



**GUILHERME RODRIGUES FONSECA**

**UMA NOVA ABORDAGEM PARA OTIMIZAR O DESIGN  
DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS NA  
EUCALIPTOCULTURA NO BRASIL**

**LAVRAS – MG**

**2025**

**GUILHERME RODRIGUES FONSECA**

**UMA NOVA ABORDAGEM PARA OTIMIZAR O DESIGN DE INVENTÁRIOS  
FLORESTAIS NA EUCALIPTOCULTURA NO BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Samuel Jose Silva Soares da Rocha  
Orientador

Dr. Henrique Ferraço Scolforo  
Coorientador

**LAVRAS – MG  
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Fonseca, Guilherme Rodrigues.

Uma nova abordagem para otimizar o design de inventários  
florestais na eucaliptocultura no Brasil / Guilherme Rodrigues  
Fonseca. - 2025.

72 p.

Orientador(a): Samuel José Silva Soares da Rocha.

Coorientador(a): Henrique Ferraço Scolforo.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2025.

Bibliografia.

1. Inventário Florestal Contínuo. 2. Otimização. 3. Intensidade  
Amostrai. I. Rocha, Samuel José Silva Soares da. II. Scolforo,  
Henrique Ferraço. III. Título.

**GUILHERME RODRIGUES FONSECA**

**UMA NOVA ABORDAGEM PARA OTIMIZAR O DESIGN DE INVENTÁRIOS  
FLORESTAIS NA EUCALIPTOCULTURA NO BRASIL**

**A NEW APPROACH TO OPTIMIZE FOREST INVENTORY DESIGN IN  
EUCALYPTUS PLANTATIONS IN BRAZIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 26 de março de 2025.

Dr. Samuel José Silva Soares da Rocha UFLA

Dr. Lucas Rezende Gomide UFLA

Dr. Henrique Ferrão Scolforo UFLA

Dr. Talles Hudson de Souza Lacerda

Prof. Dr. Samuel Jose Silva Soares da Rocha  
Orientador

Dr. Henrique Ferrão Scolforo  
Coorientador

**LAVRAS – MG  
2025**

*À maior guerreira que conheço nessa vida e meu exemplo de vida.  
Á minha mãe, Lúcia.*

## **AGRADECIMENTOS**

Meus agradecimentos são inúmeros, como sempre foram ao longo da minha vida. Essa conquista é fruto de centenas de pessoas que ao longo de minha jornada tornaram tudo isso possível. Sou imensamente grato por todas essas pessoas. No entanto, meu primeiro e mais profundo agradecimento é a Deus. Sou grato por Sua graça, pela dádiva da vida, por Sua infinita misericórdia e por sempre me perdoar. Ele é o caminho, a verdade e a vida.

Agradeço imensamente aos meus pais, Luiz Claudio Fonseca e Lúcia Irene Rodrigues, que sempre foram minha base e meu apoio. Eles me deram não apenas amor e suporte, mas também a liberdade de traçar meu próprio caminho e isso não tem preço. Sem eles, nada disso teria sido possível. Cada um, à sua maneira, me educou da melhor maneira possível, proporcionando os valores e ensinamentos que me trouxeram até aqui. Amo vocês infinitamente.

Agradeço às minhas três irmãs por todo o apoio e pelos ensinamentos ao longo da vida e durante o mestrado. Amo muito vocês e tenho um imenso orgulho de cada uma, da nossa família e do que estamos construindo juntos.

Agradeço à minha namorada e companheira, Fernanda, por estar sempre ao meu lado, me incentivando a ser uma pessoa melhor. Sou imensamente grato por todo o amor, companheirismo, paciência e pelos valiosos ensinamentos de vida que compartilha comigo.

Agradeço ao meu professor e orientador, Prof. Samuel, por todo o ensinamento, paciência e apoio ao longo deste período. A conciliação entre trabalho e mestrado não foi fácil, mas, mesmo diante dos desafios, você nunca deixou de oferecer suporte sempre que precisei.

Agradeço ao meu exemplo de pessoa, coorientador e gestor, Henrique, pela grande oportunidade. Sou imensamente grato por toda a orientação, não apenas profissional, mas também de vida, ao longo do nosso convívio. Sem suas indagações, instigações, conversas e direcionamento, nada disso teria sido possível. É uma honra poder fazer parte disso.

Agradeço aos meus amigos da República Pé da Serra, que me acolheram durante grande parte deste trabalho e foram fundamentais para sua conclusão. Esse lugar sempre será minha segunda casa.

Agradeço ao meu amigo Lucas, pela parceria profissional, acadêmica e pessoal, por todo apoio, auxílio, conselhos e conversas durante esses 2 anos.

Aos meus dois mentores de vida, Beto e Bocão, expresso minha gratidão por todo ensinamento, oportunidade e apoio. É uma honra ter vocês como amigos.

Agradeço a toda equipe de Inventário/Modelagem Florestal da Suzano — Gabriel, Cássio, Talles, Lucas, Evandro, Marcel, Rayana e Julyana. Fazer parte dessa equipe é um privilégio, e sem vocês, este trabalho não teria sido possível.

Agradeço à Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Laboratório de Estudos em Manejo Florestal (LEMAF) pela oportunidade de conduzir este trabalho e pelo suporte essencial ao longo dessa jornada.

Agradeço à Suzano S/A pela oportunidade de aprender, expandir meus conhecimentos e desenvolver meu pensamento crítico ao longo desta jornada.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para este trabalho e para o meu desenvolvimento profissional e pessoal. Deixo aqui minha sincera e profunda gratidão.

## RESUMO

O setor de florestas plantadas brasileiro é um dos principais impulsionadores da economia do país, ocupando uma área significativa e gerando milhões de empregos diretos e indiretos. No entanto, dada sua importância, é crucial monitorar continuamente essas florestas para fornecer dados essenciais para o planejamento a curto, médio e longo prazo. No Brasil, o monitoramento é realizado principalmente por meio de um método de amostragem: o Inventário Florestal Contínuo (IFC). O IFC utiliza parcelas permanentes instaladas quando as florestas têm cerca de 2 anos de idade e são remeidas regularmente até o ano anterior à colheita. Este método tem custos consideráveis associados à instalação, manutenção e medição das parcelas, além dos desafios crescentes relacionados à escassez de mão de obra. Diante desse contexto, esta dissertação propõe duas abordagens distintas, mas complementares para otimizar o esforço amostral e o número de talhões medidos no IFC em plantios comerciais de eucalipto no Brasil. No primeiro artigo, é apresentada uma abordagem para otimizar o esforço amostral no IFC a partir dos 4 anos de idade das florestas. Os resultados demonstraram que a metodologia desenvolvida permitiu reduzir, em média, 63% do número de parcelas nas quatro regiões estudadas, com reduções variando entre 61% e 65%, dependendo da região. Essa redução manteve-se estável mesmo sob diferentes condições florestais, incluindo classes de sítio, regimes de manejo e grupos de materiais genéticos. Além disso, a aplicação de um modelo de Programação Linear Inteira possibilitou a seleção ótima das parcelas dentro de cada talhão, minimizando impactos da redução amostral e garantindo a acurácia das estimativas de volume. No segundo artigo, foi desenvolvido um novo design de IFC que combina as técnicas de Dupla Amostragem, algoritmos de simulação, meta-heurísticas e modelos de crescimento e produção para reduzir o número de talhões medidos ao longo do ciclo da floresta. A metodologia proposta permitiu reduzir aproximadamente 50% dos talhões medidos a partir dos 4 anos de idade até a colheita, mantendo a precisão e a acurácia da estimativa da variável de interesse. Além disso, foi desenvolvido um método para estimar outras variáveis do inventário para os talhões não medidos, assegurando a compatibilização dessas variáveis com a estimativa de volume. Essas abordagens não apenas contribuem para a redução dos custos operacionais do inventário, mas também tornam o processo mais eficiente e manejável, reduzindo a necessidade de mão de obra de campo—um fator crítico diante do crescimento do setor florestal no Brasil. Ao propor essas estratégias de otimização no IFC, esta dissertação busca contribuir para o avanço e a eficiência do manejo florestal no Brasil, beneficiando empresas do setor e promovendo um uso mais racional dos recursos disponíveis.

**Palavras chaves:** Inventário Florestal Contínuo; Otimização; Intensidade amostral.

## ABSTRACT

The Brazilian planted forest sector is one of the key drivers of the country's economy, occupying a significant area and generating millions of direct and indirect jobs. Given its importance, continuous monitoring of these forests is crucial to providing essential data for short, medium, and long-term planning. In Brazil, monitoring is primarily conducted through a sampling scheme known as Continuous Forest Inventory (CFI). CFI relies on permanent plots installed when the forests are two years old, which are then remeasured annually until the year before harvest. This method entails considerable costs associated with plot installation, maintenance, and measurement, in addition to the growing challenges related to labor shortages. Given this context, this dissertation proposes two distinct yet complementary approaches to optimizing the sampling effort and the number of stands measured in the CFI of commercial eucalyptus plantations in Brazil. The first paper presents a methodology to optimize the sampling effort in the CFI starting when the forest reaches four years of age. The results demonstrated that the developed methodology enabled an average reduction of 63% in the number of plots across the four studied regions, with reductions ranging from 61% to 65%, depending on the region. This reduction remained stable even under different forest conditions, including site classes, silvicultural systems, and genetic materials. Furthermore, applying an Integer Linear Programming model allowed for the optimal selection of plots within each stand, minimizing the impacts of sampling reduction while ensuring the accuracy of volume estimates. In the second paper, a new CFI design was developed, integrating Double Sampling techniques, simulation algorithms, metaheuristics, and growth and yield models to reduce the number of stands measured throughout the forest cycle. The proposed methodology enabled a reduction of approximately 50% in the number of stands measured from the age of four until harvest while maintaining the accuracy and precision of volume. Additionally, a method was developed to estimate other inventory variables for unmeasured stands, ensuring their compatibility with the estimated volume. These approaches not only contribute to reducing the operational costs of the inventory but also make the process more efficient and manageable, decreasing the demand for field labor—a critical factor given the growing forestry sector in Brazil. By proposing these optimization strategies for the CFI, this dissertation aims to advance and enhance forest management in Brazil, benefiting industry stakeholders and promoting a more rational use of available resources.

**Keywords:** Continuous Forest Inventory; Optimization; Sampling Intensity

## **INDICADORES DE IMPACTO**

O presente trabalho gerou impactos tecnológicos e econômicos concretos, com potencial de desdobramentos sociais e ambientais no setor florestal brasileiro. Ao propor duas abordagens complementares para a otimização do Inventário Florestal Contínuo (IFC) em plantios comerciais de eucalipto, o trabalho contribuiu para o aprimoramento da eficiência no monitoramento florestal, reduzindo significativamente o esforço amostral e os custos operacionais. Essas inovações têm aplicabilidade direta em empresas do setor de florestas plantadas, promovendo a racionalização do uso de recursos e respondendo à crescente escassez de mão de obra qualificada no campo. Embora o trabalho não tenha contado com ações extensionistas diretas, os impactos beneficiam, em potencial, populações envolvidas com a produção florestal em diferentes regiões do Brasil, abrangendo técnicos, engenheiros, gestores e trabalhadores operacionais. O território de abrangência compreende áreas comerciais de eucalipto situadas em diferentes regiões do país, representando ampla diversidade de condições de cultivo. A pesquisa insere-se na área temática de Tecnologia e Produção da Política Nacional de Extensão e dialoga com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial os ODS 8 (Trabalho decente e crescimento econômico), ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) e ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima), ao incentivar práticas mais sustentáveis e tecnológicas no manejo florestal. Dessa forma, os resultados obtidos contribuem de forma efetiva para o desenvolvimento técnico-científico do setor florestal, com impactos positivos sobre a produtividade, a sustentabilidade e a tomada de decisão nas empresas de base florestal.

## **IMPACT INDICATORS**

This work has generated concrete technological and economic impacts, with the potential for social and environmental developments in the Brazilian forestry sector. By proposing two complementary approaches to optimize the Continuous Forest Inventory (CFI) in commercial eucalyptus plantations, the study contributed to improving the efficiency of forest monitoring by significantly reducing sampling effort and operational costs. These innovations have direct applicability in companies within the planted forest sector, promoting the rational use of resources and addressing the growing shortage of skilled field labor. Although the work did not include direct extension activities, its impacts potentially benefit populations involved in forest production across different regions of Brazil, including technicians, engineers, managers, and operational workers. The area of influence comprises commercial eucalyptus plantations located in various regions of the country, representing a wide diversity of cultivation conditions. The research falls within the thematic area of Technology and Production of the National Extension Policy and aligns with the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 8 (Decent work and economic growth), SDG 9 (Industry, innovation and infrastructure), SDG 12 (Responsible consumption and production), and SDG 13 (Climate action), by encouraging more sustainable and technological practices in forest management. Thus, the results obtained contribute effectively to the technical and scientific development of the forestry sector, with positive impacts on productivity, sustainability, and decision-making in forest-based companies.

## LISTA DE FIGURAS

### SEGUNGA PARTE – ARTIGO 1

Figura 1— Distribuição das parcelas e caracterização climática no Brasil.....	28
Figura 2 — Fluxograma da abordagem proposta. ....	30
Figura 3— Comparação da distribuição das parcelas de talhões das 4 regiões no cenário Atual (contendo todas as parcelas) e no cenário Otimizado (contendo apenas as parcelas selecionadas).....	36
Figura 4 — Comparação da distribuição de parcelas de acordo com a intensidade amostral entre a cenário Atual x cenário Otimizado para as 4 regiões. ....	38
Figura 5 — Redução de parcelas em percentual por regime de manejo e classe de sítio para as 4 regiões estudadas. ....	39
Figura 6 — Redução de parcelas em percentual por diferentes grupos de materiais genéticos para as 4 regiões estudadas. ....	39
Figura 7 — Aderência entre o VTCC médio na base 100 por talhão encontrado pelo cenário Atual e pelo cenário Otimizado em cada região estudada e para as idades de 4, 5 e 6 anos....	41
Figura 8 — Aderência entre o VTCC médio na base 100 por talhão encontrado pelo cenário Atual e pelo cenário Otimizado de todas as idades (4, 5 e 6 anos) por Classe de Sítio e Regime de Manejo das 4 regiões do estudo. ....	42

### SEGUNGA PARTE – ARTIGO 2

Figura 1 — Localização das regiões estudadas e caracterização climática do Brasil. ....	52
Figura 2 — Fluxograma da abordagem proposta. ....	54
Figura 3 — Distribuição do número de estratos por classe de número de talhões para as 4 regiões.....	63
Figura 4 — Gráfico 1 x 1 da estimativa do volume comercial com casca na base 100 do IFC vs IFO para as quatro regiões e 3 idades avaliadas ao nível do talhão.....	64
Figura 5 — Gráfico 1 x 1 da estimativa do volume comercial com casca na base 100 do IFC vs IFO para as quatro regiões e 3 idades avaliadas ao nível do estrato. ....	65
Figura 6 — Distribuição dos desvios do VCCC (m <sup>3</sup> /ha) estimado pelo IFC e do VCCC (m <sup>3</sup> /ha) estimado pelo IFO ao nível do talhão, para as quatro regiões e três idades avaliadas.	66
Figura 7 — Gráfico 1 x 1 da estimativa da área basal (a), altura dominante (b) e número de fustes (c) na base 100 estimados no IFO vs medidos no IFC para as quatro regiões e 3 idades avaliadas ao nível do talhão.....	68

