos superou os modelos genéricos de afilamento. Entre os específicos destacam-se três modelos (n° 5, n° 4 e n° 1) que apresentaram os melhores desempenhos. No entanto, modelo n° 5 apresentou o PRSE do intercepto próximo ao limite de 50%. Desta forma, o modelo n° 1 produziu o melhor ajuste, com  $RMSE = 2,78$  cm,  $MAPE = 9,95\%$  e  $viés = 3,1\%$  (Tabela 5).

Para *H. alchorneoides*, os modelos específicos n° 1, n° 5 e n° 6 superaram ligeiramente o modelo genérico de afilamento. Sendo assim, o modelo n° 5 produziu os menores valores para  $RMSE = 2,43$  cm e  $viés = 0,8\%$ , e  $MAPE = 9,81\%$ , valores muito próximos dos do modelo n° 1.

A comparação entre modelos genéricos e específicos revelou valores semelhantes nos quatro grupos criados – genérico, espécies potencialmente madeireiras, *M. cinnamomifolia* e *H. alchorneoides*. Não foram encontradas evidências que a arquitetura mais regular da espécie *M. cinnamomifolia* tenha representado diferença no ajuste de modelos específicos. Portanto, realizar o ajuste para modelos específicos pode não justificar esforços extra exigidos na coleta de dados de amostras confiáveis ( $n \geq 30$ ) no presente estudo.

No entanto, ao considerar espécies com potencial de manejo no Brasil, destaca-se o trabalho para *Mimosa scabrella* no Paraná; Queiroz et al. (2006) selecionaram o modelo de Hradetzky (1976) como superior aos demais modelos estudados. Leite et al. (2006), ao ajustarem equações para *Virola surinamensis* no Pará, observaram melhor desempenho com o modelo de Garay (1979) na estimativa de afilamento.

Na pesquisa realizada por Figueiredo Filho et al., (2015) para *Araucaria angustifolia* no Paraná, verificaram que o modelo de Schöpfer (1966), também conhecido como polinômio do 5° grau apresentou maior acurácia. Os autores ainda recomendam o ajuste de funções de afilamento em classes de idade para melhorar as estimativas.

**Tabela 5.** Modelos de afilamento para as espécies licurana (*H. alchorneoides*) e jacatirão-açú (*M. cinnamomifolia*). a = intercepto; b, c, e, f, g = parâmetros médios da regressão e seu PRSE médio (%) com 1000 repetições. Viés (%) = viés do modelo; R<sup>2\*</sup> = pseudo R<sup>2</sup> ajustado; RMSE (m<sup>3</sup>) = raiz do erro quadrático médio (m<sup>3</sup>); MAPE (%) = erro percentual absoluto médio. Valores entre parênteses ao lado do RMSE e MAPE referem-se ao coeficiente de variação (%) com 1000 repetições.

Modelo	a	b	c	e	f	g	Viés (%)	R <sup>2*</sup>	RMSE (cm)	MAPE (%)
<b>(1) <math>d/D = a + b.(h/H) + c.(h/H)^2 + d.(h/H)^3 + e.(h/H)^4 + f.(h/H)^5 + \varepsilon</math></b>										
Licurana	1.1719 (1%)	-2.8923 (7%)	11.8286 (12%)	-25.0600 (16%)	23,3816 (19%)	-8,1018 (23%)	0.8	0.92	2.47	7.4
Jacatirão	1.2224 (1%)	-4.4894 (7%)	23.1157 (11%)	-56.3134 (13%)	61.4209 (16%)	-25.1620 (17%)	3.1	0.82	2.78	7.7
<b>(2) <math>(d/D)^2 = a + b.(h/H) + c.(h/H)^2 + \varepsilon</math></b>										
Licurana	1.2280 (1%)	-1.8327 (4%)	0.8329 (11%)	-	-	-	2.1	0.91	2.71	8.5
Jacatirão	1.2462 (1%)	-1.9248 (6%)	0.9986 (15%)	-	-	-	3.1	0.76	3.26	8.9
<b>(3) <math>(d/D)^2 = a + b.((h/H) - 1) + c.(h/H)^2 - 1) + \varepsilon</math></b>										
Licurana	0.2882 (14%)	-1.8327 (4%)	0.8329 (11%)	-	-	-	2.1	0.91	2.71	8.5
Jacatirão	0.3200 (19%)	-1.9248 (6%)	0.9986 (15%)	-	-	-	3.1	0.76	3.26	8.9
<b>(4) <math>(d/D)^2 = a + b. (1 - 2. (h/H) + (h/H)^2) + \varepsilon</math></b>										
Licurana	0.2730 (5%)	0.9625 (2%)	-	-	-	-	2.2	0.91	2.71	8.7
Jacatirão	0.2989 (6%)	0.9445 (3%)	-	-	-	-	3.2	0.78	3.27	9.0
<b>(5) <math>d/D = a + b.(H-h)/(H-1,3) + c.(H-h).(h-1,3)/D + d.((H-h).(h-1,3).H)/D + e.((H-h).(h-1,3).(H+h+1,3))/D + \varepsilon</math></b>										
Licurana	0.3225 (5%)	0.7200 (2%)	0.0528 (16%)	-0.0079 (10%)	0.0036 (13%)		0.8	0.92	2.43	7.0

Jacatirão	0.0859 (45%)	0.9658 (4%)	0.0958 (15%)	-0.0133 (9%)	0.0069 (10%)	0.8	0.76	2.79	7.5
<hr/>									
$(6) d/D = a + b.(H-h)/(H-1,3) + c.((H-h)/(H-1,3))^2 + d. (H-h)/(H-1,3)^3 + e. (H-h)/(H-1,3)^4 + \varepsilon$									
Licurana	0.3195 (6%)	0.8232 (23%)	0.9200 (77%)	-2.6057 (31%)	1.5709 (22%)	0.8	0.92	2.48	7.0
Jacatirão	0.2241 (32%)	0.4269 (156%)	4.6529 (37%)	-9.0845 (22%)	4.8112 (17%)	2.6	0.82	2.89	7.9
<hr/>									
$(7) (d/D)^2 = a + b.(H-h)/(H-1,3) + c.((H-h)/(H-1,3))^2 + d. (H-h)/(H-1,3)^3 + \varepsilon$									
Licurana	-0.0272 (147%)	1.9418 (12%)	-2,8384 (16%)	1,9566 (13%)	-	-8.1	0.86	4.07	16.6
Jacatirão	-0.5183 (19%)	5.1144 (10%)	-8,1582 (11%)	4,6739 (10%)	-	-6.4	0.81	4.41	13.6

Fonte: a autora.

### 6.3.3 Sortimento

Após a etapa de ajuste e seleção, o modelo genérico nº 1 apresentou melhor desempenho. Desta forma, utilizou-se os coeficientes deste modelo (Tabela 4) para o cálculo do sortimento que resultou na estimativa dos diâmetros de acordo com o comprimento de retirada das toras, detalhado na Tabela 6.

Uma árvore teve que ser excluída pois estava fora dos limites de diâmetro utilizados no ajuste. Portanto as estimativas desse indivíduo carregariam incertezas dessa etapa. O volume estimado para todos indivíduos das classes variou de 3,9 – 150,8 m<sup>3</sup>, sendo a classe de 30,0 – 35,0 com maior expressão no volume. As três primeiras classes de DAP (até 20,0 cm) concentraram 80% dos indivíduos, no entanto, representam 22,4% do volume total. Mesmo a classe 3 tenha diâmetro maior que 15, o diâmetro médio desta classe não possibilitou a retirada de toras (Tabela 7). Nas classes de 45-50 cm e 60-65 cm houve o aproveitamento todo em forma de toras. As toras somaram 28,8 m<sup>3</sup> e a classe 2 – lenha totalizou apenas 0,84 m<sup>3</sup> no somatório das classes. O valor de volume de cada classe foi multiplicado pela frequência média dos indivíduos nas classes (Tabela 6) que resultou em 865, 6 m<sup>3</sup> nas 23 parcelas amostradas, um estoque médio de 37,6 m<sup>3</sup>.ha<sup>1</sup>

O estudo de Figueiredo Filho abordou o volume dos sortimentos nas classes de idade de árvores femininas e masculinas de *A. angustifolia*. O autor realizou estimativas para cinco classes, sendo energia, celulose, serraria 1, serraria 2, e laminação, verificando que os sortimentos mais nobres, de toras com diâmetros maiores que 23 cm na ponta fina, são produzidos no povoamento entre 11 e 15 anos de idade, representando 7,17% do volume total.



**Tabela 7.** Estimativa de volume de toras e lenha, por classe de DAP, de 4.704 árvores medidas nas 23 parcelas amostradas pelo Projeto Madeira Nativa, em Guaramirim/SC. O Volume do toco foi subtraído do volume do fuste.

<b>Classes</b>	<b>DAP</b>	<b>Frequência</b>	<b>H</b>	<b>Volume - Tora</b>	<b>Volume - Lenha</b>	<b>Volume total da classe</b>	<b>Volume total</b>
	<b>cm</b>		<b>m</b>	<b>m<sup>3</sup>/árvore</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>m<sup>3</sup></b>
5,0-10,0	7,3	2017	6,9		0,014	0,014	28,4
10,0-15,0	12,2	1135	10,5		0,063	0,063	71,8
15,0-20,0	17,1	611	13,0		0,160	0,160	97,8
20,0-25,0	22,4	350	15,6	0,2079	0,126	0,334	116,7
25,0-30,0	27,2	255	17,3	0,4247	0,120	0,545	138,9
30,0-35,0	32,4	177	18,8	0,8103	0,042	0,852	150,8
35,0-40,0	36,7	80	20,1	1,0845	0,080	1,164	93,2
40,0-45,0	42,0	43	20,3	1,5167	0,021	1,537	66,1
45,0-50,0	47,3	18	22,8	2,1791		2,179	39,2
50,0-55,0	52,1	11	26,8	3,1067	0,032	3,138	34,5
55,0-60,0	55,3	4	21,5	2,7399	0,079	2,819	11,3
60,0-65,0	60,2	1	25,0	3,9272		3,927	3,9
65,0-70,0	67,5	1	33,0	6,4620	0,051	6,513	6,5
70,0-75,0	70,4	1	30,0	6,3644	0,057	6,422	6,4
<b>Total</b>		<b>4704</b>		<b>28,8334</b>	<b>0,8442</b>		<b>865,6</b>

Fonte: a autora.

## 6.4 CONCLUSÃO

As conclusões deste estudo podem ser dispostas da seguinte forma: (i) a qualidade geral dos modelos foi satisfatória e, portanto, os modelos apresentados podem ser considerados ferramentas de estimativas de afilamento e conseqüentemente sortimento; úteis no manejo florestal na FOD do em SC, pois fragmentos da FOD em SC são geralmente encontrados em topografias complexas que é o retrato da área estudada; (ii) apenas para espécie *H. alchorneoides* modelos específicos demonstraram-se ligeiramente melhores que modelos genéricos. Desta forma, o esforço adicional não apresentou parâmetros superiores aos modelos genéricos; (iii) a quantificação da incerteza na estimação de parâmetros de regressão revela informações críticas para seleção e validação de modelos.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSON-SPRECHER, R. Model comparisons and  $R^2$ . **The American Statistician**, v. 48, n. 2, p.113–117, 1994.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDRADE, V. C. L. DE. Novos modelos de taper do tipo expoente-forma para descrever o perfil do fuste de árvores. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 80, p. 271–283, 2014.
- ANDRADE, V. C. L. DE; SCHMITT, T. Modelos de taper empregados em florestas brasileiras nativas e em plantações florestais sem eucalipto e pinus. **Advances in Forestry Science**, v. 4, n. 1, p. 89–92, 2017.
- ANDRAE, F. H.; SCHNEIDER, P. R.; DURLO, M. A. Importância do Manejo de Florestas Nativas para a Renda da Propriedade e Abastecimento do Mercado Madeireiro. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 1293–1302, 2018.
- BISEWKI, C. Guaramirim, 2017. **Comunicação pessoal**.
- CARVALHO, P. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Vol.3. Colombo: Embrapa Florestas. p. 593, 2008.
- CARVALHO, P. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Vol.2. Colombo: Embrapa Florestas. p. 627, 2006.
- CARVALHO, P. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. V.1. Colombo: Embrapa Florestas, p. 1039, 2003.
- CORREIA, J.; FANTINI, A.; PIAZZA, G. Equações Volumétricas e Fator de Forma e de Casca para Florestas Secundárias do Litoral de Santa Catarina. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.
- COSTANZA, R. et al. Changes in the global value of ecosystem services. **Global Environmental Change**, v. 26, n. 1, p. 152–158, 2014.
- FANG, Z.; BAILEY, R. L. Compatible volume and taper models with coefficients for tropical species on Hainan Island in southern China. **Forest Science**, v. 45, n. 1, p. 85–100, 1999.
- FANTINI, A. C.; SIMINSKI, A.; GAIO, M. F. Madeira de florestas secundárias em SC : Nova fonte de renda para os agricultores. **Agropecuária Catarinense**, v. 29, n. 2, p. 15–18, 2016.
- FAVALESSA, C. M. C. et al. Funções de afilamento não segmentadas e segmentadas para *Tectona grandis* na região centro-sul matogrossense. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 72, p. 373–387, 2012.
- FIGUEIREDO FILHO, A. et al. Efeito da Idade no Afilamento e Sortimento em Povoamentos de *Araucaria angustifolia*. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 1, p. 50–59, 2015.
- FRIEDL, R. A. **Dinâmica e Prognose da Forma dos Fustes em Povoamentos Plantados de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze**. Universidade Federal do Paraná, 1989.