## LISTA DE TABELAS

### SEGUNDA PARTE – ARTIGO 1

Tabela 1— Número total de parcelas e valores mínimos e máximos do VTCC (m <sup>3</sup> /ha) da medição aos 3 anos de idade das 4 regiões.....	29
Tabela 2 — Exemplo de cálculo para a etapa 1: Seleção de Talhões Aptos. Dados ilustrando 500 simulações realizadas para cada uma das novas intensidades a serem testadas. ....	31
Tabela 3 — Tabela com valores de VTCC referente ao percentil 2,5% da distribuição das simulações de cada nova intensidade amostral.....	32
Tabela 4 — Exemplo do cálculo do desvio do VTCC de cada nova intensidade em relação a intensidade atual. ....	33
Tabela 5 — Resultados da otimização amostral em número de parcelas e número de estratos das 4 regiões do estudo. ....	37
Tabela 6 — Delta entre a estimativa do VTCC (m <sup>3</sup> /ha) na base 100 do cenário Atual vs cenário Otimizado para as idades de 4, 5 e 6 anos das 4 regiões do estudo. ....	40

### SEGUNDA PARTE – ARTIGO 2

Tabela 1 — Estatística descritivas gerais do volume comercial com casca das quatro regiões de todas as medições ao longo do ciclo.....	53
Tabela 2 — Regra de medição dos blocos. ....	56
Tabela 3 — Ilustração dos resultados obtidos para um estrato hipotético após aplicação do estimador de dupla amostragem. ....	57
Tabela 4 — Equações de crescimento e produção descritas por Scolforo et al. (2019a). ....	60
Tabela 5 — Redução em percentual do número de talhões medidos e da área para as 4 regiões por ano. ....	62
Tabela 6 — Contraste da estimativa do volume comercial com casca (VCCC) na base 100 do IFC vs IFO das quatro regiões ao longo das idades de 4, 5 e 6 anos.....	63
Tabela 7 — Valores medidos no campo (IFC) e valores estimados (IFO) na base 100 das variáveis altura dominante (Hdom), área basal (G) e número de fustes (N° Fustes) das quatro regiões ao longo das idades de 4, 5 e 6 anos. ....	67

## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE</b> .....	<b>11</b>
<b>1</b> <b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b> <b>CONSIDERAÇÕES</b> .....	<b>18</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>20</b>
<b>SEGUNDA PARTE</b> .....	<b>22</b>
<b>ARTIGO 1</b> .....	<b>23</b>
<b>1.</b> <b>INTRODUCAO</b> .....	<b>26</b>
<b>2.</b> <b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>27</b>
<b>2.1</b> <b>Caracterização da área de estudo</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2</b> <b>Caracterização da base de dados</b> .....	<b>28</b>
<b>2.3</b> <b>Pressuposição teórica para a metodologia proposta</b> .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>2.4</b> <b>Abordagem de simulação para otimização amostral</b> .....	<b>29</b>
<b>2.4.1</b> <b>Seleção de estratos aptos para otimização esforço amostral</b> .....	<b>30</b>
<b>2.4.2</b> <b>Seleção das parcelas a serem medidas – modelo de otimização</b> .....	<b>33</b>
<b>2.5</b> <b>Validação da abordagem proposta</b> .....	<b>35</b>
<b>3.</b> <b>RESULTADOS</b> .....	<b>35</b>
<b>3.1</b> <b>Seleção das parcelas via otimização</b> .....	<b>35</b>
<b>3.2</b> <b>Redução amostral via simulação</b> .....	<b>36</b>
<b>3.3</b> <b>Validação da estimativa do VTCC via otimização</b> .....	<b>40</b>
<b>4.</b> <b>DISCUSSÃO</b> .....	<b>42</b>
<b>5.</b> <b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>44</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>45</b>
<b>ARTIGO 2</b> .....	<b>47</b>
<b>1.</b> <b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>50</b>
<b>2.</b> <b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>51</b>
<b>2.1</b> <b>Caracterização da área de estudo</b> .....	<b>51</b>
<b>2.2</b> <b>Caracterização da base de dados</b> .....	<b>52</b>
<b>2.3</b> <b>Inventário Florestal Otimizado (IFO)</b> .....	<b>53</b>
<b>2.3.1</b> <b>Premissas</b> .....	<b>54</b>
<b>2.3.2</b> <b>Divisão dos talhões em blocos</b> .....	<b>54</b>
<b>2.3.3</b> <b>Aplicação Dupla Amostragem no estrato</b> .....	<b>56</b>
<b>2.3.4</b> <b>Recuperação da informação ao nível do talhão</b> .....	<b>58</b>
<b>2.3.5</b> <b>Estimativa e compatibilização de outros atributos do IFC</b> .....	<b>59</b>
<b>2.4</b> <b>Validação da abordagem proposta</b> .....	<b>61</b>
<b>3.</b> <b>RESULTADOS</b> .....	<b>62</b>
<b>3.1</b> <b>Redução de talhões medidos no design do IFO</b> .....	<b>62</b>

3.2	Contraste da acurácia do IFO vs IFC.....	63
3.3	Acurácia da estimativa de outros atributos do inventário.....	66
4.	<b>DISCUSSÃO</b> .....	69
5.	<b>CONCLUSÃO</b> .....	70
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	72
	<b>TERCEIRA PARTE</b> .....	74
1.	<b>CONSIDERACOES FINAIS</b> .....	75

## **PRIMEIRA PARTE**

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

O setor de florestas plantadas brasileiro, atuando como um dos motores da economia, atingiu uma área total de 9,94 milhões de hectares em 2022, sendo que destes, 76% são do gênero *Eucalyptus* sp. (7,6 milhões de hectares). Ainda no mesmo ano, o setor gerou 2,6 milhões de empregos direta e indiretamente, com uma receita bruta de R\$ 260 bilhões e recorde na produção de celulose (25 milhões de toneladas), papel (11 milhões de toneladas) e painéis de madeira (8,5 milhões m<sup>3</sup>) (IBÁ, 2023). Dada a devida importância do setor no país, o monitoramento contínuo das florestas se torna indispensável para fornecer informações essenciais à tomada de decisão do planejamento no curto, médio e longo prazo (GUEDES et al, 2012).

Os métodos e processos de amostragem aliados a técnicas matemático-estatísticas tiveram as primeiras aplicações no século XX (Druszcz *et al.*, 2010). Segundo Gering, Da Silva e Machado (1994), o uso de unidades amostrais permanentes foi iniciado pelo francês Gurnaud na Exposição Universal de Paris em 1878. Posteriormente, Kirkland (1934) observou que o método se ajustava bem para a maioria dos povoamentos florestais e o levou para o meio florestal norte-americano. Meyer (1935) veio a conhecer o método em 1930, época em que trabalhou na Suíça, onde reconheceu seu potencial na estimativa do crescimento periódico de povoamentos florestais e apresentou seus resultados aos florestais norte-americanos.

Nas próximas décadas, houve uma intensa atividade na aplicação de métodos estatísticos no inventário florestal. Nos Estados Unidos, Schumacher e Bull (1932) começaram a formalizar métodos estatísticos de amostragem em inventários florestais com foco para estimativa de erros de amostragem. Mudgett e Gevorkiantz (1934) avaliaram o cálculo do erro de amostragem (Kangas; Maltamo, 2006). Na década de 40, a utilização de inventários florestais com unidades amostrais permanentes passou a ser intensivamente utilizada por florestais americanos e passou a ser conhecida por “inventário florestal contínuo” (IFC), que teve sua teoria apresentada por Ware e Cunia (1962) (Gering; Da Silva; Machado, 1994).

De maneira geral, no Brasil havia poucos estudos relacionados a aplicação da parte teórica para estimativas dos parâmetros no IFC até o século XX (Brena, 1979; De Paula Neto; Scolforo, 1983; Ribeiro, 1978). Contudo, o método foi amplamente adotado pelas empresas do setor florestal com objetivo de acompanhar o desenvolvimento das florestas plantadas, ganhando popularidade na década de 80 (Gering; Da Silva; Machado, 1994; McTague; Scolforo, J.; Scolforo, H., 2022). Desde então, o IFC vem sendo utilizado com o objetivo de estimar o estoque atual de madeira e monitorar a dinâmica do crescimento da floresta por meio

de modelos de estoque, crescimento e produção (Scolforo *et al.*, 2016). O IFC é caracterizado pelo uso exclusivo de parcelas permanentes, comumente instaladas no Brasil aos 2 anos de idade da floresta e remeidas até o ano anterior a colheita (McTague; Scolforo, J.; Scolforo, H., 2022).

A intensidade amostral do IFC deve ser definida em função da variabilidade da população florestal, do erro amostral admitido e da probabilidade de confiança fixada (Netto; Brena, 1997). No entanto, tradicionalmente, a intensidade amostral do IFC é estabelecida em 1 parcela a cada 10 hectares. Raimundo *et al.* (2017) atribuiu essa alta intensidade à necessidade de melhor capturar o comportamento do crescimento florestal, visto o rápido crescimento da espécie e da curta rotação silvicultural (5 a 7 anos).

Ao longo do ciclo da floresta, as empresas devem conduzir medições anuais em parcelas permanentes de IFC, e os custos associados à instalação, manutenção e medição dessas parcelas representam um ônus financeiro considerável. Esses elevados custos tornam-se ainda mais expressivos em plantios de larga escala, onde a necessidade de um alto número de medições compromete significativamente o orçamento operacional. Além disso, a crescente escassez de mão de obra para a realização das medições de campo impõe desafios adicionais à operação da empresa, podendo impactar a periodicidade e a confiabilidade da coleta de dados.

Alguns estudos apresentaram propostas para reduzir o esforço amostral de inventários florestais. Von Lupke, Hansen e Saborowski (2012) propuseram um método de amostragem em três fases para o IFC, combinando a remedição parcial das parcelas com a atualização das estimativas a partir de um modelo de crescimento e produção, atingindo uma redução significativa na intensidade amostral. McTague, Scolforo, J. e Scolforo, H. (2022) desenvolveram um método para estimar as variáveis do inventário, integrando modelos avançados de crescimento e produção com a técnica de amostragem por reposição parcial, viabilizando a redução de custos por meio da alocação de parcelas temporárias de medição simplificada. Wu *et al.* (2023) adotaram a amostragem espacial estratificada e a amostragem em múltiplos estágios, fundamentadas em padrões de distribuição espacial, o que possibilitou a redução do esforço amostral na estimativa de volume florestal na China. No Brasil, Raimundo *et al.* (2017) empregaram técnicas de geoestatística no IFC, demonstrando que é possível diminuir o número de parcelas amostrais sem comprometer a precisão das estimativas. Laranja *et al.* (2015) aplicaram a técnica de dupla amostragem em conjunto com dados de ALS (Airbone Laser Scanning), e encontraram melhoria nas estimativas de volume e redução da intensidade amostral.

Diante este cenário de busca contínua por redução de custos em grandes empresas, aliado à crescente demanda por estimativas mais precisas, surge uma oportunidade estratégica para reavaliar a abordagem atual dos inventários florestais no Brasil, especialmente no contexto do Inventário Florestal Contínuo (IFC). Nesse sentido, este estudo propõe uma mudança de paradigma, buscando responder às seguintes questões: (i) É possível otimizar o esforço amostral atualmente empregado no IFC sem comprometer a precisão e acurácia? (ii) Há necessidade de medição de todos os talhões ao longo do ciclo para o IFC?

O objetivo desta dissertação é propor duas abordagens distintas para otimizar o esforço amostral e o número de talhões medidos no Inventário Florestal Contínuo (IFC) em plantios de *Eucalyptus sp.* no Brasil. O trabalho está dividido em 2 artigos. No artigo 1 é apresentada uma abordagem para otimização do esforço amostral no IFC a partir dos 4 anos de idade. No artigo 2, é apresentado um novo design do IFC, que integra conceitos avançados de amostragem, modelos de crescimento e produção florestal, estatística e otimização, visando a redução do número de talhões a partir dos 4 anos de idade da floresta.

## 2 CONSIDERAÇÕES

As discussões apresentadas ao longo deste capítulo evidenciam a relevância do Inventário Florestal Contínuo (IFC) para a tomada de decisão no setor florestal, bem como os desafios associados à sua execução, especialmente no que tange à alta intensidade amostral e aos custos operacionais envolvidos. O histórico de evolução dos métodos de inventário demonstra que há um esforço contínuo para aprimorar a eficiência das estimativas, equilibrando precisão, acurácia e viabilidade econômica. Nesse contexto, a necessidade de reavaliar o modelo tradicional do IFC torna-se cada vez mais evidente, considerando a disponibilidade de novas técnicas estatísticas, modelos de crescimento e produção e ferramentas de otimização que podem contribuir para a racionalização do esforço amostral sem comprometer a qualidade das estimativas.

Diante desse cenário, esta dissertação propõe abordagens para redefinir a intensidade amostral do IFC em plantios de *Eucalyptus sp.* no Brasil, com foco na otimização da coleta de dados ao longo do ciclo da floresta. No primeiro artigo, é investigada a possibilidade de reduzir o esforço amostral a partir dos 4 anos de idade, utilizando conceitos estatísticos avançados e simulação. No segundo artigo, propõe-se um novo design para o IFC, integrando diferentes técnicas de amostragem e modelos de crescimento e produção, com o objetivo de otimizar o número de talhões monitorados a partir dos 4 anos de idade. Dessa forma, espera-se que os

resultados obtidos contribuam para uma nova abordagem na condução do IFC, proporcionando ganhos operacionais e econômicos sem comprometer a confiabilidade das estimativas florestais.

## REFERÊNCIAS

- BRENA, Doádi Antonio. **Comparação dos metodos de inventarios florestais sucessivos em relação a amostragem com repetição parcial, aplicados em uma população estratificada.** 1979.
- DE PAULA NETO, Francisco; SCOLFORO, José Roberto Soares. **Eficiência relativa dos procedimentos de inventários repetidos em plantações de Eucalyptus spp.** Revista Arvore, v. 7, n. 2, p. 123, 1983.
- DRUSZCZ, João Paulo et al. **Comparação entre os métodos de amostragem de Bitterlich e de área fixa com parcela circular em plantação de Pinus taeda.** Floresta, v. 40, n. 4, 2010.
- GERING, Lawrence Rudolf; DA SILVA, José Antonio Aleixo; DO AMARAL MACHADO, Sebastião. **Inventário florestal contínuo com reposição parcial de unidades amostrais.** Floresta, v. 24, n. 1/2, 1994.
- GUEDES, Isabel Carolina de Lima et al. **Técnicas geoestatísticas e interpoladores espaciais na estratificação de povoamentos de Eucalyptus sp.** Ciência Florestal, v. 22, p. 541-550, 2012.
- IBA, Indústria Brasileira de Árvores, **Relatório Iba**, 91p, 2023.
- KANGAS, Annika; MALTAMO, Matti (Ed.). **Forest inventory: methodology and applications.** Springer Science & Business Media, 2006.
- KIRKLAND, Burt P. **Regulating the cut by the continuous inventory-flexible rotation system.** Journal of Forestry, v. 32, n. 8, p. 818-825, 1934.
- LARANJA, Danitiele Cristina França et al. **Redução do erro amostral na estimativa do volume de povoamentos de Eucalyptus spp. por meio de escaneamento laser aerotransportado.** Sci. For, v. 43, p. 845-852, 2015.
- MCTAGUE, John Paul; SCOLFORO, Henrique Ferraço; SCOLFORO, Jose Roberto S. **A new paradigm for Continuous Forest Inventory in industrial plantations.** Forest Ecology and Management, v. 519, p. 120314, 2022.
- MEYER, H. Arthur. **A simplified increment determination on the basis of stand tables.** Journal of Forestry, v. 33, n. 9, p. 799-806, 1935.
- MUDGETT, Bruce D.; GEVORKIANTZ, S. B. **Reliability of forest surveys.** Journal of the American Statistical Association, v. 29, n. 187, p. 257-281, 1934.
- NETTO, S. Péllico; BRENA, Doádi Antônio. **Inventário florestal.** Ed. S. Péllico Netto, DA Brena, 1997.
- RAIMUNDO, Marcel Regis et al. **Geostatistics applied to growth estimates in continuous forest inventories.** Forest Science, v. 63, n. 1, p. 29-38, 2017.

RIBEIRO, Jose Carlos. **Análise da amostragem com Repetição parcial em relação a outros procedimentos de inventários florestais sucessivos.** 1978.

SCHUMACHER, Francis X.; BULL, Henry. **Determination of the errors of estimate of a forest survey, with special reference to the bottom-land hardwood forest region.** 1932.

SCOLFORO, Henrique Ferraco et al. **Modeling dominant height growth of eucalyptus plantations with parameters conditioned to climatic variations.** Forest Ecology and Management, v. 380, p. 182-195, 2016.

VON LÜPKE, Nikolas; HANSEN, Jan; SABOROWSKI, Joachim. **A three-phase sampling procedure for continuous forest inventory with partial re-measurement and updating of terrestrial sample plots.** European Journal of Forest Research, v. 131, p. 1979-1990, 2012.

WARE, Kenneth D.; CUNIA, Tiberius. **Continuous forest inventory with partial replacement of samples.** Forest Science, v. 8, n. suppl\_2, p. a0001-40, 1962.

WU, Heng et al. **Multistage sampling and optimization for forest volume inventory based on spatial autocorrelation analysis.** Forests, v. 14, n. 2, p. 250, 2023.

## **SEGUNDA PARTE**

## **ARTIGO 1**

**Uma abordagem dinâmica baseada no Teorema do Limite Central  
para otimizar a intensidade amostral em plantações de eucalipto  
no Brasil**

**A dynamic approach based on the Central Limit Theorem to  
optimize sampling intensity in Eucalyptus plantations in Brazil**

## RESUMO

O Inventário Florestal Contínuo (IFC) desempenha um papel fundamental no monitoramento e planejamento das florestas plantadas no Brasil, sendo amplamente utilizado por grandes empresas do setor. Tradicionalmente, a metodologia do IFC envolve a remedição periódica de unidades amostrais permanentes, seguindo uma regra fixa de amostragem de, em média, 1 parcela a cada 10 hectares. No entanto, a remedição periódica das unidades amostrais permanentes representa um custo elevado para as empresas, impulsionando a busca por métodos que otimizem a intensidade amostral sem comprometer a precisão e a acurácia das estimativas. Neste estudo, foi proposto um método para otimizar a intensidade amostral do IFC em plantios de eucalipto no Brasil, combinando simulações baseadas no Teorema do Limite Central e um modelo de Programação Linear Inteira. O objetivo é reduzir o esforço amostral por meio da definição de uma intensidade amostral ideal para cada estrato, considerando sua heterogeneidade. A abordagem desenvolvida permitiu reduzir, em média, 63% o número de parcelas em quatro regiões distintas distribuídas ao longo do território brasileiro. A estabilidade dessas reduções, mesmo sob diferentes condições da floresta, como classes de sítio, regime de manejo e grupos de materiais genéticos, evidencia a consistência e a eficácia do método proposto. Além disso, o modelo de Programação Linear Inteira permitiu selecionar a combinação ótima de parcelas dentro de cada talhão, garantindo acurácia das estimativas e minimizando o impacto da redução do esforço amostral. A acurácia das estimativas foi evidenciada com um delta médio de apenas -0,6%, -0,7% e -0,8% para as idades de 4, 5 e 6 anos, respectivamente, demonstrando que a abordagem com a redução de parcelas manteve a representatividade das estimativas do volume em relação ao cenário da intensidade 1:10. O estudo reforça a viabilidade da modernização do IFC no Brasil e aponta para futuras melhorias, como a incorporação de dados de sensoriamento remoto para aprimorar ainda mais a eficiência e a adaptabilidade da metodologia.

**Palavras-chave:** Inventário Florestal Contínuo; Teorema do Limite Central; Otimização amostral; Programação Linear Inteira.

## ABSTRACT

Continuous Forest Inventory (CFI) plays a fundamental role in monitoring and planning planted forests in Brazil and is widely used by major companies in the sector. Traditionally, the CFI methodology involves the periodic remeasurement of permanent sample plots, following a fixed sampling rule of approximately 1 plot per 10 hectares. However, the periodic remeasurement of these permanent plots represents a high cost for companies, driving the search for methods that optimize sampling intensity without compromising the precision and accuracy of estimates. This study proposes a method to optimize the sampling intensity of CFI in eucalyptus plantations in Brazil by combining simulations based on the Central Limit Theorem and an Integer Linear Programming (ILP) model. The objective is to reduce sampling effort by defining an optimal sampling intensity for each stratum, considering its heterogeneity. The developed approach enabled an average reduction of 63% in the number of plots across four distinct regions in Brazil. The stability of these reductions, even under different forest conditions such as site index classes, silvicultural systems, and genetic material, highlights the consistency and effectiveness of the proposed method. Furthermore, the ILP model allowed for the selection of the optimal combination of plots within each stand, ensuring the accuracy of estimates and minimizing the impact of sampling effort reduction. The accuracy of the estimates was evidenced by a mean delta of only -0.6%, -0.7%, and -0.8% for the ages of 4, 5, and 6 years, respectively, demonstrating that the approach with reduced plots maintained the representativeness of volume estimates compared to the traditional 1:10 sampling intensity scenario. The study reinforces the feasibility of modernizing CFI in Brazil and points to future improvements, such as incorporating remote sensing data to further enhance the efficiency and adaptability of the methodology.

**Keywords:** Continuous Forest Inventory; Central Limit Theorem; Sampling Optimization; Integer Linear Programming.

## 1. INTRODUCAO

O setor de florestas plantadas atingiu uma área total de 9,94 milhões de hectares em 2022 no Brasil, sendo que destes, 7,6 milhões de hectares são do gênero *Eucalyptus* spp. Ainda no mesmo ano, o setor gerou 2,6 milhões de empregos direta e indiretamente, com uma receita bruta de R\$ 260 bilhões e recorde na produção de celulose com 25 milhões de toneladas, 11 milhões de toneladas de papel e 8,5 milhões m<sup>3</sup> de painéis de madeira (IBÁ, 2023).

Dada a importância do setor florestal no Brasil e crescente demanda mundial por madeira, o monitoramento contínuo das florestas se torna indispensável para fornecer informações essenciais à tomada de decisão do planejamento no curto, médio e longo prazo (Scolforo *et al.*, 2019a). Este monitoramento periódico é realizado através de técnicas amostrais que capturam as mudanças nos povoamentos ao longo do tempo, comumente conhecido como Inventário Florestal Contínuo (IFC). Introduzido inicialmente por Stott (1947), o IFC foi idealizado visando captar as mudanças da floresta ao longo do tempo, e.g., crescimento, pragas, doenças e mortalidade (Scolforo *et al.*, 2019a; Scolforo *et al.*, 2019b; Venturas *et al.*, 2021).

O IFC vem sendo usado no Brasil há mais de 30 anos nos plantios comerciais de *Eucalyptus* sp., utilizando uma regra fixa de amostragem de, em média, 1 parcela a cada 10 hectares (Raimundo *et al.*, 2017). Contudo, o procedimento de remedição das unidades amostrais permanentes é uma atividade onerosa para as grandes indústrias do setor que necessitam medir milhares de hectares todos os anos. Sob este prisma, há um esforço técnico-científico visando alterações do design amostral e/ou redução da intensidade amostral, buscando alternativas que possibilitem a redução de medições no campo ou reduções dos custos com as medições (McTague; Scolforo, J.; Scolforo, H., 2022; Raimundo *et al.*, 2017).

O uso do IFC no Brasil tem sua metodologia considerada irrefutável. Apesar disto, avaliar sua eficácia em relação a outros procedimentos mais recentes e avançados em amostragem florestal é fundamental (McTague; Scolforo, J.; Scolforo, H., 2022; Raimundo *et al.*, 2017). McTague, Scolforo, J. e Scolforo, H. (2022), através da combinação de modelos modernos de crescimento e produção e da técnica de amostragem com reposição parcial, conseguiram desenvolver um método de estimativa das variáveis do inventário, reduzindo custos através da alocação de parcelas temporárias de baixo custo de medição. Wu *et al.* (2023), por meio da análise da autocorrelação espacial e de um esquema de amostragem em múltiplas etapas, desenvolveram um método que reduziu a intensidade amostral em campo comparado ao IFC. Raimundo *et al.* (2017) aplicaram geostatística para estimativas no IFC, demonstrando

que a utilização de técnicas estatísticas avançadas pode otimizar a intensidade amostral, permitindo redução no número de parcelas necessárias para estimativas precisas. Von Lüpke, Hansen e Saborowski (2012) propuseram um procedimento de amostragem em três fases para IFC, no qual a combinação de remedição parcial e atualização da estimativa de parcelas com um modelo de crescimento e produção permitiu uma redução significativa na intensidade amostral.

Os estudos mencionados demonstram uma preocupação central com a precisão do inventário florestal, propondo diferentes estratégias para reduzir o esforço amostral sem comprometer a confiabilidade das estimativas. No entanto, a maior parte dessas abordagens foca exclusivamente na precisão, ou seja, na redução da variabilidade das estimativas, sem avaliar diretamente a acurácia, que se refere à proximidade entre os valores estimados e os valores reais. Ainda há uma lacuna na literatura quanto à avaliação simultânea da precisão e da acurácia das estimativas. Essa dualidade é fundamental para garantir que as estimativas sejam não apenas consistentes, mas também representem fielmente os valores reais.

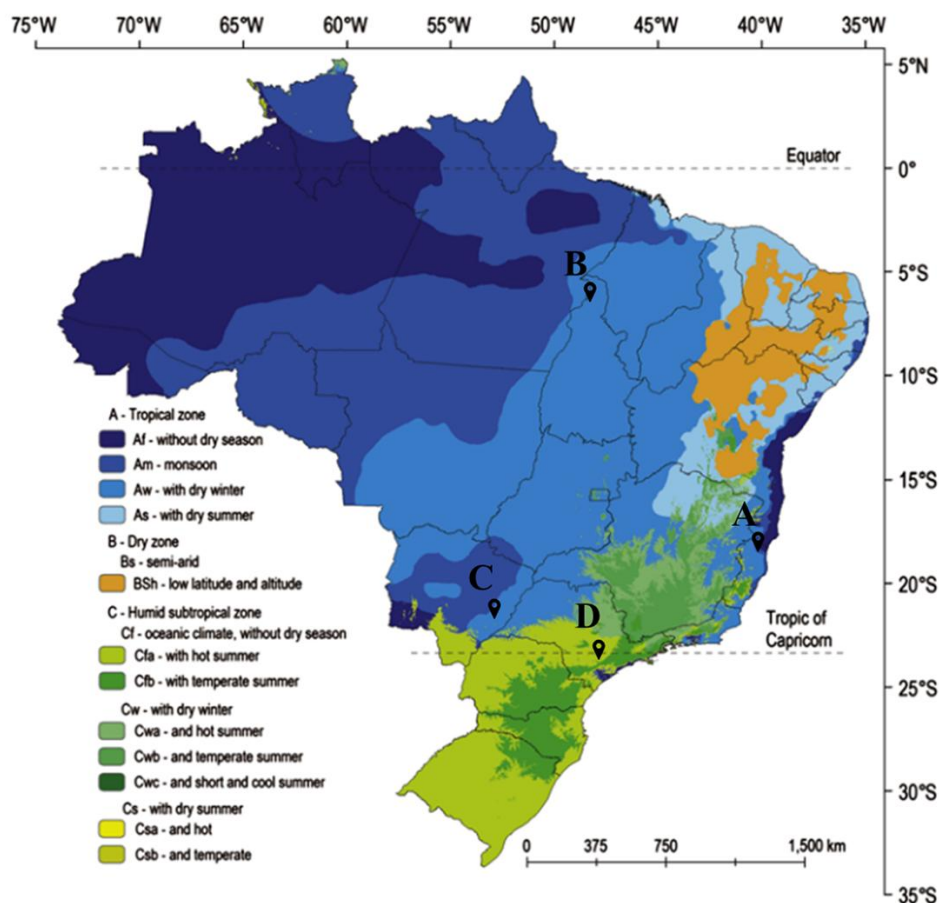
Dessa forma, torna-se essencial uma abordagem prática que preserve tanto a precisão quanto a acurácia na estimativa de um parâmetro populacional, permitindo a definição de uma nova condição amostral otimizada. Nesse contexto, este estudo propõe um método para otimizar a intensidade amostral do IFC em plantios de eucalipto no Brasil, utilizando simulações fundamentadas no Teorema do Limite Central e Programação Linear. O objetivo é alcançar uma adequação amostral ótima que mantenha a precisão e a acurácia das estimativas, garantindo a confiabilidade dos resultados sem comprometer a representatividade da variável de interesse.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Caracterização da área de estudo**

A região do estudo compreende plantações comerciais de *Eucalyptus sp.* nos estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, Espírito Santo, Bahia, Maranhão e Pará (Figura 1). As regiões abrangem uma grande diversidade de zonas climáticas, que incluem Cfa (Clima subtropical úmido, com verões quentes), Cwb (Clima subtropical de altitude com invernos secos e verões amenos), Am (Clima tropical de monção), Af (Clima tropical sem estação seca) e Aw (Clima tropical, com inverno seco) (Alvares *et al.*, 2013). Adicionalmente, as parcelas estão localizadas em áreas com elevação que varia desde o nível do mar até 1100 metros de altitude. Por fim, 51% da área possui solos com textura média, 42% com textura argilosa e 7% com textura arenosa.

Figura 1— Distribuição das parcelas e caracterização climática no Brasil.



Fonte: Adaptado de ALVARES *et al.* (2013).

## 2.2 Caracterização da base de dados

Os dados são compostos de parcelas permanentes de Inventário Florestal Contínuo (IFC) distribuídos ao longo do Brasil, de 4 regiões distintas, rotuladas de A, B, C e D (Figura 1). As parcelas estão localizadas nas regiões Sudeste (estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Espírito Santo), Nordeste (estados de Bahia e Maranhão) e Norte (no estado do Pará). As medições se iniciaram aos 2 anos de idade e as remedições foram realizadas anualmente até a idade de 6 anos.