- GIMENEZ, B. O. et al. Equações volumétricas para espécies comerciais madeireiras do sul do estado de Roraima. **Scientia Forestalis** v. 43, n. 106, p. 291–301, 2015.
- IBGE. Mapa da Área de Aplicação da Lei no 11.428 de 2006. 2008.
- JARA, M. C. et al. Guidelines for documenting and reporting tree allometric equations. **Annals of Forest Science**, v. 72, n. 6, p. 763–768, 2015.
- KLEIN, R. M. Mapa fitogeográfico do Estado de Santa Catarina. In: REITZ, R. (Ed.). . **Flora Ilustrada Catarinense**. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues, p. 1–24, 1978.
- MOSER, P., OLIVEIRA, L. Z. 2017. **Regressão linear aplicada à dendrometria: uma introdução e iniciação ao R**, Blumenau. 152p, 2017.
- LANSSANOVA, L. R. et al. Avaliação de Funções de Afilamento para a Estimativa de Diâmetro de Espécies Florestais Comerciais do Bioma Amazônico Mato-Grossense. **FLORESTA**, v. 43, n. 2, p. 215, 2013.
- LEITE, H. G. et al. Função de afilamento para *Virola surinamensis* (Roll.) Warb. **Revista Árvore**, v. 30, n. 1, p. 99–106, 2006.
- LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. DE. Importância das Variáveis Altura Dominante e Altura Total em Equações Hipsométricas e Volumétricas. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 301–310, 2003.
- NETER, J. et al. **Applied linear statistical models**. Boston: McGraw-Hill Inc, 1996.
- NICOLETTI, M. F. et al. Descrição do Perfil do Fuste de Árvores por meio das Funções de afilamento. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 15, n. 4, p. 365–372, 2016.
- NUNES, M. H. **Stem profile modeling in Cerrado and tropical forests formations in Brazil**. Universidade de São Paulo, 2013.
- NUNES, M. H.; GÖRGENS, E. B. Artificial Intelligence Procedures for Tree Taper Estimation within a Complex Vegetation Mosaic in Brazil. **PLOS ONE**, v. 11, n. 5, p. 1-16, 2016.
- OLIVEIRA-FILHO, A. T. Um Sistema de Classificação Fisionômico-Ecológico da Vegetação Neotropical : segunda aproximação Introdução. **Fitossociologia No Brasil - Volume 2**, p. 452–474, 2015.
- PIAZZA, G. E.; ZAMBI. Regeneração de espécies madeireiras na floresta secundária da Mata Atlântica. **Advances in Forestry Science**, v. 4, n. 2, p. 99–105, 2017.
- PICARD, N. et al. Should tree biomass allometry be restricted to power models? **Forest Ecology and Management**, v. 353, p. 156–163, 2015.
- PICARD, N.; SAINT-ANDRÉ, L.; HENRY, M. **Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction**. Montpellier: Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2012.
- PRÖBSTL-HAIDER, U. Cultural ecosystem services and their effects on human health and well-being – A cross-disciplinary methodological review. **Journal of Outdoor Recreation and Tourism**, v. 10, p. 1–13, 2015.

QUEIROZ, D. et al. Identidade de modelos em funções de afilamento para *Mimosa scabrella* Benth em povoamentos nativos da região metropolitana de Curitiba/PR. **Floresta**, v. 38, n. 2, p. 339–349, 2008.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2013. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

RIBEIRO, M. C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, 2009.

ROJO, A. et al. Stem taper functions for maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Galicia (Northwestern Spain). **European Journal of Forest Research**, v. 124, n. 3, p. 177–186, 2005.

ROLIM, S. G. **Silvicultura e Tecnologia de Espécies da Mata Atlântica**. Belo Horizonte: Editora Rona, 2018.

SCHORN, L. A.; GALVÃO, F. Dinâmica da Regeneração Natural em Três Estágios Sucessionais de uma Floresta Ombrófila Densa em Blumenau, SC. **Floresta**, v. 36, n. 1, p. 59–74, 2006.

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

SILVA, D. A., KLITZKE, A. R., ULLER, H. F. Alterações na estrutura fitossociológica do estrato arbóreo causadas pelo corte seletivo em uma área de manejo florestal em Santa Catarina. In: SCHNEIDER et al., **6º simpósio latino-americano sobre manejo florestal**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria. p. 77–83, 2015.

SOARES, C. P. B. et al. Equações hipsométricas, volumétricas e de taper para onze espécies nativas. **Revista Árvore**, v. 35, n. 5, p. 1039–1053, 2011.

SOUZA, C. A. M. DE et al. Modelos de afilamento para o sortimento do fuste de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, v. 38, n. 9, p. 2506–2511, 2008.

STEINBACH, A. J., TOMASELLI, C. C., REFOSCO, J. C. **Atlas da bacia hidrográfica do rio Itapocu**. AMVALI. Jaraguá do Sul. p. 147. 2015.

VIBRANS, A. C. et al. **Floresta Ombrófila Densa**. Blumenau: Edifurb, 2013a.

VIBRANS, A. C. et al. Using satellite image-based maps and ground inventory data to estimate the area of the remaining Atlantic forest in the Brazilian state of Santa Catarina. **Remote Sensing of Environment**, v. 130, p. 87–95, 2013b.

WAGENMAKERS, E.-J.; FARRELL, S. AIC model selection using Akaike weights. **Psychonomic Bulletin & Review**, v. 11, n. 1, p. 192–196, 2004.

## **7 ARTIGO 3 – UTILIZAÇÃO DE *TERRESTRIAL LASER SCANNER* (TLS) E EXTRAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS NA FLORESTA OMBRÓFILA DENSA EM SANTA CATARINA**

### **7.1 INTRODUÇÃO**

As florestas desempenham papel fundamental no provimento de recursos ecológicos, sociais e econômicos. Notadamente, a região dos trópicos possui as florestas com maior biodiversidade do planeta, contudo essa também é a região com maior pressão antrópica (COSTANZA et al., 2014; PRÖBSTL-HAIDER, 2015). No Brasil, a Mata Atlântica é o domínio mais impactado, resultado da fragmentação e degradação florestal ocasionada pelas atividades humanas (RIBEIRO et al., 2009).

O levantamento do volume de madeira presente na floresta é uma informação básica para o aproveitamento adequado do seu potencial. Tradicionalmente, o volume da árvore individual ou na parcela é calculado usando modelos alométricos alimentados por informações ou com variáveis preditoras o diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura total da árvore (H) (PICARD; SAINT-ANDRÉ; HENRY, 2012). A coleta de dados destas variáveis é realizada durante o inventário florestal e geralmente com uso de fita, suta e clinômetro ou hipsômetro. A coleta pode ser demorada, dispendiosa e suscetível a erros, nem sempre rastreáveis. Por exemplo, nas estimativas de altura de árvores, a acurácia e a precisão das medidas são dependentes da experiência e habilidade do operador e das especificações e limitações do instrumento usado (CONTO et al., 2017).

Novas tecnologias para obtenção de variáveis dendrométricas utilizadas na estimativa de volume de madeira de árvores em pé tem sido desenvolvida. Entre estas, a tecnologia do *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) está sendo usado para determinação de variáveis dendrométricas e permite, através de múltiplas varreduras, o chamado mapeamento em 3D da vegetação (SILVA et al., 2013). Assim, o TLS tem potencial de reduzir incertezas na estimativa do volume, biomassa e, conseqüentemente, do estoque de carbono nas florestas (CALDERS et al., 2015; SAARINEN et al., 2017).

Apesar da tecnologia ser antiga (década de 1980), o primeiro *Laser Scanner* terrestre comercial foi introduzido no mercado em 1998. Desde então, esse equipamento passou por melhorias no seu tamanho, peso e até preço. Além disso, obteve ganho em resolução espacial e velocidade de medição. Nas últimas duas décadas, houve um progresso expressivo nas pesquisas envolvendo o TLS no setor florestal e inúmeros aspectos foram abordados (CABO

et al., 2018; LIANG et al., 2016). Inicialmente, os estudos concentravam-se na detecção de árvores em parcelas, e obtenção de informações dendrométricas básicas, como DAP, H e frequência (ASCHOFF; SPIECKER, 2004; BIENERT et al., 2006; HOPKINSON et al., 2004; MAAS et al., 2008; MURPHY; ACUNA; DUMBRELL, 2010; PFEIFER; GORTE; WINTERHALDER, 2004; SIMONSE et al., 2003).

Atualmente, com o avanço dos algoritmos para processamento dos dados, o TLS mostra-se uma ferramenta para obtenção de atributos florestais de alta qualidade (LIANG et al., 2018), além da modelagem completa da árvore em 3D (CÔTÉ; FOURNIER; EGLI, 2011; DASSOT et al., 2012; DELAGRANGE; JAUVIN; ROCHON, 2014; LEFSKY; MCHALE, 2008; SCHILLING; SCHMIDT; MAAS, 2012). Além disso, o TLS também vem sendo usado em estudos de ecologia florestal, como por exemplo na estimativa do índice de área foliar e da distribuição desta ao longo da árvore (HOPKINSON et al., 2013; HOSOI; OMASA, 2006; HUANG; PRETZSCH, 2010; STRAHLER et al., 2008; ZHENG; MOSKAL; KIM, 2013).

Nesse contexto, a partir de 2014, foi lançado um projeto internacional de estudo com TLS coordenado pelo Instituto de Pesquisa Geoespacial Finlandês. O projeto é composto por 18 grupos de pesquisa de três continentes, Ásia, Europa e América do Norte. Os principais objetivos desse projeto são avaliar o potencial de aplicação de TLS na digitalização de florestas, a capacidade de algoritmos recentes e estabelecer procedimentos padrões no processamento dos dados criando referências confiáveis (LIANG et al., 2018)

Contudo, as pesquisas com TLS ainda são escassas em florestas nativas subtropicais e tropicais (CALDERS et al., 2015; HOPKINSON et al., 2004; SIMONSE et al., 2003; TEIXEIRA; FONSECA, 2014). Desta forma, a área experimental de manejo no município de Guarimirim contribuiu para realizar algo inédito na FOD de Santa Catarina que foi conduzir a varredura TLS de árvores em pé com a posterior colheita das mesmas.

Sob essa problemática, o presente trabalho tem objetivo de (i) Realizar pela primeira vez a varredura de árvores na FOD de Santa Catarina com uso do TLS; (ii) Extrair variáveis dendrométricas das árvores da parcela (iii) Comparar os dados de DAP e afilamento obtidos pelo TLS com as medidas de campo, pelo método destrutivo.

## 7.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 7.2.1 Área de estudo

A área de estudo foi denominada de Projeto Madeira Nativa e compreende aproximadamente 42 ha localizados em Guaramirim, Santa Catarina (lat. 26°32'01" S; long. 49°02'30" W) pertencente a Floresta Ombrófila Densa (IBGE, 2008) também classificada como Floresta Subtropical Pluvial (KLEIN, 1978; OLIVEIRA-FILHO, 2015). O local de estudo possui uma floresta secundária com aproximadamente 35 anos, sem intervenções nos últimos 30 anos, resultante da sucessão após o abandono da pastagem e parcialmente enriquecida com espécies florestais (*M. cinnamomifolia*, *H. alchorneoides* e *Nectandra spp.*) típicas da região. Segundo Silva, Klitzke e Uller (2015), essa floresta tem uma densidade de 1.807,6 árvores.ha<sup>1</sup> (DAP  $\geq$  5 cm) e uma área basal de 32,3 m<sup>2</sup>.ha<sup>1</sup>; as espécies *H. alchorneoides* e *M. cinnamomifolia* são dominantes, contribuindo para 23,2% e 6,5% da área basal, respectivamente. De acordo com a classificação de Köppen, o local de estudo é influenciado pelo clima Cfa – subtropical mesotérmico, com um verão quente e sem estação seca (ALVARES et al., 2013). De acordo com Steinbach et al., (2015) a precipitação é uniformemente distribuída durante todo o ano, variando entre 1500 e 1700 mm e a temperatura média anual entre 20 e 21 °C. Os dados utilizados nesse artigo compreendem apenas o levantamento realizado na nova parcela instalada, denominada de parcela 27. O mapa de localização do Projeto Madeira Nativa e da parcela 27, onde foi utilizado o TLS está disponível no Anexo I.