As parcelas são de formato circular com 400 m<sup>2</sup> de área, alocadas sistematicamente, com intensidade amostral de 1 parcela a cada 10 hectares. Em cada parcela, foram coletados o diâmetro à 1,30 metros do solo (DAP), altura total das 4 árvores dominantes, seguindo o conceito de Assmann (1970), e altura total de 4 árvores centrais da parcela. A altura das árvores

não mensuradas foi estimada através de equação hipsométrica proposta por Curtis (1967). Posteriormente, o volume total com casca (VTCC, m<sup>3</sup>/ha) de cada árvore foi estimado pelo modelo de Schumacher e Hall (1933). O modelo de crescimento e produção proposto por Scolforo *et al.* (2019b) foi ajustado e foram estimados para cada medição o incremento médio anual do volume projetado para os 7 anos de idade (IMA7, m<sup>3</sup>/ha/ano). No total, são 3.081 parcelas, em que é evidenciado a variação de produtividade entre as diferentes regiões (Tabela 1).

Tabela 1— Número total de parcelas e valores mínimos e máximos do VTCC (m<sup>3</sup>/ha) da medição aos 3 anos de idade das 4 regiões.

Região	Nº Parcelas	VTCC (m <sup>3</sup> /ha)	
		Mínimo	Máximo
A	552	38,4	331,2
B	834	34,3	279,2
C	667	32,9	288,0
D	1.028	42,1	338,6
<b>Total</b>	<b>3.081</b>	<b>36,3</b>	<b>338,6</b>

Fonte: Do autor (2025).

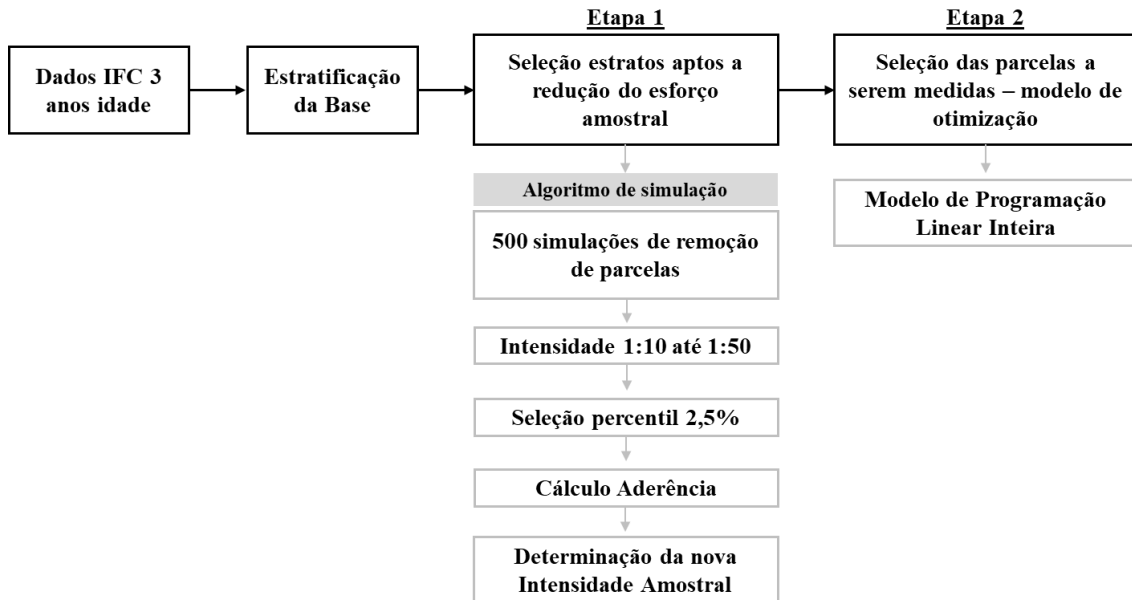
### 2.3 Abordagem de simulação para otimização amostral

A metodologia proposta foi desenvolvida focando em florestas de 3 ou mais anos de idade. A base teórica foi fundamentada no estudo de Raimundo *et al.* (2017), que provou que a partir dos 3 anos, a dinâmica entre as árvores em uma floresta de eucalipto não sofre alterações drásticas, desde que não haja nenhum distúrbio local, ou seja, torna-se possível a definição dos sítios produtivos com confiabilidade (Raimundo *et al.*, 2017).

A otimização do esforço amostral é realizada a partir dos dados de IFC medidos aos 3 anos de idade considerando o pressuposto teórico. Logo, a intensidade otimizada é implementada na remedição correspondente aos 4 anos de idade, sendo a metodologia aplicada separadamente para cada estrato. Os estratos são baseados em fazenda, regime de manejo (alto fuste ou talhadia) e classe de idade. A estratificação possibilita isolar efeitos geográficos e climáticos, uma vez que são considerados talhões de uma mesma fazenda na mesma classe de idade. A abordagem proposta é composta por duas etapas principais: i) a primeira etapa envolve a identificação dos estratos aptos a terem o esforço amostral otimizado e a definição da nova intensidade amostral para cada um deles; ii) a segunda etapa consiste na seleção das parcelas

que continuam sendo medidas até o fim do ciclo, através de um modelo de Programação Linear Inteira (Figura 2).

Figura 2 — Fluxograma da abordagem proposta.



Fonte: Do autor (2025).

### 2.3.1 Seleção de estratos aptos para otimização esforço amostral

A primeira etapa do método consiste em identificar e selecionar os estratos aptos para a otimização do esforço amostral. Esta fase assegura a precisão do método, resultando em um baixo erro amostral a nível de estrato. Para alcançar esse objetivo, é implementado um bootstrap não paramétrico sem reposição com 500 repetições, onde em cada simulação são selecionadas aleatoriamente o número de parcelas correspondente a intensidade amostral simulada, variando da intensidade atual (1:10) até a intensidade de 1:50, em intervalos de 1 hectare. O limite de intensidade para simulação foi fixado em 1:50 com o objetivo de evitar situações em que, em estratos altamente homogêneos, a otimização resultasse em uma única parcela amostral por talhão. Por fim, para cada simulação de cada nova intensidade, é realizado o cálculo do VTCC médio com a combinação das parcelas selecionadas (Tabela 2).

Tabela 2 — Exemplo de cálculo para a etapa 1: Seleção de Talhões Aptos. Dados ilustrando 500 simulações realizadas para cada uma das novas intensidades a serem testadas.

<b>Estrato</b>	<b>Intensidade Amostral</b>	<b>Simulação</b>	<b>Nº Parcelas totais</b>	<b>Parcelas Seleccionadas</b>	<b>VTCC Médio</b>
1	01:11	1	5	1, 2, 3, 4, 5	280
1	01:11	2	5	2, 1, 4, 3, 5	280
1	01:11	...	5	...	280
1	01:11	500	5	5, 3, 1, 2, 4	280
1	01:12	1	5	2, 5, 1, 4	280
1	01:12	2	5	3, 4, 2, 5	279
1	01:12	...	5	...	280
1	01:12	500	5	4, 1, 3, 2	277
....	...	...	...	...	...
1	01:50	1	5	3, 1, 5	280
1	01:50	2	5	4, 5, 2	275
1	01:50	...	5	...	280
1	01:50	500	5	2, 3, 1	274

Fonte: Do autor (2025).

Em cada simulação, tem-se o valor do VTCC médio das parcelas seleccionadas, criando assim uma distribuição das médias de VTCC. Em seguida, o percentil 2,5% desta distribuição é utilizado como referência, pois este percentil corresponde ao limite inferior do intervalo de confiança bicaudal de 95%. A estratégia de combinação das parcelas se baseia no Teorema do Limite Central, e visa retornar à distribuição da média amostral de cada estrato, fazendo-a convergir para a distribuição normal padrão, considerando que o número de observações é significativamente grande. Assim, para cada estrato, obtém-se a intensidade amostral de referência (1:10), as novas intensidades amostrais simuladas e o valor do VTCC correspondente ao percentil de 2,5% (Tabela 3).

Tabela 3 — Tabela com valores de VTCC referente ao percentil 2,5% da distribuição das simulações de cada nova intensidade amostral.

<b>Estrato</b>	<b>Intensidade Amostral</b>	<b>VTCC (percentil 2,5%)</b>
1	*01:10	280,0
1	01:11	277,0
1	01:12	275,2
1	01:13	270,7
1	01:14	269,3
1	01:15	268,9
1	01:16	266,2
1	01:17	263,0
1	01:18	262,8
1	...	...
1	01:50	257,0

\*O valor de VTCC da intensidade 1:10 é referente a média atual do estrato sem remoção de parcelas. Fonte: Do autor (2025).

Em seguida, é realizado o cálculo do desvio do VTCC de cada intensidade simulada em relação à média do estrato considerando todas as parcelas (Equação 1). A determinação da nova intensidade amostral para cada estrato é então definida pela premissa de que o desvio calculado deve ser  $\leq 5\%$ . Considerando que o percentil de 2,5% representa um dos limites do intervalo de confiança de 95%, o objetivo é aplicar um conceito semelhante ao utilizado em inventários florestais no Brasil, onde um erro amostral de 5% é considerado aceitável. Em uma floresta homogênea, espera-se que o VTCC do percentil de 2,5% não seja distante do VTCC médio. Dessa forma, estratos mais homogêneos tendem a ter maior redução do esforço amostral em comparação com estratos mais heterogêneos. Vale ressaltar que a abordagem de simulação proposta se mostra especialmente relevante no contexto de florestas de eucalipto monoclonais, uma vez que esses povoamentos tendem a apresentar estratos mais homogêneos.

$$Desvio = \left| \left( 1 - \left( \frac{VTCC_s}{VTCC_{atual}} \right) \right) \times 100 \right| \quad (1)$$

Em que:  $VTCC_s$  é o VTCC referente ao percentil 2,5% da distribuição da nova intensidade  $s$ ;  $VTCC_{atual}$  é o VTCC médio da intensidade atual (1:10) sem remoção de parcelas.

Assim, calcula-se o desvio para cada nova intensidade simulada em relação ao VTCC médio do estrato. Considerando o exemplo do estrato apresentado na Tabela 3, a nova intensidade amostral é de 1 parcela a cada 15 hectares, dado que o desvio dessa intensidade

atingiu 4,4%, enquanto o desvio da próxima intensidade (1:16) ultrapassou o limite de 5% (Tabela 4).

Tabela 4 — Exemplo do cálculo do desvio do VTCC de cada nova intensidade em relação a intensidade atual.

<b>Estrato</b>	<b>Intensidade Amostral</b>	<b>IMA7 (percentil 2,5%)</b>	<b>Desvio</b>
1	*01:10	280,0	-
1	01:11	277,0	1,1%
1	01:12	275,2	1,7%
1	01:13	270,7	3,3%
1	01:14	269,3	3,8%
1	01:15	268,9	4,0%
1	01:16	266,2	4,9%
1	01:17	263,0	6,1%
1	01:18	262,8	6,1%
1	...	...	...
1	01:50	257,0	8,2%

Fonte: Do autor (2025).

Para a aplicação prática da metodologia, algumas considerações são fundamentais: i) uma vez definida a nova intensidade amostral para um determinado estrato, todos os talhões pertencentes a esse estrato adotam essa nova intensidade amostral; ii) a metodologia não deve ser aplicada em áreas afetadas por eventos de sinistro, como incêndios florestais, pois essas ocorrências alteram o padrão de crescimento das árvores e compromete a pressuposição teórica utilizada; iii) embora o estudo tenha utilizado o volume total com casca (VTCC, m<sup>3</sup>/ha) como principal parâmetro para avaliação da aderência e acurácia, a abordagem pode ser ampliada para outras variáveis do inventário, como incremento médio anual e altura dominante, o que confere maior flexibilidade.

### 2.3.2 Seleção das parcelas a serem medidas – modelo de otimização

Após determinar a nova intensidade amostral para cada estrato e, conseqüentemente, para cada talhão, é necessário definir quais parcelas, instaladas aos 2 anos de idade e remeidas aos 3 anos com intensidade 1:10, continuam a ser remeidas até o final do ciclo. Esta etapa assegura que não haverá perda de acurácia na nova intensidade amostral em comparação com a intensidade clássica (1:10) ao nível do talhão. Esta seleção é realizada utilizando um modelo de programação linear inteira, que busca selecionar a combinação de parcelas com mínimo impacto na acurácia do inventário, além de garantir equidistância entre elas. O modelo

formulado busca encontrar a combinação de parcelas por talhão que minimize o impacto da redução do esforço amostral, ou seja, busca encontrar a combinação de parcelas otimizadas em que a média do  $VTCC_{ij}$  mais se aproxime da média de  $VTCC_{j\text{atual}}$ , em que  $VTCC_{j\text{atual}}$  representa a média que considera todas as parcelas do talhão  $j$  na intensidade atual e  $VTCC_{ij}$  representa a média de VTCC das parcelas selecionadas da combinação  $i$  do talhão  $j$  (Equação 2). A variável de decisão do modelo  $X_{ij}$  é binária  $\{0,1\}$  e representa a combinação de parcelas  $i$  do talhão  $j$ . Os índices  $i$  e  $j$  representam as combinações de parcelas para cada talhão a ser otimizado, respectivamente. A constante  $C_{ij}$  representa a aderência entre o  $VTCC_{ij}$  da combinação selecionada com o  $VTCC_{j\text{atual}}$  médio sem a remoção de parcelas.

Função Objetivo:

$$\text{Min} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{ij} X_{ij} \quad (2)$$

O modelo está sujeito a duas restrições. A primeira (Equação 3) garante a seleção de apenas uma combinação de parcelas da nova intensidade amostral por talhão, assegurando que todos os talhões continuam a ser medidos mesmo após a otimização.

$$\sum_{i=1}^I X_{ij} = 1 \quad \forall j \quad (3)$$

A segunda restrição (Equação 4) exige que as parcelas selecionadas tenham uma distância mínima entre si, garantindo uma distribuição espacial coerente. A constante  $k_{ij}$  que acompanha a variável de decisão representa o desvio padrão da distância euclidiana entre as parcelas da combinação  $i$  do talhão  $j$ . A constante  $K_j$  representa o percentil 30% da distribuição das distâncias de todas as combinações entre as parcelas do talhão  $j$ . A escolha do percentil 30% foi baseada em extensivas simulações, revelando que acima desse valor, o espaço de busca se mostrou mais apropriado para a seleção da distribuição espacial.

$$\sum_{i=1}^I k_{ij} X_{ij} \geq K_j \quad \forall j \quad (4)$$

A fórmula para o cálculo da constante  $C_{ij}$  é apresentada na Equação (5).

$$C_{ij} = \frac{(|VTCC_{j\text{atual}} - VTCC_{ij}|) * (1 + CV_{VTCC_{ij}}) * \text{Área}_j}{\text{Área}_{\text{estrato}}} \quad (5)$$

Onde  $CV_{VTCC_{ij}}$  é o coeficiente de variação do VTCC referente a combinação  $i$  do talhão  $j$ ;  $\text{Área}_j$  é a área do talhão  $j$ ;  $\text{Área}_{\text{estrato}}$  é a área do estrato.

## 2.4 Validação da abordagem proposta

Para validar a eficácia da abordagem proposta, foi realizada uma análise comparativa entre dois cenários: i) cenário Atual, considerando intensidade atual utilizada (1:10); e ii) cenário Otimizado, considerando a nova intensidade definida para cada estrato. A validação envolveu a comparação da estimativa do VTCC ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) entre os dois cenários nas quatro regiões de estudo, para as idades de 4, 5 e 6 anos. Além disso, foi realizada a comparação considerando diferentes fatores da floresta, visando verificar a consistência das estimativas do VTCC ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) em florestas com diferentes classes de sítios, regimes de manejo e grupos clonais. A precisão das estimativas foi avaliada através da comparação direta do delta e através de análise gráfica. Além disso, foi investigada a manutenção da coerência na distribuição espacial das parcelas selecionadas. Dessa forma, a abordagem proposta foi validada quanto à sua capacidade de equilibrar a redução do número de parcelas com a precisão na estimativa do VTCC ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ).