### 7.2.2 Coleta de dados

Primeiramente, foi realizada a instalação de uma nova parcela de 40 x 40 metros, denominada parcela 27, com marcações por balizas em cada canto das 16 subparcelas de 10x10m (100m<sup>2</sup>). O *layout* da parcela é igual ao que já estava sendo utilizado nas outras parcelas do Projeto Madeira Nativa. Após a instalação, foi realizado o inventário da parcela da seguinte forma: os indivíduos das espécies arbóreas e arbustivas com DAP maior ou igual a 5 cm foram identificados e tiveram seu diâmetro medido com fita diamétrica. A altura foi determinada com auxílio da trena a *laser*. Através deste equipamento também foram

determinados coordenadas x e y de cada árvore medida, com base nas marcações das subparcelas de 10 x 10 m.

Em seguida, foi realizado o corte dos indivíduos menores que 10 cm de DAP (sub-bosque) na parcela para redução de ruído (obstáculos) e melhor alcance do equipamento TLS. Pois, a grande quantidade de galhos no fuste e a presença do sub bosque iriam dificultar a identificação das árvores nas imagens geradas pelas varreduras (BIENERT et al., 2007).

As varreduras foram realizadas com o equipamento Faro LASER scanner Focus 3D 120 na configuração de 25% da sua resolução total, correspondendo de 4 a 5 pontos por cm<sup>2</sup>. As especificações técnicas do aparelho são mostradas na Tabela 1.

**Tabela 8.** Especificações técnicas do aparelho Faro LASER scanner Focus 3D.

Características técnicas	
Velocidade de medição	Até 976.000 pontos/segundo
Precisão	± 2 mm
Peso	5,2 kg
Tamanho	240 x 200 x 100 mm
Faixa de foco	0,6 - 120 m
Resolução geométrica da câmera	70 megapixel (colorido)
Campo de visão horizontal	300° à 360°

Fonte: Padilha, 2017.

O desenho amostral (posições do scanner e divisão dos blocos) não foi previamente determinado, uma vez que depende das condições encontradas em campo. Com objetivo de obter a melhor maneira para cobrir e executar as varreduras dos fustes, subdividiu-se a parcela de 40 x 40 m em vários blocos. Essa subdivisão não seguiu critérios fixos, mas foi determinada pela declividade do terreno e a pela distribuição das árvores na área. Para melhor aquisição dos pontos foram estabelecidos cinco blocos, com tamanhos distintos, variando entre 200 e 600 m<sup>2</sup>.

Após a criação dos blocos e para realizar as várias varreduras em cada bloco o TLS foi colocado no local das balizas que serviam de demarcação das subparcelas (10 x 10 metros). Foram utilizados cinco alvos esféricos e cinco alvos tabulares para auxiliar no registro das múltiplas varreduras. A alocação dos alvos não seguiu um alinhamento específico; o critério adotado foi de que pelo menos três alvos esféricos estivessem presentes de forma visual em cada varredura. A junção das nuvens de pontos gerados pelas varreduras foi facilitada pela disposição espacial destes alvos. Para facilitar a visualização e posterior identificação das

árvores, por sua vez, foram colocadas fitas na altura do DAP de cada árvore e outras fitas brancas com a numeração das árvores dentro de cada bloco (Figura 7).

Figura 7. Localização do TLS em campo para varredura do bloco 2.



Fonte: a autora.

Posterior à varredura com o TLS, foi executada a derrubada de todas as árvores da parcela de 40x40m. Todas as 131 árvores foram cubadas através do método de Smalian. O diâmetro do fuste foi medido nas alturas de 0,1; 0,3; 0,7; 1,0; 1,3; 2,0; 3,0 m e consecutivamente a cada metro até a extremidade superior; esta foi definida pela ocorrência de uma bifurcação significativa do fuste principal. O diâmetro dos galhos em cada metro desde sua base até o limite de diâmetro de 5 cm também foi medido. Os diâmetros foram medidos usando fita diamétrica ou suta. Ao usar a suta, foram registradas duas medidas perpendiculares em cada seção. Somado a isto, registrou-se a altura total e do fuste usando uma trena.

### 7.2.3 Extração das variáveis dendrométricas

Após a utilização do TLS em campo, cada bloco teve suas respectivas varreduras agrupadas e registradas utilizando o Faro Scene que acompanha o equipamento e desta forma, originaram a base de dados deste trabalho. Foi usado o Faro Scene que acompanha o equipamento. O formato de exportação do aparelho FARO é E57. Este formato foi criado por um comitê da ASTM (*American Society for Testing and Materials*) para desenvolver um

padrão aberto de intercâmbio de dados de sistemas de imagens 3D. O formato E57 é projetado para ser mais genérico, além de armazenar uma nuvem de pontos *laser* também codifica dados de sistemas flash LIDAR, scanners 3D estruturados, sistemas de visão estéreo e outros dispositivos que produzem medições em 3D. No entanto, como trata-se de um formato de troca, é necessário que seja feita a conversão do arquivo para outra extensão, por exemplo, a extensão LAS que é um formato editável e suportado em maior número de softwares de tratamento de nuvem de pontos. A conversão de formato foi realizada no software LAStools (ISENBURG, 2017).

Devido à complexidade do manuseio dos dados TLS, foi estabelecida uma parceria com a empresa Forlidar, sediada em Piracicaba, para o processamento e extração das variáveis dendrométricas. Os dados foram processados com um conjunto de ferramentas chamado de TLStools, desenvolvido pela própria empresa Forlidar. O acesso ao software é restrito aos técnicos da empresa. Trata-se de uma adaptação do pacote TreeLS, desenvolvido no software R (R CORE TEAM), porém com maior capacidade computacional.

O processamento adotou as seguintes etapas: inicialmente, as nuvens foram reamostradas para redução da densidade de pontos. O filtro aplicado foi sistemático, mantendo um ponto aleatório, quando existente, por voxel de 2,5 x 2,5 x 2,5 cm. Depois desta reamostragem, os pontos do solo foram classificados e as nuvens foram então normalizadas, pois a área apresentava declividade acentuada. Com as nuvens normalizadas, realizou-se o recorte contendo apenas a área interna da parcela em que houve o alcance do TLS no solo. Primeiramente, foi gerado um arquivo com as regiões de ocorrência de um possível tronco e, em seguida, procedeu-se a identificação dos troncos atribuindo uma nova classificação aos pontos que pertenciam as árvores. Essa classificação utilizou valores para as classes respeitando o padrão internacional que simboliza, classe 2 solo e vegetação classes de 3 a 5. A partir, dessa etapa foi obtido o ID do tronco, atribuído de forma aleatória, a coordenada central X da seção de tora, a coordenada central Y da seção de tora, o rad: raio da seção (m), error: erro estatístico (mínimos quadrados aplicado à estimativa de circunferência), h\_min: altura da base da seção de tora, h\_max: altura do topo da seção de tora, n: número de pontos na seção de tora. Em seguida, foi removido o ruído remanescente do processamento bruto, falsas árvores, medidas incompatíveis com as árvores. Inicialmente o processo foi automático, porém a limpeza foi semiautomática, com inspeção visual dos resultados. Os processos utilizados seguiram a metodologia de Conto et al., (2017) que combina algoritmo para limpeza do ruídos (*Denoising*) e modelagem do tronco (*Stem modelling*).

Em seguida, foi realizada a comparação dos valores de DAP e afilamento obtidos pelo processamento da Forlidar com os dados de campo, que aconteceu de maneira visual, pois os ID's atribuídos pelo algoritmo não coincidiram com a numeração das árvores na parcela em campo. As métricas de qualidade do estimativas foram calculadas a partir das observações que apresentavam as duas informações, do TLS e do campo. O desempenho das estimativas foi avaliado por meio do uso da raiz do erro quadrático médio (RMSE, Eq. 1), do viés (Eq. 2) e do erro percentual absoluto médio (MAPE, Eq. 3).

$$RMSE = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \hat{d}_i)^2}{n} \right)^{1/2} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$Viés(\%) = \sum_{i=1}^n \frac{\hat{d}_i - d_i}{d_i} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$MAPE(\%) = \sum_{i=1}^n \frac{|d_i - \hat{d}_i|}{d_i} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde,  $\hat{\theta}_k$  = parâmetro de regressão estimado; SE = erro padrão;  $d_i$  = diâmetro da  $i^a$  medida da árvore;  $\hat{d}_i$  = diâmetro previsto para a  $i^a$  medida da árvore;  $n$  = número de árvores utilizadas no procedimento de validação.

Os dados obtidos através do TLS foram plotados contra os valores observados em um gráfico 1:1. Os valores observados (eixo y) foram plotados em relação aos valores previstos (eixo dos x) para avaliar a distribuição residual de padrões incomuns. Os procedimentos de ajuste foram realizados no software R (R CORE TEAM).

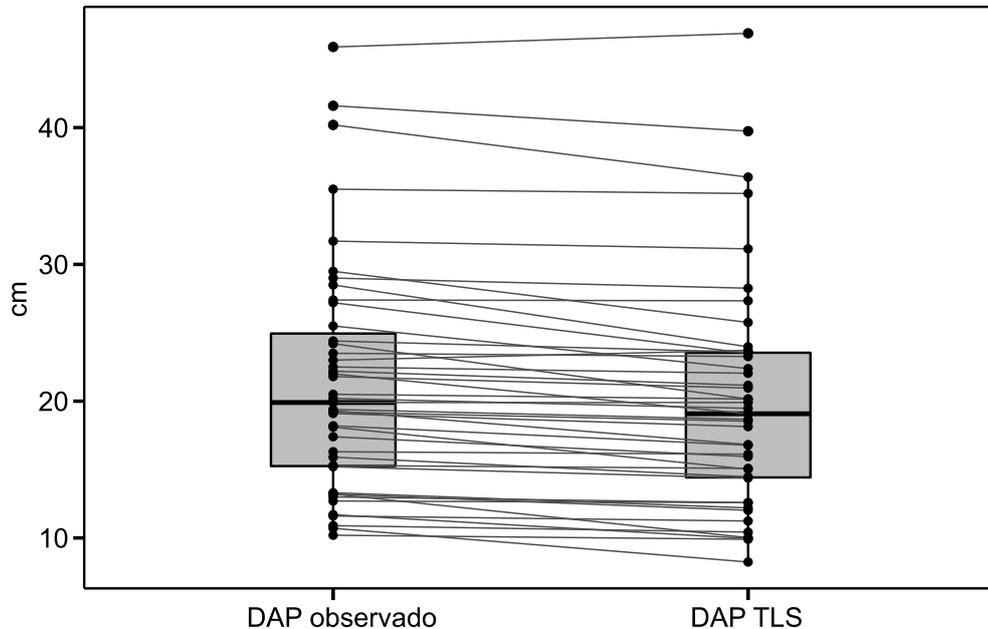
## 7.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.3.1 Comparação entre TLS e medidas de campo

Como resultado do processamento, as árvores foram identificadas e tiveram um ID atribuído automaticamente pelo algoritmo, sendo necessário a comparação visual entre as árvores identificadas pelo algoritmo e os dados de campos. Quando a árvore foi detectada, foi possível obter o raio a cada 10 cm de altura, partindo da base (solo) até o final da copa. Desta

maneira, estimou-se o DAP e o afilamento do fuste. O DAP pode ser comparado em 43 árvores (apêndice A) gerando um RMSE = 1,89 cm, seguido por MAPE = 6,94% e Viés = -6,69% e viés absoluto = -1,32 cm (Figura 8).

Figura 8. Comparação entre o DAP observado (medido em campo) e estimado com TLS.



Fonte: a autora.

A altura do fuste não foi comparada entre o TLS e o campo, pois o algoritmo não foi programado para fazer a distinção em altura comercial. Após a derrubada da árvore, a cubagem rigorosa considerou a altura do fuste até a primeira bifurcação significativa para o início da copa. Portanto, o algoritmo dificilmente coincidiu na estimativa da altura do fuste.