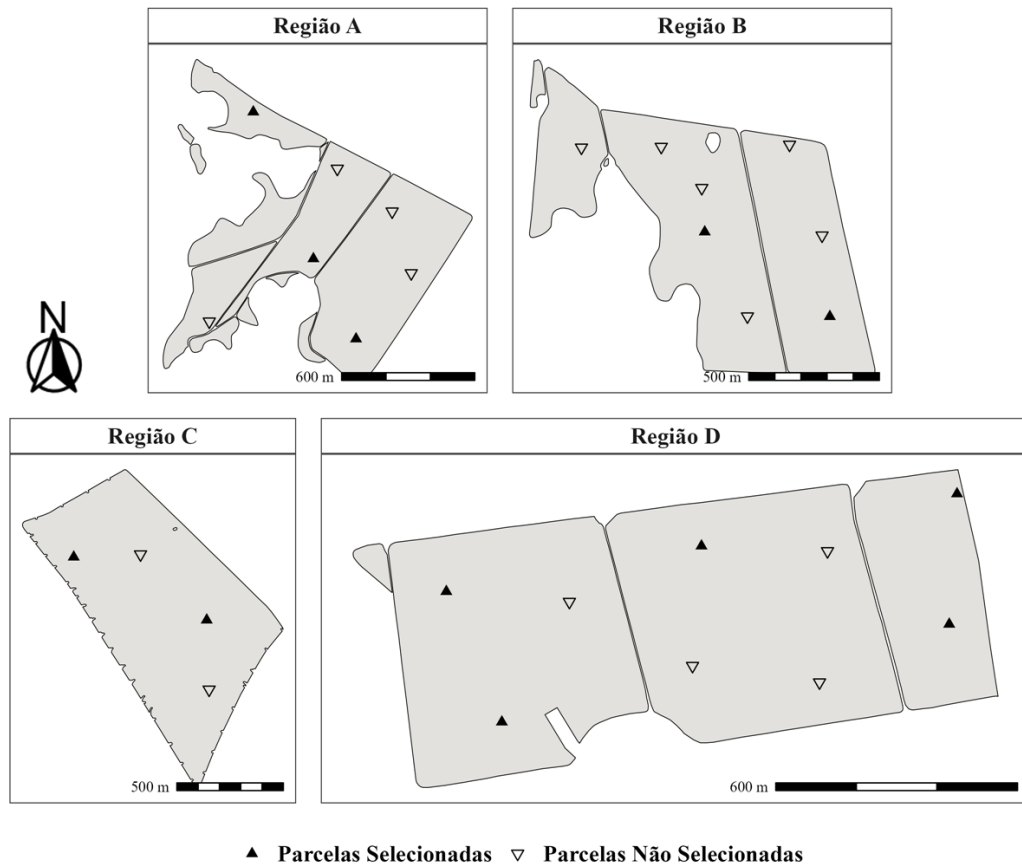
## 3. RESULTADOS

### 3.1 Seleção das parcelas via otimização

A Figura 4 apresenta quatro talhões, cada um representando uma das quatro regiões estudadas, e compara a distribuição das parcelas na intensidade 1:10 (cenário Atual) com a distribuição das parcelas selecionadas no cenário Otimizado. É importante salientar que, apesar da significativa redução no número de parcelas, o modelo de Programação Linear Inteira assegura a manutenção da coerência na distribuição espacial entre as parcelas selecionadas. Adicionalmente, observa-se que, mesmo com a redução de parcelas do cenário Otimizado, a aderência da estimativa do VTCC permanece consistente, sendo de 0,7%, 0,8%, -0,7% e -0,8% para os 4 talhões nas regiões A, B, C e D, respectivamente (Figura 3). Isso reforça a eficácia do modelo de Programação Linear Inteira em equilibrar a necessidade de redução do número de

parcelas, a coerência na distribuição espacial com a manutenção da acurácia na estimativa do VTCC.

Figura 3— Comparação da distribuição das parcelas de talhões das 4 regiões no cenário Atual (contendo todas as parcelas) e no cenário Otimizado (contendo apenas as parcelas selecionadas).



Fonte: Do autor (2025).

### 3.2 Redução amostral via simulação

Observou-se redução de 63,3% no número total de parcelas considerando as quatro regiões (Tabela 5). As regiões B e C destacaram-se ao apresentar os percentuais de redução acima de 65%, seguidas pelas regiões D e A, que registraram reduções de cerca de 61% cada no número de parcelas.

Tabela 5 — Resultados da otimização amostral em número de parcelas e número de estratos das 4 regiões do estudo.

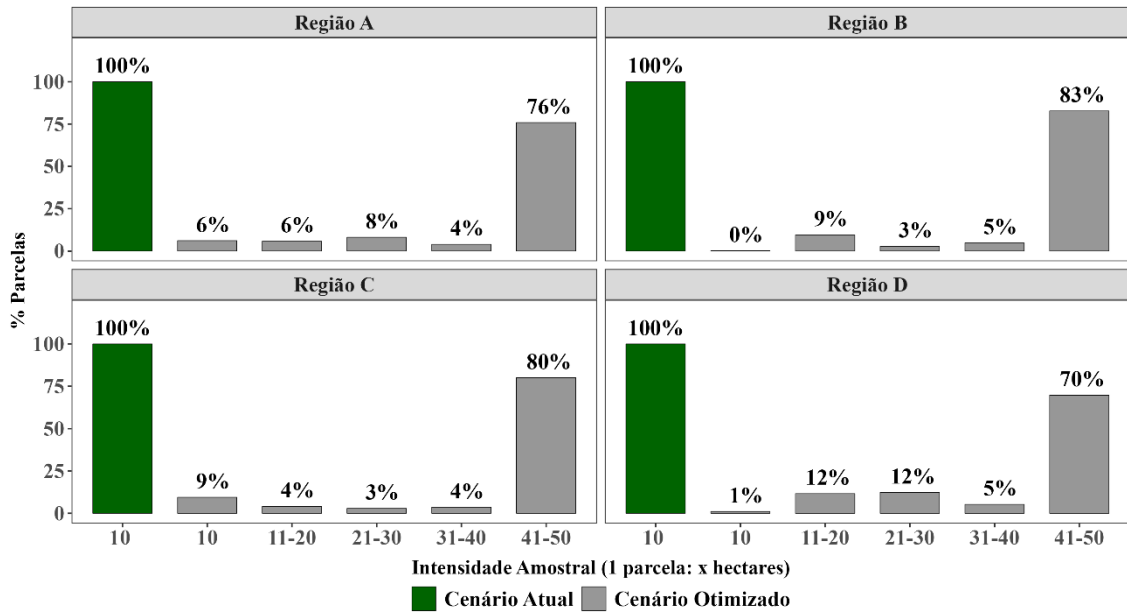
Região	Nº Parcelas		Redução Número Parcelas (%)	Nº Total de Estratos	Nº Estratos	
	Cenário Atual	Cenário Otim.			Não Otimizado	Otimizado
A	552	217	60,7%	103	30	73
B	834	279	66,5%	44	2	42
C	667	233	65,1%	45	7	38
D	1028	403	60,8%	90	9	81
<b>Total</b>	<b>3081</b>	<b>1132</b>	<b>63,3%</b>	<b>282</b>	<b>48</b>	<b>234</b>

Fonte: Do autor (2025).

Dentre os 282 estratos distribuídos nas 4 regiões, 48 mantiveram sua intensidade amostral original devido à sua menor extensão territorial, portanto apresentando um baixo número de talhões em cada um destes estratos. Além disso, alguns estratos que estavam aptos a serem otimizados pelo número de talhões, não tiveram sua intensidade amostral otimizada. Isso se deve à maior heterogeneidade desses estratos, onde a disparidade entre o percentil 2,5% das intensidades amostrais testadas e a média do estrato excedeu o limite de 5% permitido. Apesar da significativa redução no número de parcelas, o método assegura que todos os talhões possuam pelo menos uma parcela, o que o caracteriza como um otimizador amostral.

No cenário Atual, 100% das parcelas nas 4 regiões possuíam intensidade amostral 1:10 enquanto no cenário Otimizado um percentual mínimo de parcelas se manteve na intensidade 1:10, com 9%, 6% e 1% nas regiões C, A e D, respectivamente (Figura 4). A região B não apresentou nenhum estrato mantendo intensidade amostral de 1:10 no cenário Otimizado. Por outro lado, foi observado que a maioria dos estratos permitiu uma redução na intensidade amostral, variando de 1:11 a 1:50. Chama atenção o percentual de parcelas entre as intensidades 1:41 até 1:50, sendo de 76%, 83%, 80% e 70% do número de parcelas para as regiões A, B, C e D, respectivamente. Por exemplo, considerando um estrato de 100 hectares, essa redução equivale a diminuir o número de parcelas de 10 para apenas 3, no caso da intensidade 1:40.

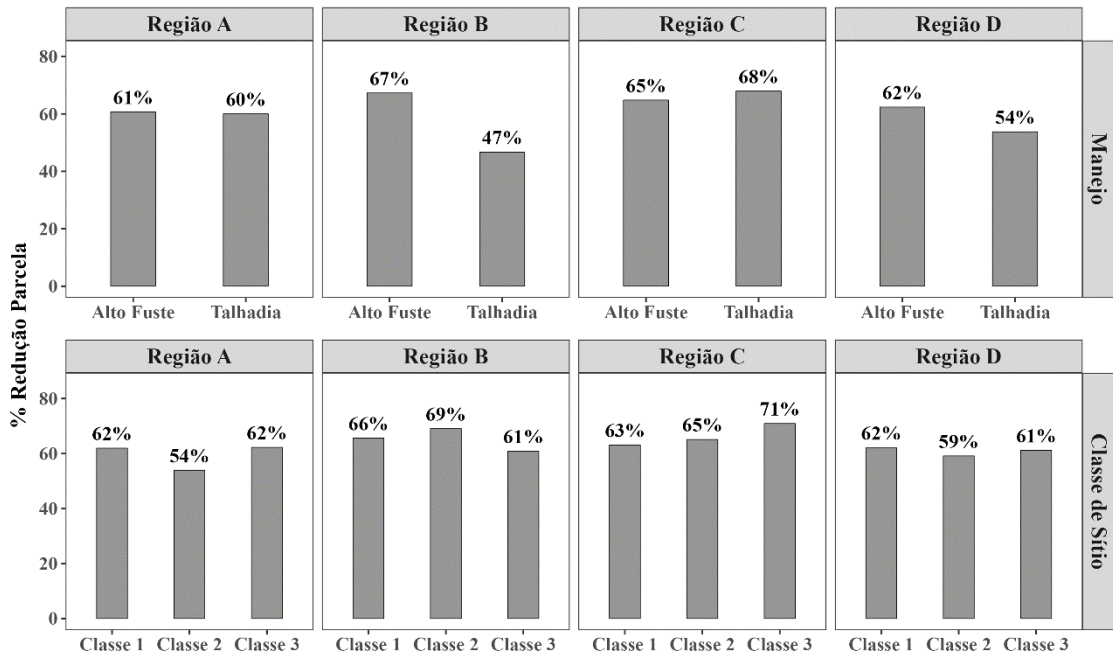
Figura 4 — Comparação da distribuição de parcelas de acordo com a intensidade amostral entre a cenário Atual x cenário Otimizado para as 4 regiões.



Fonte: Do autor (2025).

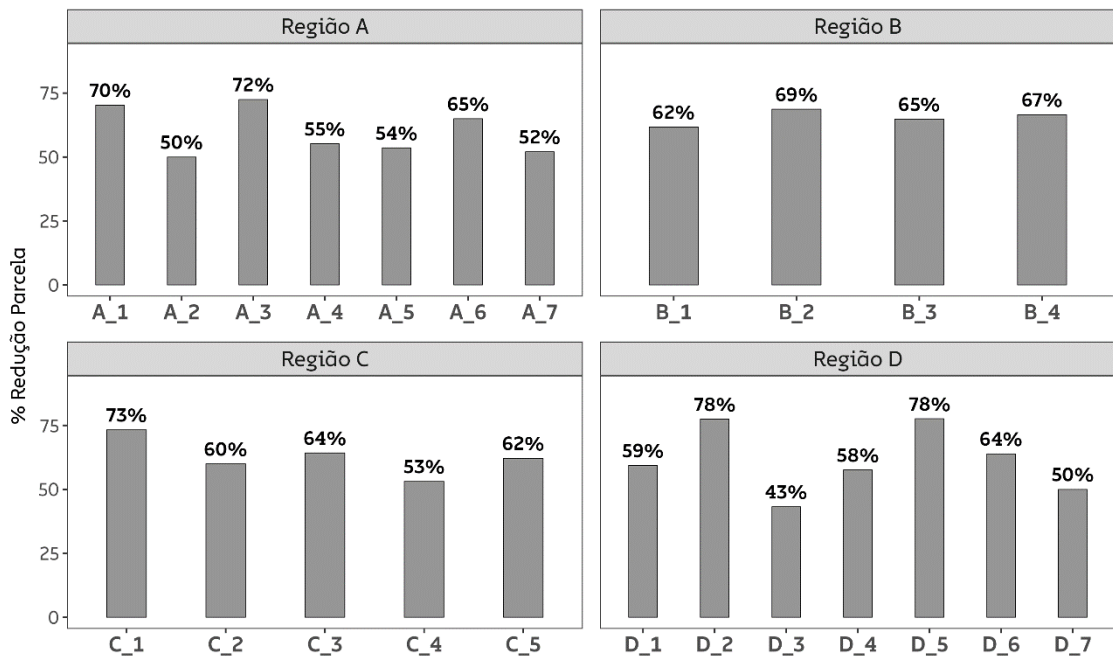
É também observado que a redução no número de parcelas ocorre de forma consistente, independentemente de fatores específicos da floresta, como classe de sítio, regime de manejo (alto fuste ou talhadia) ou diferentes grupos de materiais genéticos (Figura 5 e 6).

Figura 5 — Redução de parcelas em percentual por regime de manejo e classe de sítio para as 4 regiões estudadas.



Fonte: Do autor (2025).

Figura 6 — Redução de parcelas em percentual por diferentes grupos de materiais genéticos para as 4 regiões estudadas.



Fonte: Do autor (2025).

### 3.3 Validação da estimativa do VTCC via otimização

A análise comparativa entre o cenário Otimizado e o cenário Atual revelou uma alta aderência no que se refere à estimativa do VTCC (m<sup>3</sup>/ha). Esta aderência foi observada nas quatro regiões estudadas e nas idades de 4, 5 e 6 anos (Tabela 6). Em termos médios, considerando as quatro regiões, o delta observado foi de -0,6%, -0,7% e -0,8% para as idades de 4, 5 e 6 anos, respectivamente. Isso indica que o cenário Otimizado, que considera a média dos talhões contendo apenas as parcelas otimizadas, apresenta resultados muito próximos ao cenário Atual, que considera a média dos talhões contendo todas as parcelas na intensidade 1:10.