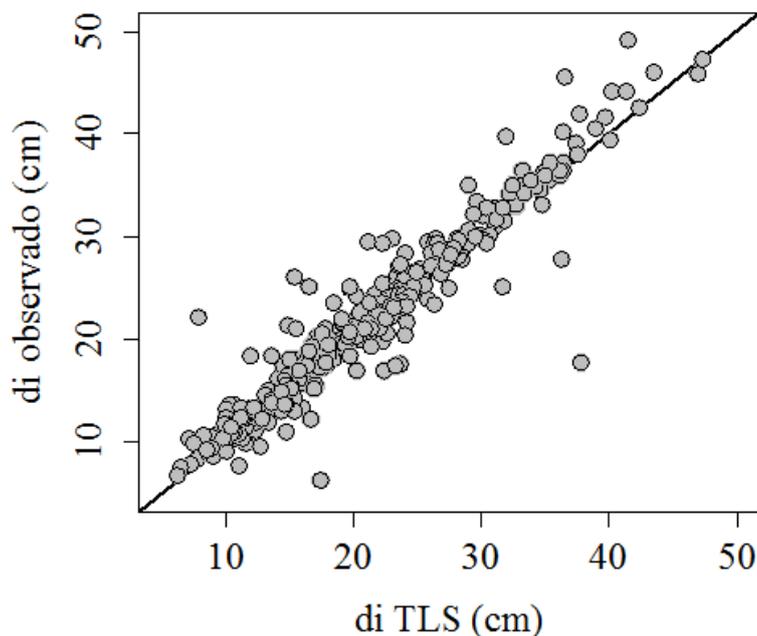
O afilamento do fuste foi verificado em 395 medidas (apêndice B), produzindo um RMSE = 2,58 cm, MAPE = 8,2% e viés = -3,23%. As previsões geradas pelo TLS foram plotadas contra os valores observados em um gráfico 1:1. O gráfico 1:1 revela proximidade dos diâmetros encontrados através do TLS aos dados de campo e nenhuma evidência de heterocedasticidade forte foi constatada (Figura 9).

De acordo com Conto et al., (2017), o método utilizado para identificação e determinação das variáveis escolhidas (eg. DAP) deve gerar resultados com acurácia em uma ampla variedade de espécies e idades de árvores. No entanto, atualmente estão iniciando os trabalhos com Mata Atlântica; pode-se destacar o estudo de Silva que realizou a varredura de uma árvore isolada de *A. angustifolia*, encontrando erros absolutos nas estimativas dos diâmetros de -0,83 cm a 1,44 cm. Sendo assim, o restante dos trabalhos apresentados nessa discussão investigou espécies de florestas temperadas.

O estudo de Liang 2014 com *Pinus* e *Picea* encontrou RMSE variando de 1,48 a 9,17 cm, dependendo do uso dos métodos de determinação do diâmetro. Já o trabalho de Olofsson, Holmgren; Olsson, (2014) que estudaram o afilamento de *Betula* spp. permitiu encontrar valores de RMSE de diâmetro na faixa de 2,4 a 7,5 cm. Kelbe (2015), por sua vez, encontrou para diversas florestas da Inglaterra um RMSE de 6 cm na mensuração do DAP.

Mesmo que o uso do TLS e estudos comparativos estejam ainda em fase de desenvolvimento e não sendo consolidados ainda, vale ressaltar a importância da padronização das métricas de qualidade do processamento, como por exemplo o uso do RMSE que permite uma comparação em diferentes formações florestais. O trabalho realizado por Liang et al. (2016) reúne estudos e resultados com uso do TLS em inventários florestais - sobretudo em regiões temperadas ou boreais. Conforme mencionado anteriormente as aplicações de TLS, nos trópicos estudos ainda são escassos; com a disponibilidade maior da tecnologia TLS, no entanto, a quantidade de estudos deve aumentar em breve.

Figura 9. Gráfico 1:1 dos valores previstos e observados para di = diâmetros ao longo do fuste (afilamento) para todas as medidas pareadas.



Fonte: a autora.

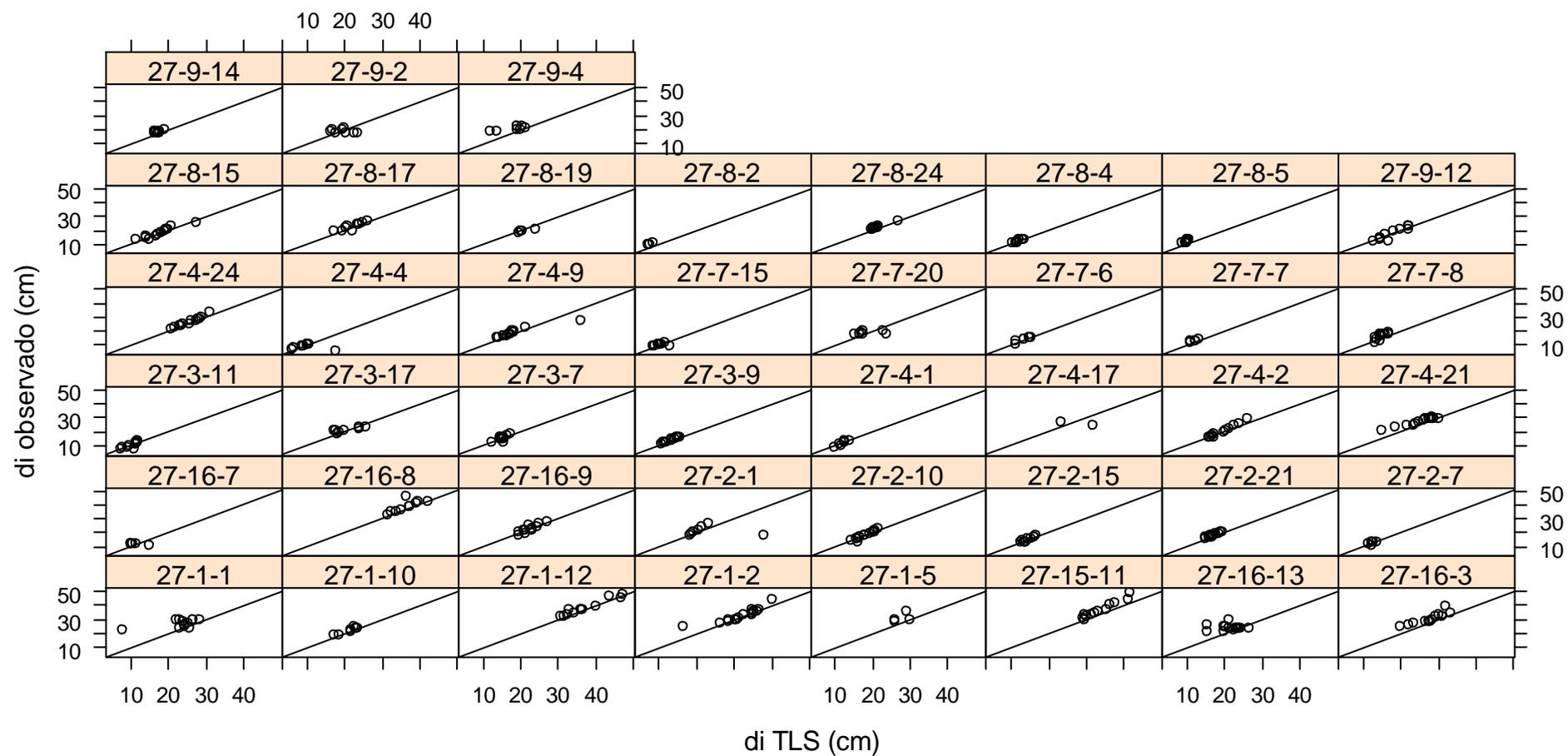
Foi realizada uma plotagem do gráfico 1:1 das medidas pareadas por árvore, com intuito de observar o comportamento estratificado de cada indivíduo (Figura 10). Os fatores principais que interferiram na não mensuração ou distorção das estimativas foram: o excesso de ruído em contato com a base das árvores (lianas, herbáceas, resíduos da limpeza do sub bosque); as árvores bifurcadas, pois o algoritmo ainda não é robusto para árvores com

múltiplos fustes; os fustes inclinados que deformaram-se pela normalização da nuvem; além disso, algumas seções de tronco com reduzida cobertura do *laser* (quando menos da metade da circunferência estava visível e foi submetido a varredura).

Além disso, as estimativas de troncos finos (abaixo de 10 cm de diâmetro) geralmente são menos acurados (CONTO et al., 2017), fato que corrobora a necessidade do corte do sub-bosque anterior as varreduras. Para uso de estimativas de biomassa e carbono deve-se trabalhar com estimativas mais detalhadas, que buscam a modelagem completa das árvores incluindo principalmente galhos, como os estudos de (DASSOT et al., 2012; HACKENBERG et al., 2014; RAUMONEN et al., 2013).

O estudo de uma floresta deve prever a aplicação de parâmetros aplicáveis que devem funcionar em uma ampla variedade de espécies e idades. No entanto, é possível que a escolha do parâmetro tenha que ser tratada distintamente para árvores com arquiteturas distintas. Com o intuito de melhorar a robustez e precisão para condições específicas, devem ser investigadas em separado, por exemplo, as espécies como copas densas ou bifurcações e/ou presença de lianas. Neste estudo, optou-se por estimativas gerais independentemente das espécies de árvores, a fim de investigar o desempenho de procedimentos automatizados.

Figura 10. Gráfico 1:1 dos valores previstos e observados para di = diâmetros ao longo do fuste (afilamento) para todas as medidas pareadas por árvore.



Fonte: a autora.

#### 7.4 CONCLUSÃO

Com base no que foi apresentado neste trabalho pode-se concluir que i) foi possível realizar o escaneamento das árvores da parcela, no entanto, a área apresentava condições adversas, em função da topografia comum em fragmentos da FOD em SC; além disso, o processamento ainda é um fator limitante no aproveitamento de varreduras realizada com TLS em florestas nativas; ii) a extração de variáveis dendrométricas foi realizada dentro das limitações técnicas (capacidade do algoritmo) iii) a comparação do DAP e afilamento obtidos pelo TLS às medidas de campo resultou em RMSE =1,89 a 2,58 cm , MAPE= 6,94 a 8,2% e viés= -3,23% a -6,69%, mostrando o potencial da ferramenta TLS para realização de inventário florestal de forma semi automatizada, apesar das limitações relativas ao ambiente com relevo acidentado e às limitações dos algoritmos de processamento automático para esse tipo de cenário.

## REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ASCHOFF, T.; SPIECKER, H. Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, p. 71–74, 2004.
- BIENERT, A. et al. Application of Terrestrial Laser Scanner for the Determination of Forest Inventory Parameters. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 5, p. 1–10, 2006.
- BIENERT, A. et al. Tree detection and diameter estimations by analysis of forest terrestrial laserscanner point clouds. **Isprs Workshops**, p. 50–55, 2007.
- CABO, C. et al. Automatic dendrometry: Tree detection, tree height and diameter estimation using terrestrial laser scanning. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 69, p. 164–174, 2018.
- CALDERS, K. et al. Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 6, n. 2, p. 198–208, 2015.
- CONTO, T. DE et al. Performance of stem denoising and stem modelling algorithms on single tree point clouds from terrestrial laser scanning. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 143, n. January, p. 165–176, 2017.
- COSTANZA, R. et al. Changes in the global value of ecosystem services. **Global Environmental Change**, v. 26, n. 1, p. 152–158, 2014.
- CÔTÉ, J.-F.; FOURNIER, R. A.; EGLI, R. An architectural model of trees to estimate forest structural attributes using terrestrial LiDAR. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 6, p. 761–777, 2011.
- DASSOT, M. et al. Terrestrial laser scanning for measuring the solid wood volume, including branches, of adult standing trees in the forest environment. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 89, p. 86–93, 2012.
- DELAGRANGE, S.; JAUVIN, C.; ROCHON, P. PypeTree: A tool for reconstructing tree perennial tissues from point clouds. **Sensors (Switzerland)**, v. 14, n. 3, p. 4271–4289, 2014.
- FANTINI, A. C.; SIMINSKI, A.; GAIO, M. F. Madeira de florestas secundárias em SC : Nova fonte de renda para os agricultores. **Agropecuária Catarinense**, v. 29, n. 2, p. 15–18, 2016.
- HACKENBERG, J. et al. Highly Accurate Tree Models Derived from Terrestrial Laser Scan Data: A Method Description. **Forests**, v. 5, n. 5, p. 1069–1105, 2014.
- HOPKINSON, C. et al. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar.

**Canadian Journal of Forest Research**, v. 34, n. 3, p. 573–583, 2004.

HOPKINSON, C. et al. Integrating terrestrial and airborne lidar to calibrate a 3D canopy model of effective leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 136, p. 301–314, 2013.

HOSOI, F.; OMASA, K. Voxel-Based 3-D Modeling of Individual Trees for Estimating Leaf Area Density Using High-Resolution Portable Scanning Lidar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 12, p. 3610–3618, 2006.

HUANG, P.; PRETZSCH, H. Using terrestrial laser scanner for estimating leaf areas of individual trees in a conifer forest. **Trees**, v. 24, n. 4, p. 609–619, 2010.

HUDAK, A. T.; EVANS, J. S.; STUART SMITH, A. M. LiDAR Utility for Natural Resource Managers. **Remote Sensing**, v. 1, n. 4, p. 934–951, 2009.

IBGE. Mapa da Área de Aplicação da Lei no 11.428 de 2006. 2008.

ISENBURG, M. LASTools: software for rapid LiDAR processing. Disponível em: <<https://rapidlasso.com/lastools/>>. Acesso em: 20 de out. de 2017.

JUPP, D. L. B. et al. Estimating forest LAI profiles and structural parameters using a ground-based laser called 'Echidna(R). **Tree Physiology**, v. 29, n. 2, p. 171–181, 2008.

KELBE, D. et al. Single-Scan Stem Reconstruction Using Low-Resolution Terrestrial Laser Scanner Data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**. v 8, n .7, p.3414 – 3427; 2015.

KLEIN, R. M. Mapa fitogeográfico do Estado de Santa Catarina. In: REITZ, R. (Ed.). **Flora Ilustrada Catarinense**. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues, p. 1–24, 1978.

MOSER, P., OLIVEIRA, L. Z. 2017. **Regressão linear aplicada à dendrometria: uma introdução e iniciação ao R**, Blumenau. 152p, 2017.

LEFSKY, M.; MCHALE, M. Volume estimates of trees with complex architecture from terrestrial laser scanning. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 2, n. 1, p. 2–19, 2008.

LIANG, X. et al. Terrestrial laser scanning in forest inventories. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 115, p. 63–77, 2016.

LIANG, X. et al. International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 144, n. June, p. 137–179, 2018.

LIANG, X.; HYYPPÄ, J. Automatic Stem Mapping by Merging Several Terrestrial Laser Scans at the Feature and Decision Levels. **Sensors**, v. 13, n. 2, p. 1614–1634, 2013.

MAAS, H. -G. et al. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 5, p. 1579–1593, 2008.

MURPHY, G. E.; ACUNA, M. A.; DUMBRELL, I. Tree value and log product yield determination in radiata pine ( *Pinus radiata* ) plantations in Australia: comparisons of terrestrial laser scanning with a forest inventory system and manual measurements. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 40, n. 11, p. 2223–2233, 2010.

OLIVEIRA-FILHO, A. T. Um Sistema de Classificação Fisionômico-Ecológico da Vegetação Neotropical : segunda aproximação Introdução. **Fitossociologia No Brasil - Volume 2**, p. 452–474, 2015.

PFEIFER, N.; GORTE, B.; WINTERHALDER, D. Automatic Reconstruction of Single Trees From Terrestrial Laser Scanner Data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 35, n. 2001, p. 1–6, 2004.

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

PRÖBSTL-HAIDER, U. Cultural ecosystem services and their effects on human health and well-being – A cross-disciplinary methodological review. **Journal of Outdoor Recreation and Tourism**, v. 10, p. 1–13, 2015.

RAUMONEN, P. et al. Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. **Remote Sensing**, v. 5, n. 2, p. 491–520, 2013.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2013. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 10 abr 2018.

RIBEIRO, M. C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, 2009.

SAARINEN, N. et al. Feasibility of Terrestrial laser scanning for collecting stem volume information from single trees. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 123, p. 140–158, 2017.

SCHILLING, A.; SCHMIDT, A.; MAAS, H.-G. Tree Topology Representation from TLS Point Clouds Using Depth-First Search in Voxel Space. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 78, n. 4, p. 383–392, 2012.

SCHORN, L. A.; GALVÃO, F. Dinâmica da Regeneração Natural em Três Estágios Sucessionais de uma Floresta Ombrófila Densa em Blumenau, SC. **Floresta**, v. 36, n. 1, p. 59–74, 2006.

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

SILVA, D. A., KLITZKE, A. R., ULLER, H. F. Alterações na estrutura fitossociológica do estrato arbóreo causadas pelo corte seletivo em uma área de manejo florestal em Santa Catarina. In: SCHNEIDER et al., **6º simpósio latino-americano sobre manejo florestal**.

Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria. p. 77–83, 2015.

SILVA, M. N. et al. Laser Scanner Terrestre Para Medições Florestais - Princípios E Aplicações. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65/6, p. 1143–1152, 2013.

SIMONSE, M. et al. Automatic Determination of Forest Inventory Parameters Using Terrestrial Laserscanning. **Institute for Forest Growth**, p. 1–7, 2003.

STEINBACH, A. J., TOMASELLI, C. C., REFOSCO, J. C. **Atlas da bacia hidrográfica do rio Itapocu**. AMVALI. Jaraguá do Sul. p. 147. 2015.

STRAHLER, A. H. et al. Retrieval of forest structural parameters using a ground-based lidar instrument (Echidna ® ). **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. sup2, p. S426–S440, 2008.

TEIXEIRA, P. H.; FONSECA, L. G. Algoritmo para a reconstrução de árvores individuais a partir de dados de varredura tridimensional a laser. **XI Simpósio de Mecânica Computacional**, p. 28–30, 2014.

VIBRANS, A. C. et al. **Floresta Ombrófila Densa**. Blumenau: Edifurb, 2013a.

VIBRANS, A. C. et al. Using satellite image-based maps and ground inventory data to estimate the area of the remaining Atlantic forest in the Brazilian state of Santa Catarina. **Remote Sensing of Environment**, v. 130, p. 87–95, 2013b.

ZHENG, G.; MOSKAL, L. M.; KIM, S.-H. Retrieval of Effective Leaf Area Index in Heterogeneous Forests With Terrestrial Laser Scanning. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 51, n. 2, p. 777–786, 2013.

## 8 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES GERAIS

As conclusões do artigo 1 que versa sobre o estudo de modelos volumétricos podem ser organizadas da seguinte forma: (i) a qualidade geral dos modelos volumétricos propostos foi satisfatória e, portanto, esses modelos podem ser considerados ferramentas de estimativa de volume adaptadas e úteis no manejo florestal na FOD do Sul do Brasil; (ii) modelos específicos mostraram métricas de qualidade de ajuste apenas ligeiramente superiores aos dos modelos genéricos; (iii) modelos com DAP como única variável preditora são uma solução aceitável, devido às dificuldades operacionais da medição de H em florestas densas subtropicais.

No trabalho do artigo 2, relacionado a modelos de afilamento conclui-se que: (i) a qualidade geral dos modelos foi satisfatória e, portanto, os modelos apresentados podem ser considerados ferramentas de estimativas de afilamento e, conseqüentemente, de sortimento úteis no manejo florestal na FOD em SC; (ii) apenas para a espécie *H. alchorneoides* modelos específicos mostraram-se ligeiramente superiores aos genéricos; (iii) a quantificação da incerteza na estimação de parâmetros de regressão revela informações críticas para seleção e validação de modelos.

No artigo 3, pode-se concluir que i) foi possível realizar o escaneamento das árvores da parcela, no entanto, a área apresentava condições adversas (declividade acentuada); além disso, o processamento ainda é um fator limitante no aproveitamento de varreduras realizadas com TLS em florestas nativas; ii) a extração de variáveis dendrométricas foi realizada dentro das limitações técnicas (capacidade do algoritmo); iii) a comparação do DAP e afilamento obtidos pelo TLS às medidas de campo mostrou o potencial da ferramenta TLS para realização de inventário florestal de forma semi automatizada, apesar das limitações relativas ao ambiente diverso e às limitações dos algoritmos de processamento automático para esse tipo de cenário.

Resumindo pode-se afirmar que este trabalho atingiu os objetivos de contribuir para modelagem de volume da madeira e modelagem de afilamento das espécies ocorrentes na referida área, utilizando o método destrutivo e novas tecnologias na obtenção de variáveis dendrométricas como o TLS. Novos estudos e aplicação de novas tecnologias para obtenção das variáveis dendrométricas devem ser encorajadas para superar desafios como: lidar com formas complexas (bifurcações) das árvores presentes na FOD, assim como, a deformação dos troncos ocorrido pela normalização do terreno.

## REFERÊNCIAS DA DISSERTAÇÃO

- ANDERSON-SPRECHER, R. Model comparisons and  $R^2$ . **The American Statistician**, v. 48, n. 2, p.113–117, 1994.
- ÅKERBLOM, M. et al. Automatic tree species recognition with quantitative structure models. **Remote Sensing of Environment**, v. 191, p. 1–12, 2016.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDRADE, V. C. L. DE. Novos modelos de taper do tipo expoente-forma para descrever o perfil do fuste de árvores. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 80, p. 271–283, 2014.
- ANDRADE, V. C. L. DE; SCHMITT, T. Modelos de taper empregados em florestas brasileiras nativas e em plantações florestais sem eucalipto e pinus. **Advances in Forestry Science**, v. 4, n. 1, p. 89–92, 2017.
- ANDRAE, F. H.; SCHNEIDER, P. R.; DURLO, M. A. Importância do Manejo de Florestas Nativas para a Renda da Propriedade e Abastecimento do Mercado Madeireiro. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 1293–1302, 2018.
- ANDREACCI, F.; MARENZI, R. C. Avaliação da aplicação da Resolução CONAMA 04/94 na deinição dos estágios sucessionais de fragmentos florestais da Floresta Ombrófila Densa de Santa Catarina. **Biotemas**, v. 30, n. 4, p. 117–128, 2017.
- ASCHOFF, T.; SPIECKER, H. Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, p. 71–74, 2004.
- BANIN, L. et al. What controls tropical forest architecture? Testing environmental, structural and floristic drivers. **Global Ecology and Biogeography**, v. 21, n. 12, p. 1179–1190, 2012.
- BARRETO, W. F. et al. Equação de volume para apoio ao manejo comunitário de empreendimento florestal em Anapu, Pará. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 80, p. 321–330, 2014.
- BÉLAND, M. et al. Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 9, p. 1252–1266, 2011.
- BIENERT, A. et al. Application of Terrestrial Laser Scanner for the Determination of Forest Inventory Parameters. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 5, p. 1–10, 2006.
- BIENERT, A. et al. Tree detection and diameter estimations by analysis of forest terrestrial laserscanner point clouds. **Isprs Workshops**, p. 50–55, 2007.
- BONAN, G. B. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. **Science**, v. 320, n. 5882, p. 1444–1449, 2008.
- BORSOI, G. A. **Subsídios para o manejo de uma floresta ombrófila mista em estágio**

**avançado de regeneração natural.** Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

BRANCALION, P. H. S. et al. Cultural Ecosystem Services and Popular Perceptions of the Benefits of an Ecological Restoration Project in the Brazilian Atlantic Forest. **Restoration Ecology**, v. 22, n. 1, p. 65–71, 2014.

BRAND, M. A. et al. Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal produzido a partir da espécie *Miconia cinnamomifolia* (De Candolle) Naudin (Jacatirão-açu) na agricultura familiar, em Biguaçu, Santa Catarina. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 99, p. 401–410, 2013.

BRANDEIS, T. J.; KUEGLER, O.; KNOWE, S. A. Equations for merchantable volume for subtropical moist and wet forests of Puerto Rico. **Southern Research Station**, p. 15, 2005.

BUFTON, J. et al. Shuttle laser altimeter (SLA). **NASA Goddard Space Flight Center; Greenbelt, MD, United States**, p. 83–90, 1995.

CABO, C. et al. Automatic dendrometry: Tree detection, tree height and diameter estimation using terrestrial laser scanning. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 69, n. January, p. 164–174, 2018.

CALDERS, K. et al. Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 6, n. 2, p. 198–208, 2015.

CHAVE, J. et al. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, v. 145, n. 1, p. 87–99, 2005.

CHAVE, J. et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. v. 20, n. 10, p. 3177–3190, 2014.

CHICHORRO, J. F.; RESENDE, J. L. P.; LEITE, H. G. Equações de volume e de taper para quantificar multiprodutos da madeira em Floresta Atlântica. **Revista Árvore**, v. 27, n. 6, p. 799–809, 2003.

CONCEIÇÃO, M. B. DA. **Comparação de métodos de estimativa de volume em diferentes idades em plantações de *Eucalyptus grandis* Hill ex - Maiden.** Universidade Federal do Paraná, 2004.

CONTO, T. DE et al. Performance of stem denoising and stem modelling algorithms on single tree point clouds from terrestrial laser scanning. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 143, p. 165–176, 2017.

CORADIN, L.; SIMINSKI, A.; REIS, A. **Espécies nativas da região sul do Brasil.** Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2011.

CORREIA, J.; FANTINI, A.; PIAZZA, G. Equações Volumétricas e Fator de Forma e de Casca para Florestas Secundárias do Litoral de Santa Catarina. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.

COSTANZA, R. et al. Changes in the global value of ecosystem services. **Global Environmental Change**, v. 26, n. 1, p. 152–158, 2014.