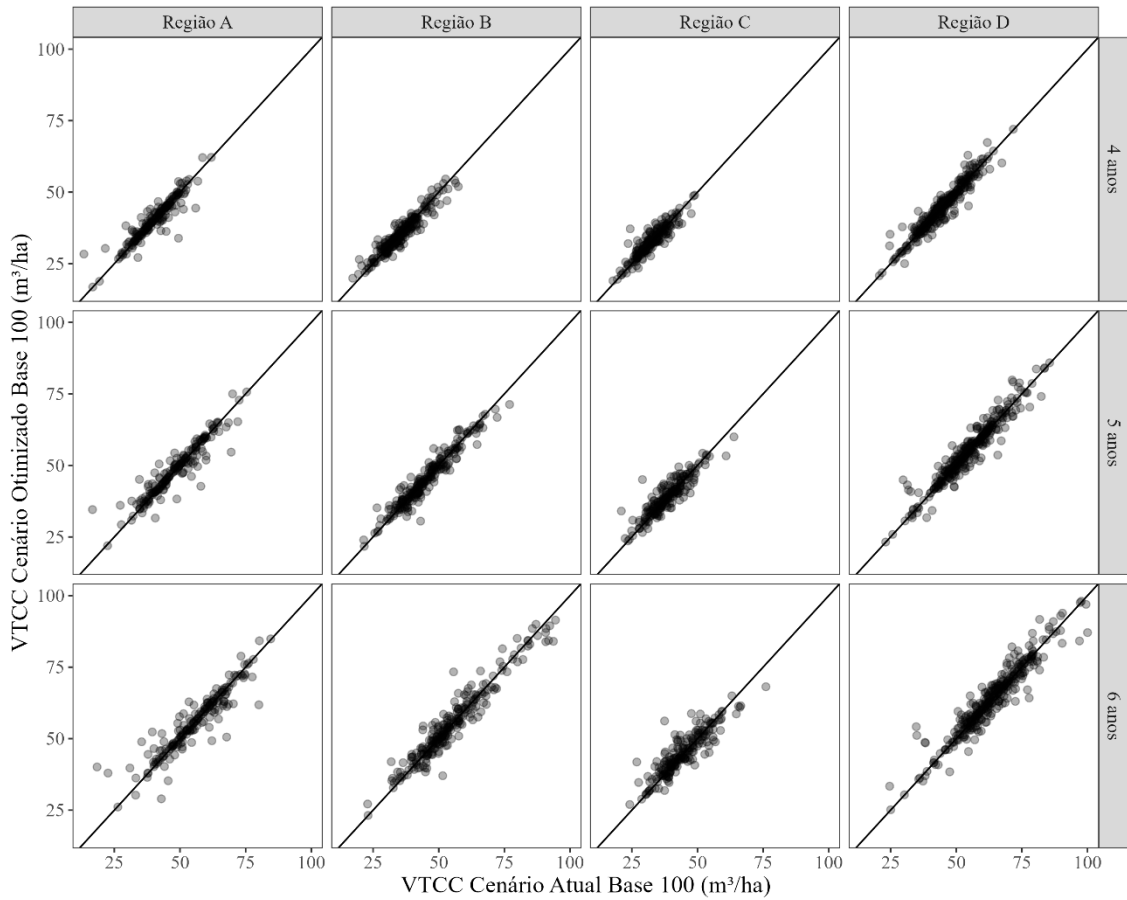
Tabela 6 — Delta entre a estimativa do VTCC (m<sup>3</sup>/ha) na base 100 do cenário Atual vs cenário Otimizado para as idades de 4, 5 e 6 anos das 4 regiões do estudo.

Região	4 anos idade			5 anos idade			6 anos idade		
	Atual	Otim.	Delta	Atual	Otim.	Delta	Atual	Otim.	Delta
A	100	98,9	1,1%	100	99,1	0,8%	100	100,2	-0,2%
B	100	100,8	-0,9%	100	100,4	-0,4%	100	100	0,0%
C	100	99,4	0,6%	100	99,4	0,6%	100	99,6	0,4%
D	100	100,2	-0,2%	100	99,9	0,1%	100	99,7	0,3%
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100,6</b>	<b>-0,6%</b>	<b>100</b>	<b>100,6</b>	<b>-0,7%</b>	<b>100</b>	<b>100,8</b>	<b>-0,8%</b>

Fonte: Do autor (2025).

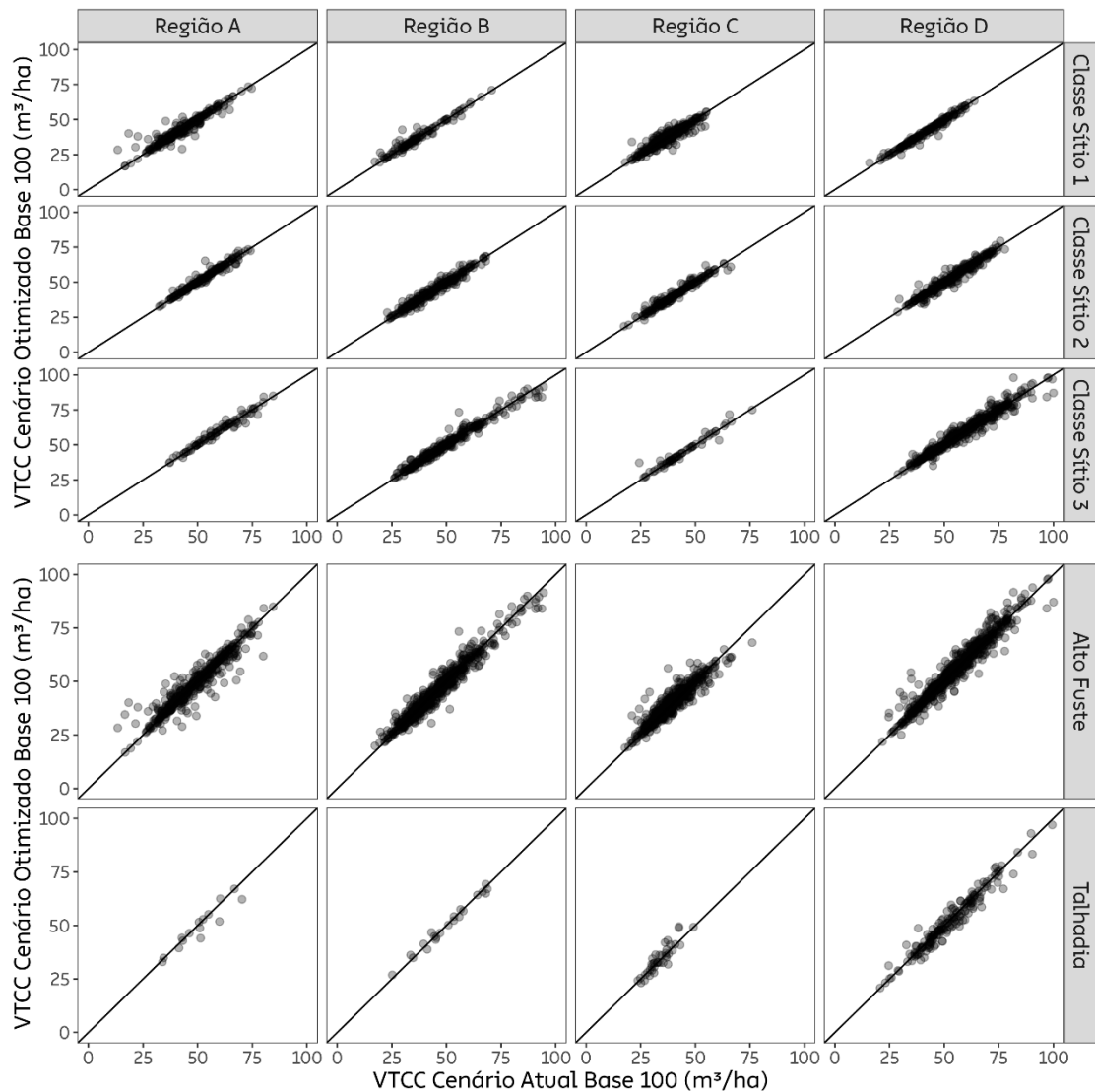
A representação gráfica das estimativas do VTCC (m<sup>3</sup>/ha) na base 100 para os cenários Atual e Otimizado evidencia a alta aderência entre eles (Figura 7). Os pontos no gráfico representam a média de VTCC por talhão em todas as regiões e idades.

Figura 7 — Aderência entre o VTCC médio na base 100 por talhão encontrado pelo cenário Atual e pelo cenário Otimizado em cada região estudada e para as idades de 4, 5 e 6 anos.



A consistência na estimativa do VTCC se estende além de local (região) e idade, abrangendo também diferentes fatores da floresta, como a classe de sítio e o regime de manejo (Figura 8). Independentemente da produtividade da floresta, seja ela mais produtiva ou menos produtiva, a precisão da estimativa da variável de interesse se mantém alta. Da mesma forma, a precisão é mantida tanto para florestas plantadas quanto para florestas de rebrota.

Figura 8 — Aderência entre o VTCC médio na base 100 por talhão encontrado pelo cenário Atual e pelo cenário Otimizado de todas as idades (4, 5 e 6 anos) por Classe de Sítio e Regime de Manejo das 4 regiões do estudo.



Fonte: Do autor (2025).

#### 4. DISCUSSÃO

Esse trabalho desenvolveu uma abordagem para otimização do esforço amostral do Inventário Florestal Contínuo em plantios comerciais de eucalipto no Brasil, onde o principal objetivo foi encontrar a adequação amostral ideal por estrato. A metodologia demonstrou robustez ao integrar simulações baseadas no Teorema do Limite Central e um modelo de Programação Linear Inteira. Como resultado, obteve-se uma redução média de 63% no número de parcelas em quatro regiões distribuídas ao longo de um gradiente geográfico de proporções

continentais. Notavelmente, as regiões B e C exibiram percentuais de redução superiores a 65%, enquanto as regiões D e A apresentaram reduções aproximadas de 61% cada no número de parcelas. Ainda, o percentual de redução de parcelas permaneceu estável quando avaliado em diferentes condições da floresta, como classes de sítio, regime de manejo e grupos de materiais genéticos. Essa constância evidencia a robustez e eficácia da abordagem proposta.

Alguns estudos têm buscado a otimização do esforço amostral em inventários florestais, e.g., Wu *et al.* (2023) utilizaram amostragem espacial estratificada e amostragem em múltiplos estágios, baseadas em padrões de distribuição espacial, resultando na redução do esforço amostral para a estimativa de volume florestal na China. Luo *et al.* (2023) aplicaram a Simulação Sequencial Gaussiana Condicional para otimizar a amostragem da biomassa de florestas na China, reduzindo o esforço amostral e os custos do inventário por meio de técnicas geoestatísticas. Raimundo *et al.* (2017) aplicaram métodos de geoestatística no IFC, permitindo a redução do número de parcelas amostrais sem comprometer a precisão das estimativas. No estudo, utilizamos simulações para identificar a amplitude de produtividade dentro de cada estrato, considerando todas as combinações possíveis, inclusive as menos prováveis. Essas simulações permitem aproximar a distribuição das médias, sendo que a média de 500 repetições tende a convergir para a média do estrato considerando todas as parcelas. Esse procedimento se fundamenta no Teorema do Limite Central, que estabelece que a distribuição das médias amostrais de uma variável aleatória se aproxima de uma distribuição normal à medida que o tamanho da amostra aumenta, independentemente da distribuição original da variável. A simulação funciona bem nesse contexto porque permite testar diferentes intensidades amostrais e combinações de parcelas sem a necessidade de realizar medições de campo extensivas e custosas. Além disso, o método consegue diferenciar estratos homogêneos e heterogêneos, possibilitando uma maior redução da intensidade amostral em estratos mais homogêneos, uma vez que a distância entre a média e o percentil 2,5% destes estratos tende a ser menor. Por outro lado, em estratos mais heterogêneos, uma maior intensidade amostral é necessária para garantir a precisão das estimativas.

Após a adequação da intensidade amostral por estrato, o modelo de PLI permite selecionar a combinação ótima de parcelas dentro de cada talhão, minimizando o impacto da redução do esforço amostral e preservando a precisão das estimativas da variável de interesse (VTCC, m<sup>3</sup>/ha). Esse modelo se destaca por avaliar todas as possíveis combinações de parcelas e por utilizar uma função objetivo que busca minimizar a discrepância entre a média das parcelas selecionadas e a média do estrato completo. Além disso, o PLI incorpora restrições que garantem uma distribuição espacial coerente das parcelas, assegurando que a seleção final não

apenas mantenha a acurácia das estimativas, mas também preserve a estrutura espacial da floresta.

O estudo aborda um paradigma que perdura desde a década de 1960 nos Inventários Florestais Contínuos (IFCs) no Brasil, em que a abordagem tradicional de amostragem tem sido amplamente utilizada pelas grandes empresas. McTague, Scolforo, J. e Scolforo, H. (2022) destacam a necessidade de modernizar essas práticas para atender às demandas atuais de precisão e redução de custos. Expandindo esta proposta, o presente trabalho incorpora a dinâmica da otimização do número de parcelas através da sensibilidade da heterogeneidade do estrato. Ao avaliar esses dois métodos, fica evidente que são complementares e podem ser aplicados em conjunto, estabelecendo um novo padrão para os IFCs no Brasil.

O estudo possui potencial de ser aprimorado com o uso de informações satelitais e dados de sensoriamento remoto, que podem auxiliar o método de simulação. O sensoriamento remoto oferece dados detalhados e atualizados sobre a estrutura e a composição das florestas, permitindo uma análise mais precisa e eficiente. A incorporação dessas informações tem o potencial de tornar a metodologia ainda mais robusta e adaptável, capacitando-a a lidar com a complexidade e diversidade das condições das florestas plantadas no Brasil.

## 5. CONCLUSÃO

A abordagem desenvolvida para otimização do esforço amostral no IFC demonstrou ser eficaz, onde foi possível reduzir, em média, 63% o número de parcelas nas quatro regiões estudadas. Essa redução significativa, que variou de 61% a 65% dependendo da região, manteve-se estável mesmo quando avaliada sob diferentes condições da floresta, como diferentes classes de sítio, regime de manejo e grupos de materiais genéticos. Além disso, a aplicação do modelo de Programação Linear Inteira permitiu selecionar a combinação ótima de parcelas dentro de cada talhão, minimizando o impacto da redução do esforço amostral e mantendo a acurácia das estimativas da variável de interesse (VTCC, m<sup>3</sup>/ha).

A relevância do tema de redução do esforço amostral é evidente quando avaliamos o iminente crescimento do setor florestal no Brasil. A redução do número de parcelas amostrais não apenas diminui os custos operacionais, mas também torna o processo de inventário mais eficiente e manejável e reduz a necessidade de mão de obra de campo, fator que tende a ser um problema nos próximos anos. O método permite ajustar a intensidade amostral de acordo com a heterogeneidade dos estratos, garantindo que mesmo grandes blocos florestais possam ser

mensurados com alta precisão e menor esforço. Isso é particularmente importante em regiões extensas e diversificadas, onde a variabilidade das condições ambientais e das práticas de manejo pode influenciar significativamente os resultados do inventário.

## REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. et al. **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ASSMANN, Ernst. **Principles of forest yield study: Studies in the organic production, structure, increment and yield of Forest Stands**. 1970.