- CÔTÉ, J.-F.; FOURNIER, R. A.; EGLI, R. An architectural model of trees to estimate forest structural attributes using terrestrial LiDAR. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 6, p. 761–777, 2011.
- DASSOT, M. et al. Terrestrial laser scanning for measuring the solid wood volume, including branches, of adult standing trees in the forest environment. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 89, p. 86–93, 2012.
- DE-MIGUEL, S. et al. Evaluating marginal and conditional predictions of taper models in the absence of calibration data. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 42, n. 7, p. 1383–1394, 2012.
- DELAGRANGE, S.; JAUVIN, C.; ROCHON, P. PypeTree: A tool for reconstructing tree perennial tissues from point clouds. **Sensors (Switzerland)**, v. 14, n. 3, p. 4271–4289, 2014.
- DIEGUES, A. C. S. **O mito moderno da natureza intocada**. 3ª edição ed. São Paulo: Editora Hucitec, 2000.
- DURLO, M. A.; DENARDI, L. Morfometria de *Cabralea canjerana*, em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, v. 8, n. 1, p. 55, 1998.
- FANG, Z.; BAILEY, R. L. Compatible volume and taper models with coefficients for tropical species on Hainan Island in southern China. **Forest Science**, v. 45, n. 1, p. 85–100, 1999.
- FANTINI, A. C.; SIMINSKI, A.; GAIO, M. F. Madeira de florestas secundárias em SC : Nova fonte de renda para os agricultores. **Agropecuária Catarinense**, v. 29, n. 2, p. 15–18, 2016.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Global Forest Resources Assessment 2015** How are the world's forests changing? Roma, 2015.
- FAVALESSA, C. M. C. et al. Funções de afilamento não segmentadas e segmentadas para *Tectona grandis* na região centro-sul matogrossense. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 72, p. 373–387, 2012.
- FELDPAUSCH, T. R. et al. Height-diameter allometry of tropical forest trees. **Biogeosciences**, v. 8, n. 5, p. 1081–1106, 2011.
- FIGUEIREDO FILHO, A. et al. Efeito da Idade no Afilamento e Sortimento em Povoamentos de *Araucaria angustifolia*. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 1, p. 50–59, 2015.
- FIGUEIREDO FILHO, A.; MACHADO, S. A.; CARNEIRO, M. R. A. Testing accuracy of log volume calculation procedures against water displacement techniques (xylometer). **Canadian Journal of Forest Research**, v. 30, p. 990–997, 2000.
- FINGER, C. A. G. **Fundamentos da biometria florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, p. 269, 1992.
- FLOOD, M. Lidar activities and research priorities in the commercial sector. In:

- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (Ed.). . **International Journal of Remote Sensing**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. v. XXXIV p. 1–30, 2001.
- FRANKLIN, S. L.; PINDYCK, R. S. Tropical Forests, Tipping Points, and the Social Cost of Deforestation. **Ecological Economics**, v. 153, n. May 2017, p. 161–171, 2018.
- FRIEDL, R. A. **Dinâmica e Prognose da Forma dos Fustes em Povoamentos Plantados de Araucaria angustifolia (Bert.) O. Ktze**. Universidade Federal do Paraná, 1989.
- GARDNER, T. A. et al. Prospects for tropical forest biodiversity in a human-modified world. **Ecology Letters**, v. 12, n. 6, p. 561–582, 2009.
- GFOI. **Integrating remote-sensing and ground-based observations for estimation of emissions and removals of greenhouse gases in forests: Methods and Guidance from the Global Forest Observations Initiative**. Rome, 2016.
- GIMENEZ, B. O. et al. Equações volumétricas para espécies comerciais madeiras do sul do estado de Roraima. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 43, n. 106, p. 291–301, 2015.
- GIONGO, M. et al. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 231–244, 2010.
- GIONGO, M. et al. Estimativa da altura da base das copas com o uso de dados laser scanning aerotransportado (LiDAR). **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v.3, p. 48–57, 2012.
- GOFC-GOLD. **Sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation**. 2016.
- GROSS, M. The rise and fall of global forests. **Current Biology**, v. 28, n. 6, p. R245–R248, 2018.
- HACKENBERG, J. et al. Highly Accurate Tree Models Derived from Terrestrial Laser Scan Data: A Method Description. **Forests**, v. 5, n. 5, p. 1069–1105, 2014.
- HENRY, M. et al. Recommendations for the use of tree models to estimate national forest biomass and assess their uncertainty. **Annals of Forest Science**, v. 72, n. 6, p. 769–777, 2015.
- HOPKINSON, C. et al. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 34, n. 3, p. 573–583, 2004.
- HOPKINSON, C. et al. Integrating terrestrial and airborne lidar to calibrate a 3D canopy model of effective leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 136, p. 301–314, 2013.
- HOSOI, F.; OMASA, K. Voxel-Based 3-D Modeling of Individual Trees for Estimating Leaf Area Density Using High-Resolution Portable Scanning Lidar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 12, p. 3610–3618, 2006.

HOUGHTON, R. A. Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance. **Global Change Biology**, v. 11, n. 6, p. 945–958, 2005.

HUANG, P.; PRETZSCH, H. Using terrestrial laser scanner for estimating leaf areas of individual trees in a conifer forest. **Trees**, v. 24, n. 4, p. 609–619, 2010.

HUDAK, A. T.; EVANS, J. S.; STUART SMITH, A. M. LiDAR Utility for Natural Resource Managers. **Remote Sensing**, v. 1, n. 4, p. 934–951, 2009.

IBGE. Mapa da Área de Aplicação da Lei no 11.428 de 2006. 2008.

ISENBURG, M. LAStools: software for rapid LiDAR processing. Disponível em: <<https://rapidlasso.com/lastools/>>. Acesso em: 20 de out. de 2017.

JARA, M. C. et al. Guidelines for documenting and reporting tree allometric equations. **Annals of Forest Science**, v. 72, n. 6, p. 763–768, 2015.

JORGE, L. A. B. Equações de volume comercial com casca em floresta tropical pluvial no norte do Espírito Santo. **Anais do Congresso Brasileiro sobre Essências Nativas**. São Paulo, v.16, n.1, p. 456-467, 1982.

JUPP, D. L. B. et al. Estimating forest LAI profiles and structural parameters using a ground-based laser called 'Echidna(R). **Tree Physiology**, v. 29, n. 2, p. 171–181, 2008.

KLEIN, R. M. Mapa fitogeográfico do Estado de Santa Catarina. In: REITZ, R. (Ed.). . **Flora Ilustrada Catarinense**. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues, p. 1–24, 1978.

LANSSANOVA, L. R. et al. Avaliação de Funções de Afilamento para a Estimativa de Diâmetro de Espécies Florestais Comerciais do Bioma Amazônico Mato-Grossense. **FLORESTA**, v. 43, n. 2, p. 215, 2013.

LEFSKY, M.; MCHALE, M. Volume estimates of trees with complex architecture from terrestrial laser scanning. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 2, n. 1, p. 2–19, 2008.

LEITE, H. G. et al. Função de afilamento para *Virola surinamensis* (Roll.) Warb. **Revista Árvore**, v. 30, n. 1, p. 99–106, 2006.

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. DE. Importância das Variáveis Altura Dominante e Altura Total em Equações Hipsométricas e Volumétricas. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 301–310, 2003.

LIANG, X. et al. Terrestrial laser scanning in forest inventories. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 115, p. 63–77, 2016.

LIANG, X. et al. International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 144, n. June, p. 137–179, 2018.

LIANG, X.; HYYPPÄ, J. Automatic Stem Mapping by Merging Several Terrestrial Laser

Scans at the Feature and Decision Levels. **Sensors**, v. 13, n. 2, p. 1614–1634, 2013.

LINGNAU, C. et al. Determinação de diâmetros em diferentes alturas de árvores individuais a partir de dados laser terrestre. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 5031–5038, 2009.

MAAS, H. -G. et al. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 5, p. 1579–1593, 2008.

MACHADO, S. DO A. et al. Comparação de métodos de cubagem absolutos com o volume obtido pelo xilômetro para Bracatinga (*Mimosa scabrella* Bentham). **Cerne**, v. 12, n. 3, p. 239–253, 2006.

MACHADO, S. DO A. et al. Modelagem volumétrica para bracatinga (*Mimosa scabrella*) em povoamentos da Região Metropolitana de Curitiba. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 56, p. 17–29, 2008.

MONICO, J. F. G. et al. Acurácia e precisão: Revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodesicas**, v. 15, n. 3, p. 469–483, 2009.

MOSER, P., OLIVEIRA, L. Z. 2017. **Regressão linear aplicada à dendrometria: uma introdução e iniciação ao R**, Blumenau. 152p, 2017.

MULLER, I.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. Forma de Tronco e Sortimento de Madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, na Região Sudeste do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 3, p. 293–305, 2005.

MURPHY, G. E.; ACUNA, M. A.; DUMBRELL, I. Tree value and log product yield determination in radiata pine (*Pinus radiata*) plantations in Australia: comparisons of terrestrial laser scanning with a forest inventory system and manual measurements. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 40, n. 11, p. 2223–2233, 2010.

MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853–858, 2000.

NETER, J. et al. **Applied linear statistical models**. Boston: McGraw-Hill Inc, 1996.

NICOLETTI, M. F. et al. Descrição do Perfil do Fuste de Árvores por meio das Funções de afilamento. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 15, n. 4, p. 365–372, 2016.

NUNES, M. H. **Stem profile modeling in Cerrado and tropical forests formations in Brazil**. Universidade de São Paulo, 2013.

NUNES, M. H.; GÖRGENS, E. B. Artificial Intelligence Procedures for Tree Taper Estimation within a Complex Vegetation Mosaic in Brazil. **PLOS ONE**, v. 11, n. 5, p. 1-16, 2016.

OJEA, E.; MARTIN-ORTEGA, J. Understanding the economic value of water ecosystem services from tropical forests: A systematic review for South and Central America. **Journal of Forest Economics**, v. 21, n. 2, p. 97–106, 2015.

OLIVEIRA-FILHO, A. T. Um Sistema de Classificação Fisionômico-Ecológico da Vegetação Neotropical : segunda aproximação Introdução. **Fitossociologia No Brasil - Volume 2**, p. 452–474, 2015.

OLLER, D. C. **Ecologia e Manejo de Floresta Secundárias Dominadas por Tibouchina pulchra Cogn.** Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

OLOFSSON, K.; HOLMGREN, J.; OLSSON, H. Tree Stem and Height Measurements using Terrestrial Laser Scanning and the RANSAC Algorithm. **Remote Sensing**, v. 6, n. 5, p. 4323–4344, 2014.

PADILHA, A. S. **Emprego de dados Laser Scanner Terrestre e de sensores embarcados em veículos aéreos não tripulados para a extração de variáveis dendrométricas.** Universidade do Estado de Santa Catarina, 2017.

PAREJA, T. F.; PABLOS, A. G.; OLIVA, J. DE V. Y. Terrestrial Laser Scanner (TLS) Equipment Calibration. **Procedia Engineering**, v. 63, p. 278–286, 2013.

PEREIRA, A. R. Modelagem Volumétrica para Eucalyptus urograndis no Município de Porto Grande, Amapá, Brasil. **Biota Amazônia**, v. 6, n. 4, p. 10–14, 2016.

PFEIFER, N.; GORTE, B.; WINTERHALDER, D. Automatic Reconstruction of Single Trees From Terrestrial Laser Scanner Data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 35, n. 2001, p. 1–6, 2004.

PIAZZA, G. E.; ZAMBI. Regeneração de espécies madeireiras na floresta secundária da Mata Atlântica. **Advances in Forestry Science**, v. 4, n. 2, p. 99–105, 2017.

PICARD, N. et al. Should tree biomass allometry be restricted to power models? **Forest Ecology and Management**, v. 353, p. 156–163, 2015.

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

PINDYCK, R. S. Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us? **Journal of Economic Literature**, v. 51, n. 3, p. 860–872, 2013.

PINDYCK, R. S. The Social Cost of Carbon Revisited. **NBER Working Paper Series**, p. 45, 2016.

POHJOLA, J. et al. Immediate and long-run impacts of a forest carbon policy—A market-level assessment with heterogeneous forest owners. **Journal of Forest Economics**, v. 32, n. December 2017, p. 94–105, 2018.

PRÖBSTL-HAIDER, U. Cultural ecosystem services and their effects on human health and well-being – A cross-disciplinary methodological review. **Journal of Outdoor Recreation and Tourism**, v. 10, p. 1–13, 2015.

QIN, Y. et al. Annual dynamics of forest areas in South America during 2007–2010 at 50-m

spatial resolution. **Remote Sensing of Environment**, v. 201, n. September, p. 73–87, 2017.

QUEIROZ, D. et al. Identidade de modelos em funções de afilamento para *Mimosa scabrella* Bentham em povoamentos nativos da região metropolitana de Curitiba/PR. **Floresta**, v. 38, n. 2, p. 339–349, 2008.

RAUMONEN, P. et al. Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. **Remote Sensing**, v. 5, n. 2, p. 491–520, 2013.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2013. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 15 abr. 2018.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2013. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2013. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

REDFORD, K. H.; RICHTER, B. D. Conservation of Biodiversity in a World of Use Conservation of Biodiversity in a World of Use. **Conservation Biology**, v. 13, n. 6, p. 1246–1256, 1999.

REIS, M. S. et al. Domesticated Landscapes in Araucaria Forests, Southern Brazil: A Multispecies Local Conservation-by-Use System. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 6, n. February, p. 1–14, 2018.

RIBEIRO, A. et al. Estratégias e metodologias de ajuste de modelos hipsométricos em plantios de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, v. 16, n. 1, p. 22–31, 2010.

RIBEIRO, M. B. N. et al. Anthropogenic Landscape in Southeastern Amazonia: Contemporary Impacts of Low-Intensity Harvesting and Dispersal of Brazil Nuts by the Kayapó Indigenous People. **PLoS ONE**, v. 9, n. 7, p. e102187, 2014.

RIBEIRO, M. C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, 2009.

ROBERTS, P. et al. The deep human prehistory of global tropical forests and its relevance for modern conservation. **Nature Plants**, v. 3, n. 8, p. 17093, 2017.

ROJO, A. et al. Stem taper functions for maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Galicia (Northwestern Spain). **European Journal of Forest Research**, v. 124, n. 3, p. 177–186, 2005.

ROLIM, S. G. **Silvicultura e Tecnologia de Espécies da Mata Atlântica**. Belo Horizonte: Editora Rona, 2018.

- SAARINEN, N. et al. Feasibility of Terrestrial laser scanning for collecting stem volume information from single trees. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 123, p. 140–158, 2017.
- SANTOS, A. T. DOS et al. Equação de volume e relação hipsométrica para plantio de *Ocotea porosa*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 69, p. 13–21, 2012.
- SANTOS, K. DOS et al. Equações Volumétricas por Classe Diamétrica para Algumas Espécies Folhosas da Floresta Ombrófila Mista no Paraná, Brasil. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 8, n. 1, p. 99–112, 2006.
- SCARANO, F. R.; CEOTTO, P. Brazilian Atlantic forest: impact, vulnerability and adaptation to climate change. **Biodiversity and Conservation**, v. 24, n. 9, p. 2319–2331, 2015.
- SCHILLING, A.; SCHMIDT, A.; MAAS, H.-G. Tree Topology Representation from TLS Point Clouds Using Depth-First Search in Voxel Space. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 78, n. 4, p. 383–392, 2012.
- SCHORN, L. A.; GALVÃO, F. Dinâmica da Regeneração Natural em Três Estágios Sucessionais de uma Floresta Ombrófila Densa em Blumenau, SC. **Floresta**, v. 36, n. 1, p. 59–74, 2006.
- SCHUCH, C.; SIMINSKI, A.; FANTINI, A. C. Uso e potencial madeireiro do jacatirão-açu (*Miconia cinnamomifolia*(de Candolle)Naudin) no litoral de Santa Catarina. **Floresta**, v. 38, n. 4, p. 735–741, 2008.
- SCOLFORO, J. R. et al. Equações de volume, peso de matéria seca e carbono para diferentes fisionomias da flora nativa. p. 1–65, 2008.
- SCOLFORO, J. R.; MELLO, J. M. DE; LIMA, C. S. DE A. Obtenção de relações quantitativas para estimativa de volume do fuste em floresta estacional semidecídua montana. **Cerne**, v. 1, p. 123–134, 1994.
- SEGURA, M.; KANNINEN, M. Allometric Models for Tree Volume and Total Aboveground Biomass in a Tropical Humid Forest in Costa Rica<sup>1</sup>. **Biotropica**, v. 37, n. 1, p. 2–8, 2005.
- SILESHI, G. W. A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. **Forest Ecology and Management**, v. 329, p. 237–254, 2014.
- SILVA, E. N. DA; SANTANA, A. C. DE. Modelos de regressão para estimação do volume de árvores comerciais, em florestas de Paragominas. **Revista Ceres**, v. 61, n. 5, p. 631–636, 2014.
- SILVA, D. A., KLITZKE, A. R., ULLER, H. F. Alterações na estrutura fitossociológica do estrato arbóreo causadas pelo corte seletivo em uma área de manejo florestal em Santa Catarina. In: SCHNEIDER et al., **6º simpósio latino-americano sobre manejo florestal**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria. p. 77–83, 2015.
- SILVA, M. N. et al. Laser Scanner Terrestre Para Medições Florestais - Princípios E

Aplicações. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65/6, p. 1143–1152, 2013.

SILVEIRA, P. **Métodos indiretos de estimativa do conteúdo de biomassa e do estoque de carbono em um fragmento de floresta ombrófila densa**. Universidade Federal do Paraná, 2008.

SIMINSKI, A. et al. Secondary Forest Succession in the Mata Atlantica, Brazil: Floristic and Phytosociological Trends. **ISRN Ecology**, v. 2011, p. 1–19, 2011.

SIMINSKI, A.; DOS SANTOS, K. L.; WENDT, J. G. N. Rescuing agroforestry as strategy for agriculture in Southern Brazil. **Journal of Forestry Research**, 2016.

SIMINSKI, A.; FANTINI, A. C. Classificação da Mata Atlântica do Litoral Catarinense em Estádios Sucessionais: Ajustando a Lei ao Ecossistema. **Floresta e Ambiente**, v. 11, n. 2, p. 20–25, 2004.

SIMINSKI, A.; FANTINI, A. C.; REIS, M. S. Classificação da vegetação secundária em estágios de regeneração da Mata Atlântica em Santa Catarina. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 3, p. 369–378, 2013.

SIMONSE, M. et al. Automatic Determination of Forest Inventory Parameters Using Terrestrial Laserscanning. **Institute for Forest Growth**, p. 1–7, 2003.

SOARES, C. P. B. et al. Equações hipsométricas, volumétricas e de taper para onze espécies nativas. **Revista Árvore**, v. 35, n. 5, p. 1039–1053, 2011.

SOUZA, C. A. M. DE et al. Modelos de afilamento para o sortimento do fuste de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, v. 38, n. 9, p. 2506–2511, 2008.

SOUZA, A.; JESUS, R. Equações de volume comercial e fator de forma para espécies da Mata Atlântica ocorrentes na reserva florestal da Companhia Vale do Rio Doce, Linhares, ES. **Revista árvore**, v. 15, n. 3, p. 257-273, 1991.

STEINBACH, A. J., TOMASELLI, C. C., REFOSCO, J. C. **Atlas da bacia hidrográfica do rio Itapocu**. AMVALI. Jaraguá do Sul. p. 147. 2015.

STRAHLER, A. H. et al. Retrieval of forest structural parameters using a ground-based lidar instrument (Echidna ®). **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. sup2, p. S426–S440, 2008.

TEIXEIRA, P. H.; FONSECA, L. G. Algoritmo para a reconstrução de árvores individuais a partir de dados de varredura tridimensional a laser. **XI Simpósio de Mecânica Computacional**, p. 28–30, 2014.

TEMESGEN, H. et al. A review of the challenges and opportunities in estimating above ground forest biomass using tree-level models. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 30, n. 4, p. 1–10, 2015.

THIERSCH, C. R. et al. Acurácia dos Métodos para Estimativa do Volume Comercial de Clones de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, v. 12, n. 2, p. 167–181, 2006.

TRUMBORE, S.; BRANDO, P.; HARTMANN, H. Forest health and global change. **Science**, v. 349, n. 6250, p. 814–818, 2015.

TUBIELLO, F. N. et al. The Contribution of Agriculture, Forestry and other Land Use activities to Global Warming, 1990-2012. **Global Change Biology**, v. 21, n. 7, p. 2655–2660, 2015.

VIBRANS, A. C. et al. **Floresta Ombrófila Densa**. Blumenau: Edifurb, 2013a.

VIBRANS, A. C. et al. Using satellite image-based maps and ground inventory data to estimate the area of the remaining Atlantic forest in the Brazilian state of Santa Catarina. **Remote Sensing of Environment**, v. 130, p. 87–95, 2013b.

VIBRANS, A. C. et al. Generic and specific stem volume models for three subtropical forest types in southern Brazil. **Annals of Forest Science**, v. 72, n. 6, p. 865–874, 2015.

WAGENMAKERS, E.-J.; FARRELL, S. AIC model selection using Akaike weights. **Psychonomic Bulletin & Review**, v. 11, n. 1, p. 192–196, 2004.

ZHENG, G.; MOSKAL, L. M.; KIM, S.-H. Retrieval of Effective Leaf Area Index in Heterogeneous Forests With Terrestrial Laser Scanning. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 51, n. 2, p. 777–786, 2013.

ZIANIS, D. et al. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. **Silva Fennica Monographs**. v. 4, p.1-63, 2005.

ZUIDEMA, P. A. et al. Tropical forests and global change: filling knowledge gaps. **Trends in plant science**, v. 18, n. 8, p. 413–419, 2013.

**APÊNDICE A - medidas de DAP campo *versus* TLS**

<b>Código árvore</b>	<b>DAP (cm)</b>	
	<b>Observado</b>	<b>TLS</b>
27-1-10	23,50	23,26
27-1-5	29,50	25,76
27-1-2	35,50	35,18
27-1-1	28,50	23,98
27-1-12	45,90	46,90
27-2-7	12,70	12,58
27-2-15	16,30	16,12
27-2-1	19,20	18,54
27-2-21	19,40	18,66
27-2-10	20,50	20,16
27-3-11	11,60	11,24
27-3-9	15,20	14,38
27-3-7	15,90	14,46
27-3-17	23,00	23,72
27-4-4	10,20	9,90
27-4-1	13,00	12,58
27-4-17	27,20	23,50
27-4-9	19,10	18,14
27-4-2	22,20	21,16
27-4-24	27,40	27,34
27-4-21	29,00	28,26
27-8-5	13,20	10,02
27-8-4	13,20	12,02
27-8-19	19,90	19,90
27-8-15	20,20	19,48
27-8-17	24,40	23,58
27-8-2	10,70	8,24
27-8-24	21,80	20,96
27-7-8	17,40	15,94
27-7-7	13,30	12,20
27-7-6	15,30	15,08
27-7-20	18,10	15,02
27-7-15	10,90	10,42
27-9-14	18,20	16,78
27-9-12	22,50	22,04
27-9-2	19,30	16,82
27-9-4	22,00	19,08
27-15-11	40,20	36,38
27-16-7	11,70	9,96
27-16-9	25,50	22,38
27-16-13	24,20	20,16

<b>Código árvore</b>	<b>DAP (cm)</b>	
	<b>Observado</b>	<b>TLS</b>
27-16-3	31,70	31,14
27-16-8	41,60	39,74

**APÊNDICE B - Medidas de afilamento campo *versus* TLS**

Código árvore	Diâmetro (cm)	
	Observado	TLS
27-1-10	24,90	22,38
27-1-10	23,50	23,26
27-1-10	23,50	23,56
27-1-10	22,30	21,82
27-1-10	20,80	21,64
27-1-10	19,20	18,50
27-1-10	18,70	17,20
27-1-5	35,10	29,00
27-1-5	30,10	29,90
27-1-5	29,50	25,76
27-1-5	28,80	26,16
27-1-2	44,20	40,22
27-1-2	37,30	36,44
27-1-2	36,30	34,82
27-1-2	35,50	35,18
27-1-2	35,90	36,14
27-1-2	34,60	34,66
27-1-2	33,00	32,66
27-1-2	33,10	34,76
27-1-2	30,90	31,06
27-1-2	30,20	30,68
27-1-2	29,70	30,14
27-1-2	29,10	28,72
27-1-2	27,80	28,54
27-1-2	27,00	26,28
27-1-2	25,20	16,56
27-1-1	29,90	28,12
27-1-1	29,90	26,42
27-1-1	29,90	23,06
27-1-1	29,30	22,20
27-1-1	28,50	23,98
27-1-1	26,80	25,22
27-1-1	25,90	24,44
27-1-1	24,60	24,26
27-1-1	24,00	25,74
27-1-1	23,50	23,06
27-1-1	22,20	7,84
27-1-12	47,30	47,34
27-1-12	46,00	43,56
27-1-12	45,90	46,90