CURTIS, Robert O. **Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir**. Forest science, v. 13, n. 4, p. 365-375, 1967.

IBA, Indústria Brasileira de Árvores, **Relatório Iba**, 91p, 2023.

LUO, Shaolong et al. **Sampling Estimation and Optimization of Typical Forest Biomass Based on Sequential Gaussian Conditional Simulation**. Forests, v. 14, n. 9, p. 1792, 2023.

MCTAGUE, John Paul; SCOLFORO, Henrique Ferraço; SCOLFORO, Jose Roberto S. **A new paradigm for Continuous Forest Inventory in industrial plantations**. Forest Ecology and Management, v. 519, p. 120314, 2022.

R Core Team (2023). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RAIMUNDO, Marcel Regis et al. **Geostatistics applied to growth estimates in continuous forest inventories**. Forest Science, v. 63, n. 1, p. 29-38, 2017.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. **Logarithmic expression of timber-tree volume**. Journal of Agricultural Research, v.47, n.9, p.719-734, 1933.

SCOLFORO, Henrique Ferraco et al. **Generalized stem taper and tree volume equations applied to eucalyptus of varying genetics in Brazil**. Canadian Journal of Forest Research, v. 49, n. 5, p. 447-462, 2019a.

SCOLFORO, Henrique Ferraco et al. **Stand-level growth and yield model system for clonal eucalypt plantations in Brazil that accounts for water availability**. Forest ecology and management, v. 448, p. 22-33, 2019b.

STOTT, C. B. **Permanent growth and mortality plots in half the time**. Journal of Forestry, v. 45, n. 9, p. 669-673, 1947.

VENTURAS, Martin D. et al. **Understanding and predicting forest mortality in the western United States using long-term forest inventory data and modeled hydraulic damage**. New Phytologist, v. 230, n. 5, p. 1896-1910, 2021.

VON LÜPKE, Nikolas; HANSEN, Jan; SABOROWSKI, Joachim. **A three-phase sampling procedure for continuous forest inventory with partial re-measurement and updating of terrestrial sample plots.** European Journal of Forest Research, v. 131, p. 1979-1990, 2012.

WU, Heng et al. **Multistage sampling and optimization for forest volume inventory based on spatial autocorrelation analysis.** Forests, v. 14, n. 2, p. 250, 2023.

**ARTIGO 2**

**Uma nova abordagem para otimizar o design do Inventário  
Florestal Contínuo em povoamentos de eucalipto no Brasil**

**A new approach to optimize Continuous Forest Inventory design  
in Eucalyptus stands in Brazil**

## RESUMO

O Inventário Florestal Contínuo (IFC) é a principal metodologia utilizada no monitoramento de plantios de *Eucalyptus* sp. no Brasil, permitindo estimativas precisas do volume de madeira e outras variáveis dendrométricas essenciais para o planejamento estratégico do setor florestal. No entanto, a remedição periódica de parcelas permanentes em uma intensidade fixa de 1 parcela a cada 10 hectares representa um alto custo operacional para as empresas. Diante desse cenário, este estudo propõe uma abordagem alternativa ao IFC tradicional, denominada Inventário Florestal Otimizado (IFO), que visa reduzir o número de talhões medidos ao longo do ciclo da floresta sem comprometer a precisão e a acurácia das estimativas. O método desenvolvido integra conceitos de dupla amostragem, estatística, otimização e modelos de crescimento e produção. Além disso, é apresentada uma técnica para realizar a estimativa de outras variáveis do inventário, assim como a contabilização dessas com o volume estimado. Os resultados demonstraram que o IFO possibilitou uma redução média de 50% no número de talhões medidos anualmente a partir dos 4 anos de idade, mantendo alta aderência às estimativas obtidas pelo IFC tradicional. As variáveis de interesse, como volume, altura dominante, área basal e número de fustes, apresentaram alta acurácia com os valores reais mensurados em campo, assegurando a confiabilidade do método. Além da economia direta de custos operacionais, a redução do número de talhões medidos também mitiga desafios como a escassez de mão de obra especializada para medições em grandes áreas florestais.

**Palavras-chave:** Inventário Florestal Contínuo; Dupla Amostragem; Meta-heurística; Modelos de Crescimento e Produção.

## ABSTRACT

The Continuous Forest Inventory (CFI) is the main method used for monitoring *Eucalyptus* sp. plantations in Brazil, enabling accurate estimates of wood volume and other dendrometric variables essential for strategic planning in the forestry sector. However, the periodic remeasurement of permanent plots at a fixed intensity of one plot per 10 hectares represents a high operational cost for companies. Given this scenario, this study proposes an alternative approach to the traditional CFI, called Optimized Forest Inventory (OFI), which aims to reduce the number of measured stands throughout the forest cycle without compromising the precision and accuracy of estimates. The developed method integrates concepts of double sampling, statistics, optimization, and growth and yield models. Additionally, a technique is presented to estimate other inventory variables while ensuring their consistency with the estimated volume. The results showed that the OFI enabled an average reduction of 50% in the number of stands measured annually from the age of 4 years onward, while maintaining high agreement with the estimates obtained through the traditional CFI. The estimates of volume, dominant height, basal area and survival exhibited high accuracy compared to field-measured values, ensuring the reliability of the method. Beyond direct operational cost savings, the reduction in the number of measured stands also mitigates challenges such as the scarcity of specialized labor for large-scale field measurements.

**Keywords:** Continuous Forest Inventory; Double Sampling; Metaheuristics; Growth and Yield Models.

## 1. INTRODUÇÃO

As florestas de *Eucalyptus* sp. são objeto de monitoramento contínuo ao longo do tempo por meio de inventários florestais, desempenhando um papel crucial no fornecimento de madeira para as indústrias de base florestal no Brasil. Esse monitoramento visa possibilitar, a partir de uma amostra, a determinação ou estimativa de características de interesse da floresta, seja essa quantitativa ou qualitativa (Raimundo *et al.*, 2017). Estas informações são essenciais para calcular o estoque atual de madeira, avaliar o crescimento e são base para modelos de crescimento e produção que possibilitam realizar a projeção da produção florestal futura, informação indispensável para o planejamento estratégico das empresas do setor (Guedes *et al.*, 2012; McTague; Scolforo, J.; Scolforo, H., 2022).

O método de amostragem mais comum para este fim no Brasil é o Inventário Florestal Contínuo (IFC) (Guedes *et al.*, 2012; Raimundo *et al.*, 2017). O IFC é caracterizado pelo uso exclusivo de parcelas permanentes, comumente instaladas aos 2 anos de idade da floresta e remedidas até o ano anterior a colheita (McTague; Scolforo, J.; Scolforo, H., 2022). A intensidade amostral do IFC deve ser definida em função da variabilidade da população florestal, do erro amostral admitido e da probabilidade de confiança fixada (Péllico Netto e Brena, 1997). No entanto, tradicionalmente, no IFC a intensidade amostral utilizada é a de 1 parcela a cada 10 hectares (Raimundo *et al.*, 2017) e os custos associados à instalação, manutenção e medição destas parcelas representam um ônus financeiro considerável (Scolforo e Mello, 2006).

Neste contexto, outras formas de amostragem se apresentam como alternativa ao IFC tradicional. Von Lüpke, Hansen e Saborowski (2012), por exemplo, apresentaram um método de amostragem em três fases para o IFC, no qual a integração da remedição parcial das parcelas e a atualização das estimativas por meio de um modelo de crescimento e produção, resultou em uma redução expressiva na intensidade amostral. McTague, Scolforo, J. e Scolforo, H. (2022) elaboraram um método de estimativa das variáveis do inventário ao combinar modelos avançados de crescimento e produção com a amostragem por reposição parcial, onde esta abordagem permitiu reduzir custos por meio da alocação de parcelas temporárias de medição simplificada.

Este estudo, então, propõe uma mudança de paradigma via introdução de uma nova forma de realizar inventário florestal contínuo. A abordagem desenvolvida integra técnicas de

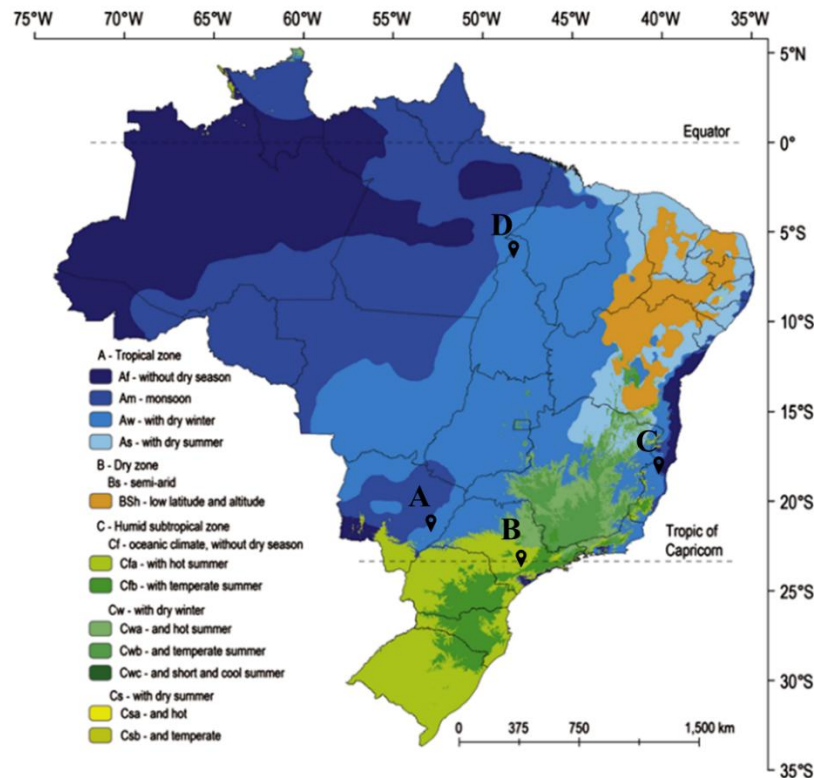
dupla amostragem, algoritmos de simulação, meta-heurísticas e modelos de crescimento e produção, visando a redução do número de talhões medidos ao longo do ciclo da floresta, sem comprometer a qualidade das estimativas. Além disto, uma abordagem de compatibilização do método proposto com um modelo crescimento e produção é apresentado visando retornar as variáveis dendrométricas comumente mensuradas no IFC.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Caracterização da área de estudo**

A área de estudo abrange plantações comerciais de *Eucalyptus* sp. em diferentes estados do Brasil: São Paulo, Mato Grosso do Sul, Espírito Santo, Bahia, Maranhão e Pará. Essas regiões apresentam uma ampla variedade de zonas climáticas, incluindo Cfa (Clima subtropical úmido, com verões quentes), Cwb (Clima subtropical de altitude com invernos secos e verões amenos), Am (Clima tropical de monção), Af (Clima tropical sem estação seca) e Aw (Clima tropical, com inverno seco) (Alvares *et al.*, 2013). Além disso, as plantações estão distribuídas em regiões que se estendem desde o nível do mar até altitudes de 1100 metros. Por último, a composição do solo na área é de 51% de textura média, 37% de textura argilosa e 12% de textura arenosa.

Figura 1 — Localização das regiões estudadas e caracterização climática do Brasil.



Fonte: Adaptado de Alvares *et al.* (2013).

## 2.2 Caracterização da base de dados

Os dados utilizados neste estudo são provenientes de parcelas permanentes do Inventário Florestal Contínuo (IFC), distribuídas em quatro regiões do território brasileiro, denominadas A, B, C e D (Figura 1). As medições das parcelas tiveram início aos 2 anos de idade das florestas, com remedições anuais até os 6 anos. As parcelas medidas são de formato circular e área de 400 m<sup>2</sup> e foram distribuídas sistematicamente, adotando-se uma intensidade amostral de 1 parcela a cada 10 hectares. Em cada unidade amostral, registrou-se o diâmetro à altura do peito (DAP), 1,3 m acima do solo, de todas as árvores, juntamente com informações qualitativas. Adicionalmente, foram mensuradas as alturas de quatro árvores dominantes, conforme conceito de Assmann (1970), e de outras quatro árvores classificadas como não dominantes. As medições foram processadas no software RStudio (R Core Team, 2023). As alturas das árvores não mensuradas foram estimadas por meio do modelo proposto por Curtis (1967) ajustado por parcela. Para a estimativa do volume do estoque, foram utilizados dados de cubagem disponíveis para cada região e foi empregada a equação de Schumacher e Hall (1933). Além disso, o modelo de crescimento e produção proposto por Scolforo *et al.* (2019a) foi

ajustado, permitindo a projeção do volume para os 7 anos de idade e cálculo do incremento médio anual aos 7 anos de idade (IMA7,  $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ ). As estatísticas descritivas gerais das quatro regiões referentes ao volume comercial com casca (VCCC,  $\text{m}^3/\text{ha}$ ) e ao número de parcelas estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 — Estatística descritivas gerais do volume comercial com casca das quatro regiões de todas as medições ao longo do ciclo.

<b>Região</b>	<b>VCCC (<math>\text{m}^3.\text{ha}^{-1}</math>) Mínimo</b>	<b>VCCC (<math>\text{m}^3.\text{ha}^{-1}</math>) Máximo</b>	<b>Número Parcelas</b>
A	27,5	380,7	251
B	19,8	471,7	341
C	16,4	390,2	149
D	18,1	376,6	481

Fonte: Do autor (2024).

### 2.3 Inventário Florestal Otimizado (IFO)

A metodologia proposta denominada de Inventário Florestal Otimizado (IFO) envolve um redesign do Inventário Florestal Contínuo (IFC) para os plantios de eucalipto no Brasil, apresentando-se como uma alternativa ao IFC convencional. O cerne do IFO reside na medição de apenas 50% dos talhões por estrato, combinado com um algoritmo de simulação utilizando List Sampling, dupla amostragem, otimização e um modelo de crescimento e produção. Esta abordagem permite estimar o volume de todos os talhões do estrato ao longo de todo o ciclo da floresta mantendo a precisão das estatísticas. Além disso, é apresentada uma técnica para a estimativa e compatibilização das demais variáveis coletadas no IFC com o volume estimado pelo método proposto., são elas altura dominante ( $H_{dom}$ , metros), área basal ( $G$ ,  $\text{m}^2$ ) e número de fustes por hectare ( $N$ ,  $N/\text{ha}$ ). Os seguintes passos (Figura 2) são detalhados nas seções subsequentes: (1) definição das premissas e estratificação das áreas, (2) divisão dos talhões do estrato em 2 blocos, (3) aplicação do estimador de dupla amostragem, (4) estimativa dos volumes ao nível de talhão (para os talhões não medidos) por meio da meta-heurística Particle Swan Optimization (PSO), e (5) recuperação e compatibilização entre volume e outras variáveis do inventário.

Figura 2 — Fluxograma ilustrando a abordagem.



Fonte: Do autor (2024).