Código árvore	Diâmetro (cm)	
	Observado	TLS
27-1-12	39,50	40,10
27-1-12	36,40	36,44
27-1-12	36,40	36,14
27-1-12	34,90	34,18
27-1-12	33,10	32,66
27-1-12	36,40	33,14
27-1-12	31,50	31,76
27-1-12	32,50	30,92
27-2-7	13,70	13,46
27-2-7	13,10	12,30
27-2-7	12,70	12,58
27-2-7	11,90	11,38
27-2-7	11,20	12,32
27-2-15	17,60	16,76
27-2-15	16,80	16,06
27-2-15	16,30	16,12
27-2-15	15,50	15,42
27-2-15	15,20	14,50
27-2-15	13,90	13,12
27-2-15	13,50	13,54
27-2-15	13,00	13,86
27-2-15	13,20	13,86
27-2-15	13,20	12,56
27-2-1	26,30	23,36
27-2-1	23,80	21,56
27-2-1	21,60	20,48
27-2-1	20,20	19,06
27-2-1	19,20	18,54
27-2-1	18,00	18,38
27-2-1	17,80	37,84
27-2-21	20,50	19,56
27-2-21	19,90	18,86
27-2-21	19,40	18,66
27-2-21	19,00	17,66
27-2-21	18,00	16,40
27-2-21	17,60	16,62
27-2-21	17,30	16,86
27-2-21	17,80	17,02
27-2-21	16,50	15,76
27-2-21	16,80	16,46
27-2-21	15,90	15,14
27-2-21	16,40	14,84
27-2-21	16,40	16,62

Código árvore	Diâmetro (cm)	
	Observado	TLS
27-2-10	22,70	21,46
27-2-10	21,20	20,50
27-2-10	20,50	20,16
27-2-10	20,70	20,50
27-2-10	20,20	20,52
27-2-10	19,00	19,22
27-2-10	18,30	18,02
27-2-10	18,10	17,70
27-2-10	16,90	16,36
27-2-10	16,70	16,66
27-2-10	15,70	16,18
27-2-10	16,00	15,46
27-2-10	14,50	14,26
27-2-10	13,40	16,02
27-3-11	13,30	11,94
27-3-11	12,10	11,62
27-3-11	11,90	11,52
27-3-11	11,60	11,24
27-3-11	11,00	11,16
27-3-11	9,90	9,60
27-3-11	8,90	9,24
27-3-11	8,30	7,76
27-3-11	7,80	7,20
27-3-11	7,70	11,06
27-3-9	16,50	15,26
27-3-9	16,10	15,70
27-3-9	15,70	14,92
27-3-9	15,20	14,38
27-3-9	14,30	13,32
27-3-9	13,50	13,36
27-3-9	12,90	12,24
27-3-9	12,10	11,62
27-3-9	10,90	10,64
27-3-9	11,80	11,26
27-3-7	19,00	17,42
27-3-7	17,40	16,48
27-3-7	16,50	15,34
27-3-7	15,90	14,46
27-3-7	15,50	14,52
27-3-7	14,90	14,56
27-3-7	15,00	15,10
27-3-7	14,30	15,40
27-3-7	13,00	15,34

Código árvore	Diâmetro (cm)	
	Observado	TLS
27-3-7	12,00	12,30
27-3-17	23,90	25,88
27-3-17	23,00	23,72
27-3-17	21,60	24,14
27-3-17	20,80	19,88
27-3-17	19,60	18,54
27-3-17	20,30	17,18
27-3-17	19,00	17,98
27-3-17	21,00	17,84
27-4-4	10,70	10,46
27-4-4	10,20	10,40
27-4-4	10,20	9,90
27-4-4	10,10	10,10
27-4-4	9,10	8,70
27-4-4	9,00	8,58
27-4-4	8,70	9,02
27-4-4	7,60	6,50
27-4-4	6,80	6,28
27-4-4	6,70	6,26
27-4-4	6,20	17,48
27-4-1	14,10	13,78
27-4-1	13,50	12,66
27-4-1	13,00	12,58
27-4-1	13,00	12,52
27-4-1	10,70	11,00
27-4-1	9,90	11,60
27-4-1	9,10	10,06
27-4-17	27,20	23,50
27-4-17	25,10	31,72
27-4-9	27,80	36,20
27-4-9	22,70	21,12
27-4-9	20,30	17,64
27-4-9	19,70	18,04
27-4-9	19,10	18,14
27-4-9	18,20	16,94
27-4-9	17,10	16,60
27-4-9	16,60	15,50
27-4-9	16,30	15,66
27-4-9	15,00	14,12
27-4-9	14,70	13,74
27-4-9	18,10	17,24
27-4-2	29,30	26,28
27-4-2	25,60	23,86

Código árvore	Diâmetro (cm)	
	Observado	TLS
27-4-2	24,00	22,66
27-4-2	22,20	21,16
27-4-2	20,80	20,34
27-4-2	20,10	19,72
27-4-2	18,50	17,34
27-4-2	17,50	16,54
27-4-2	17,10	16,50
27-4-2	16,20	16,12
27-4-2	16,20	15,80
27-4-2	15,60	17,08
27-4-24	32,90	31,02
27-4-24	30,30	28,74
27-4-24	28,50	27,70
27-4-24	28,10	28,24
27-4-24	27,40	27,34
27-4-24	27,00	26,06
27-4-24	25,30	25,62
27-4-24	24,00	23,02
27-4-24	23,40	23,44
27-4-24	23,00	21,76
27-4-24	24,40	23,66
27-4-24	20,80	20,88
27-4-21	29,30	30,38
27-4-21	29,30	26,58
27-4-21	28,80	27,38
27-4-21	29,00	28,26
27-4-21	30,00	28,48
27-4-21	29,40	28,16
27-4-21	29,30	28,96
27-4-21	28,40	26,10
27-4-21	26,50	24,68
27-4-21	25,80	23,96
27-4-21	24,90	23,44
27-4-21	24,30	21,64
27-4-21	23,50	18,42
27-4-21	21,40	14,86
27-8-5	13,70	10,66
27-8-5	13,70	10,24
27-8-5	13,20	10,02
27-8-5	12,40	10,06
27-8-5	11,40	10,10
27-8-5	10,90	9,46
27-8-5	10,50	8,84

Código árvore	Diâmetro (cm)	
	Observado	TLS
27-8-5	10,50	8,86
27-8-4	13,90	13,04
27-8-4	13,10	13,38
27-8-4	13,20	12,02
27-8-4	12,10	11,84
27-8-4	12,10	11,76
27-8-4	11,40	11,54
27-8-4	10,70	10,60
27-8-4	10,40	11,32
27-8-19	20,40	23,98
27-8-19	20,00	20,42
27-8-19	19,90	19,90
27-8-19	18,80	19,48
27-8-15	24,90	27,42
27-8-15	22,80	20,92
27-8-15	21,10	19,78
27-8-15	20,60	19,40
27-8-15	20,20	19,48
27-8-15	19,10	19,16
27-8-15	18,50	18,06
27-8-15	17,60	17,88
27-8-15	16,90	17,10
27-8-15	16,10	14,08
27-8-15	15,20	16,86
27-8-15	14,60	14,00
27-8-15	13,70	14,70
27-8-15	13,30	11,16
27-8-17	27,20	26,12
27-8-17	25,20	24,70
27-8-17	24,80	23,64
27-8-17	24,40	23,58
27-8-17	24,30	23,96
27-8-17	22,80	20,86
27-8-17	22,30	20,36
27-8-17	20,00	19,44
27-8-17	19,80	22,22
27-8-17	19,00	17,12
27-8-2	10,70	8,24
27-8-2	10,30	7,12
27-8-2	9,90	7,56
27-8-24	26,40	26,82
27-8-24	23,00	21,34
27-8-24	22,10	21,60

Código árvore	Diâmetro (cm)	
	Observado	TLS
27-8-24	21,80	20,96
27-8-24	21,40	20,70
27-8-24	21,50	20,30
27-8-24	21,00	19,64
27-8-24	20,50	20,24
27-7-8	19,40	16,74
27-7-8	18,20	16,86
27-7-8	18,10	15,52
27-7-8	17,40	15,94
27-7-8	17,50	14,52
27-7-8	16,50	14,94
27-7-8	16,00	14,60
27-7-8	15,00	13,40
27-7-8	14,00	13,58
27-7-8	13,10	14,36
27-7-8	11,90	13,32
27-7-7	14,60	13,10
27-7-7	13,20	12,40
27-7-7	13,30	12,20
27-7-7	12,40	11,04
27-7-7	12,10	10,98
27-7-6	15,60	15,12
27-7-6	15,50	14,80
27-7-6	15,30	15,08
27-7-6	14,20	13,58
27-7-6	13,80	13,64
27-7-6	12,30	11,48
27-7-6	10,90	11,10
27-7-20	20,50	22,62
27-7-20	20,50	17,60
27-7-20	18,70	17,02
27-7-20	18,20	17,46
27-7-20	18,10	15,02
27-7-20	17,90	16,78
27-7-20	17,60	23,66
27-7-15	12,20	11,36
27-7-15	11,00	10,68
27-7-15	10,80	10,34
27-7-15	10,90	10,42
27-7-15	10,30	9,84
27-7-15	9,40	8,84
27-7-15	9,30	8,56
27-7-15	9,60	12,74

Código árvore	Diâmetro (cm)	
	Observado	TLS
27-9-14	19,70	19,04
27-9-14	19,10	17,52
27-9-14	18,20	16,78
27-9-14	17,20	17,52
27-9-14	17,30	17,30
27-9-14	18,60	16,40
27-9-14	17,50	16,38
27-9-12	23,50	22,28
27-9-12	22,60	22,18
27-9-12	22,50	22,04
27-9-12	20,40	20,04
27-9-12	21,00	22,00
27-9-12	19,50	18,04
27-9-12	16,90	15,74
27-9-12	14,90	14,34
27-9-12	13,70	14,58
27-9-12	12,20	12,82
27-9-12	12,30	16,62
27-9-2	20,70	19,92
27-9-2	19,70	19,50
27-9-2	19,30	16,82
27-9-2	18,80	16,50
27-9-2	17,70	17,76
27-9-2	17,00	22,44
27-9-2	16,90	20,28
27-9-2	17,50	23,28
27-9-4	22,60	20,42
27-9-4	21,70	19,02
27-9-4	22,00	19,08
27-9-4	21,60	21,14
27-9-4	20,30	20,18
27-9-4	19,40	19,28
27-9-4	18,40	13,58
27-9-4	18,40	11,94
27-15-11	49,10	41,46
27-15-11	44,10	41,28
27-15-11	42,00	37,70
27-15-11	40,20	36,38
27-15-11	37,20	35,34
27-15-11	35,10	33,04
27-15-11	34,20	32,16
27-15-11	32,70	31,40
27-15-11	32,10	30,16

Código árvore	Diâmetro (cm)	
	Observado	TLS
27-15-11	30,70	28,94
27-15-11	30,00	29,56
27-15-11	33,50	29,58
27-16-7	12,40	11,16
27-16-7	11,70	10,14
27-16-7	11,70	9,96
27-16-7	11,50	10,44
27-16-7	11,00	14,78
27-16-9	27,40	27,28
27-16-9	26,60	24,94
27-16-9	25,50	22,38
27-16-9	24,20	24,44
27-16-9	23,20	22,94
27-16-9	22,10	22,92
27-16-9	21,10	21,42
27-16-9	21,10	20,90
27-16-9	20,20	19,64
27-16-9	19,30	21,42
27-16-9	18,30	19,72
27-16-13	29,50	21,16
27-16-13	26,10	15,44
27-16-13	25,00	19,72
27-16-13	24,20	20,16
27-16-13	23,50	21,28
27-16-13	23,70	23,76
27-16-13	23,30	23,50
27-16-13	23,40	26,34
27-16-13	23,20	24,20
27-16-13	22,00	22,52
27-16-13	23,10	23,12
27-16-13	20,70	19,68
27-16-13	21,00	15,56
27-16-3	39,80	31,96
27-16-3	34,30	33,36
27-16-3	32,90	30,34
27-16-3	31,70	31,14
27-16-3	32,20	29,38
27-16-3	29,70	28,22
27-16-3	28,90	27,84
27-16-3	28,70	26,68
27-16-3	28,30	27,58
27-16-3	27,30	23,68
27-16-3	25,50	22,24

---

<b>Código árvore</b>	<b>Diâmetro (cm)</b>	
	<b>Observado</b>	<b>TLS</b>
27-16-3	25,10	19,72
27-16-8	45,60	36,48
27-16-8	42,50	42,36
27-16-8	41,60	39,74
27-16-8	40,50	38,90
27-16-8	39,10	37,40
27-16-8	38,00	37,48
27-16-8	36,00	35,00
27-16-8	35,50	33,84
27-16-8	35,00	32,44
27-16-8	32,90	31,62

---

### ANEXO A - Mapa topográfico de locação