### 2.3.1 Premissas

A metodologia deve ser aplicada de forma independente para cada estrato, o qual é definido com base na fazenda, no regime de manejo e na classe de idade. O propósito da estratificação é selecionar áreas com características gerais semelhantes, isto é, que apresentem similaridades de sítio (local), geográficas e edafoclimáticas, além de terem sido submetidas a práticas de manejo similares. No entanto, a estratificação é eficiente a partir dos 3 anos de idade da floresta, conforme evidenciado por Raimundo *et al.* (2017), que demonstraram estabilidade na dinâmica entre as árvores em florestas de eucalipto a partir desta idade. Tal fato garante a confiabilidade na definição de estratos produtivos. Portanto, o método proposto sugere que todos os talhões sejam medidos até os 3 anos de idade e após este marco temporal, há um processo de criação de 2 blocos denominados permanente (talhões remeidos anualmente a partir dos 3 anos de idade) e descontinuado (talhões sem remeidições após 3 anos de idade).

### 2.3.2 Divisão dos talhões em blocos

De posse de dados de IFC realizado aos 3 anos de idade, foi implementada a técnica de bootstrap não paramétrico visando selecionar 50% dos talhões de cada estrato. O critério de seleção priorizou os talhões que melhor representassem as características produtivas, além de favorecer talhões com maior área. Foram executadas 1000 simulações de reamostragem dos talhões por estrato, utilizando a técnica de List Sampling conforme descrito por De Vries (1986). No List Sampling, a seleção das amostras ocorre com probabilidades proporcionais à magnitude de uma característica específica da variável de interesse (De Vries, 1986). No

presente estudo, a característica adotada foi uma combinação entre a área do talhão e o delta de VCCC de cada talhão em relação à média de VCCC do estrato (Equação 1).

$$\text{Característica List Sampling} = \left| \frac{\text{Área}_i}{VCCC_i - \overline{VCCC}_{est} + 1} \right| \quad (1)$$

Em que:  $\text{Área}_i$  é a área do talhão  $i$ ;  $VCCC_i$  é o VCCC do talhão  $i$  em  $\text{m}^3/\text{ha}$  e  $\overline{VCCC}_{est}$  é o VCCC médio do estrato em  $\text{m}^3/\text{ha}$ .

Para realizar a amostragem utilizando a técnica de List Sampling, os talhões devem ser inicialmente ordenados com base na característica selecionada. Em seguida, calcula-se a soma acumulada dos valores dessa característica e transforma-se esta soma acumulada em uma escala percentual variando de 0 a 1. Então, sorteia-se aleatoriamente um valor dentro desse intervalo (0 a 1) para determinar o talhão amostrado. Em cada simulação, são selecionados o número de talhões que corresponda, em média, a 50% do total do número de talhões do estrato. Essa amostragem é realizada sem reposição, portanto, após cada amostragem o processo é reiniciado com a reordenação dos talhões, o recálculo da soma acumulada e a conversão para a escala percentual. Ressalta-se que, para estratos com 10 ou mais talhões, foram selecionados 40% dos talhões, enquanto para estratos com menos de 10 talhões, o percentual selecionado foi de 50%. Dessa forma, quanto maior a área do talhão e menor o delta de VCCC do talhão em relação à média do estrato, maior a probabilidade desse talhão ser selecionado nas simulações. Após a amostragem com List Sampling, para cada simulação, é realizado o cálculo do desvio entre a média de VCCC dos talhões selecionados e a média de VCCC de todo o estrato (Equação 2).

$$\text{Desvio} = \left| \left( 1 - \left( \frac{VCCC_j}{\overline{VCCC}_{est}} \right) \right) \times 100 \right| \quad (2)$$

Em que:  $VCCC_j$  é o VCCC médio dos talhões selecionados na simulação  $j$  em  $\text{m}^3/\text{ha}$ ;  $\overline{VCCC}_{est}$  é o VCCC médio de todos os talhões do estrato em  $\text{m}^3/\text{ha}$ .

Os talhões selecionados pela simulação são designados para o Bloco Permanente e o restante são designados para o Bloco Descontinuado. A classificação dos blocos implica que, a partir da medição aos 4 anos de idade, os talhões do Bloco Permanente continuam sendo remedidos anualmente. Já os talhões do Bloco Descontinuado, não são mais medidos após os 3 anos de idade (Tabela 2). A seleção dos talhões que compõem o Bloco Permanente é

fundamental para a aplicação da técnica de Dupla Amostragem, uma vez que as parcelas medidas nesses talhões são responsáveis por representar todo o estrato ao longo do ciclo.

Tabela 2 — Regra de medição dos blocos.

Bloco	Idade Medição (anos)					
	2	3	4	5	6	7
Permanente	x	x	x	x	x	x
Descontinuado	x	x				

Fonte: Do autor (2024).

Com exceção da medição inicial realizada aos 2 e 3 anos de idade, o estrato contará com uma otimização que contemplará aproximadamente 50% dos talhões em cada ano de medição subsequente.

### 2.3.3 Aplicação Dupla Amostragem no estrato

Desta etapa do método em diante, a metodologia descrita a seguir é aplicada anualmente a partir dos 4 anos de idade da floresta. Nesse período, os talhões do Bloco Permanente são medidos em campo, enquanto os talhões do Bloco Descontinuado têm seu volume estimado pelo procedimento detalhado a seguir. Esse método estabelece o processo de obtenção do volume estimado corrigido para todo o estrato, além da recuperação das estimativas de volume ao nível do talhão para o Bloco Descontinuado. Scolforo e Mello (2006) definem a Dupla Amostragem como a utilização de uma amostra abrangente em uma primeira fase do inventário, envolvendo parcelas permanentes e temporárias, o que possibilita uma estimativa eficaz do parâmetro populacional em consideração. Na segunda fase do inventário, apenas uma amostra menor ou subamostra das parcelas permanentes é medida, e posteriormente, por meio do estimador de regressão, é possível obter estimativas do parâmetro populacional para essa segunda fase da amostragem.

No contexto do presente estudo, a primeira medição, realizada aos 3 anos de idade, abrangeu todos os talhões pertencentes ao Bloco Permanente e Descontinuado. Nas medições subsequentes, realiza-se uma segunda amostragem, restringindo-se apenas à medição dos talhões do Bloco Permanente. Dessa forma, o estimador de Dupla Amostragem foi empregado para estimar a média de volume de todo o estrato a partir dos 4 anos de idade. Para cada estrato, foi ajustado um modelo utilizando apenas parcelas medidas do Bloco Permanente (Equação 2).

$$VOL_{p_i} = \beta_0 + \beta_1 * VOL_{p_{3anos}} + e_i \quad (3)$$

Em que:  $VOL_{p_i}$  é o VCCC (m<sup>3</sup>/ha) medido dos talhões do Bloco Permanente na idade  $i$  (m<sup>3</sup>/ha);  $VOL_{p_{3anos}}$  é o VCCC (m<sup>3</sup>/ha) medido dos talhões do Bloco Permanente aos 3 anos de idade (m<sup>3</sup>/ha);  $i = 4, \dots, n$ , onde  $i$  representa a idade a ser estimado o volume dos talhões do Bloco Descontinuado;  $\beta_0, \beta_1$  são os parâmetros do modelo; e  $e_i$  é o erro associado da regressão.

Com os parâmetros do modelo ajustados na Equação 3, a etapa seguinte foi aplicar o Estimador de Dupla Amostragem para encontrar o VCCC (m<sup>3</sup>/ha) corrigido do estrato na idade desejada (Equação 4).

$$VOL_{DA_i} = VOL_{p_i} + \beta_1 * (VOL_{p_{3anos}} - VOL_{p_{d_{3anos}}}) \quad (4)$$

Em que:  $VOL_{DA_i}$  é o VCCC (m<sup>3</sup>/ha) médio do estrato corrigido pelo estimador de dupla amostragem na idade  $i$ ;  $VOL_{p_i}$  é a média do VCCC (m<sup>3</sup>/ha) dos talhões medidos do Bloco Permanente na idade  $i$ ;  $VOL_{p_{3anos}}$  é a média do VCCC (m<sup>3</sup>/ha) dos talhões medidos do Bloco Permanente aos 3 anos de idade;  $VOL_{p_{d_{3anos}}}$  é a média do VCCC (m<sup>3</sup>/ha) dos talhões medidos do Bloco Permanente e Descontinuado aos 3 anos de idade;  $\beta_1$  é o parâmetro ajustado na Equação 2.

Considerando um estrato hipotético, após a aplicação das Equações 3 e 4, a estrutura apresentada na Tabela 3 é obtida.

Tabela 3 — Ilustração dos resultados obtidos para um estrato hipotético após aplicação do estimador de dupla amostragem.

Estrato	Bloco	Talhão	VCCC (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )		
			3 anos de idade	5 anos de idade	Média Estrato (DA)
XX	Permanente	C	149	250	252,3
XX	Permanente	E	154	257	252,3
XX	Descontinuado	A	149	-	252,3
XX	Descontinuado	D	156	-	252,3

Fonte: Do autor (2024).

Após a implementação da metodologia descrita, o volume determinado pelo estimador de Dupla Amostragem representa a melhor média disponível para o estrato na idade calculada. No entanto, a obtenção do volume médio do estrato, embora útil para análises gerais, é

insuficiente para atender às demandas operacionais do setor florestal. Para um planejamento eficiente no curto, médio e longo prazo, as empresas necessitam de estimativas detalhadas ao nível do talhão, possibilitando uma gestão mais precisa dos recursos florestais e a tomada de decisão estratégica nas atividades de colheita, logística e silvicultura.

### 2.3.4 Recuperação da informação ao nível do talhão

Nesta etapa, a meta-heurística Particle Swarm Optimization (PSO) foi empregada visando recuperar o volume ao nível do talhão. O PSO, desenvolvido originalmente por Kennedy e Eberhart (1995), é uma meta-heurística de otimização global, pertencente à família de algoritmos fundamentados no conceito de inteligência de enxame. O método de recuperação do volume ao nível do talhão baseou-se na aplicação da Equação 2, ajustada na etapa anterior, para estimar o volume dos talhões do Bloco Descontinuado na idade subsequente (4, 5, 6 anos ou mais). Essa estimativa é viabilizada pelo fato de que todos os talhões possuem medições aos 3 anos de idade, valor correspondente ao coeficiente do modelo. Em seguida, calculou-se a média MOD, que corresponde à média do VCCC do estrato, considerando o volume medido nos talhões do Bloco Permanente e o volume estimado, por meio da Equação 3, para os talhões do Bloco Descontinuado. A média MOD difere da média obtida pelo estimador de Dupla Amostragem, que representa a estimativa mais precisa da média do estrato.

Dessa maneira, a estratégia adotada consiste em modificar a equação ajustada (Equação 3) pela introdução de um parâmetro adicional ( $\alpha$ ), que multiplica o parâmetro  $\beta_0$  (Equação 5). O objetivo do algoritmo PSO foi determinar o valor ótimo de  $\alpha$ , minimizando a perturbação do modelo original e assegurando que a diferença entre a média MOD (calculada com a Equação 5) e a média estimada pelo estimador de Dupla Amostragem seja igual a zero.

$$VOL_{p_i} = \beta_0 * \alpha + \beta_1 * VOL_{p_{3anos}} + e_i \quad (5)$$

Em que:  $\alpha$  é o parâmetro inserido na equação e encontrado pelo algoritmo PSO; todos os termos restantes já foram definidos anteriormente.

Uma vez determinado o valor do  $\alpha$ , a Equação 5 foi aplicada para calcular e recuperar a estimativa de volume para os talhões do Bloco Descontinuado. Para a aplicação do PSO no presente estudo, foi necessário definir os parâmetros iniciais que influenciam a busca pela

solução ótima. O número de partículas do enxame (tamanho da população) foi de 700 indivíduos e o número de iterações (critério de parada) foi de 50. O peso de inércia adotado seguiu a estratégia de redução linear proposta por Shi e Eberhart (1998), na qual o valor da inércia é gradualmente reduzido a cada iteração (Equação 6). Os autores estabeleceram os limites superiores e inferiores do peso de inércia em  $w_{max} = 0,9$  e  $w_{min} = 0,4$ , respectivamente. Por fim, os coeficientes cognitivo ( $c_1$ ) e social ( $c_2$ ) foram ambos definidos como 2, como sugerido por Kennedy e Eberhart (1995), de modo a promover uma interação eficiente entre a busca local (baseada nas melhores soluções individuais) e a busca global (baseada nas melhores soluções do enxame).

$$w^{k+1} = w_{max} - k \left( \frac{w_{max} - w_{min}}{k_{max}} \right) \quad (6)$$

Em que  $k_{max}$  é o número máximo de iterações,  $k$  representa a iteração atual,  $w^{k+1}$  é o peso da inércia; todos os termos restantes definidos anteriormente.

### 2.3.5 Estimativa e compatibilização de outros atributos do IFC

Nesta seção é apresentada a técnica utilizada para realizar a estimativa de outras variáveis do inventário, assim como a compatibilização dessas com o volume estimado de cada talhão na Equação 5. A técnica consiste na aplicação dos procedimentos descritos nas Seções 2.3.3 (aplicação da dupla amostragem no estrato) e 2.3.4 (recuperação da informação ao nível do talhão). No entanto, a estimativa é direcionada para a altura dominante e para o número de fustes, em lugar do volume, nas Equações 3, 4 e 5. Ao final deste processo, obteve-se a estimativa dessas duas variáveis para todos os talhões; contudo, não há garantia de compatibilização entre elas e o volume estimado. Para que a compatibilização seja possível, o modelo de crescimento e produção descrito por Scolforo *et al.* (2019a) foi utilizado (Tabela 4).

Tabela 4 — Equações de crescimento e produção descritas por Scolforo et al. (2019a).

Fórmula	Equação
$N_2 = N_1 e^{\gamma_1(I_2 - I_1)}$	7
$Hdom_2 = a [1 - \exp(bI_2)]^{\frac{\ln(\frac{Hdom_1}{a})}{\ln(1 - \exp(bI_1))}}$	8
$\ln(G_2) = \ln(G_1) + \beta_1\left(\frac{1}{I_2} - \frac{1}{I_1}\right) + \beta_2(\ln(Hdom_2) - \ln(Hdom_1)) + \beta_3(ES_2 - ES_1)$	9
$\ln(V) = \alpha_0 + \alpha_1(\ln(Hdom_2)) + \alpha_2(\ln(G_2))$	10

Fonte: Do autor (2025).

$N_1$  e  $N_2$  é o número de fustes/ha nas idades 1 e 2, respectivamente;  $I_1$  e  $I_2$  é a idade (anos) nas idades 1 e 2, respectivamente;  $Hdom_1$  e  $Hdom_2$  é a altura dominante (metros) nas idades 1 e 2, respectivamente;  $G_1$  e  $G_2$  é a área basal (m<sup>2</sup>/ha) nas idades 1 e 2, respectivamente;  $ES_1$  e  $ES_2$  é o espaçamento relativo ( $ES = \frac{\sqrt{\frac{10000}{N}}}{Hdom}$ ) nas idades 1 e 2, respectivamente;  $V$  é o volume comercial com casca (m<sup>3</sup>/ha);  $\gamma_1$  é o coeficiente do modelo de sobrevivência;  $a$ ,  $b$  são os coeficientes do modelo de altura dominante;  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  são os coeficientes do modelo de área basal;  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  são os coeficientes do modelo de volume comercial.

Substituindo a Equação 9 na Equação 10, obtém-se:

$$\ln(V) = \alpha_0 + \alpha_1(\ln(Hdom_2)) + \alpha_2 \ln(G_1) + \beta_1\left(\frac{1}{I_2} - \frac{1}{I_1}\right) + \beta_2(\ln(Hdom_2) - \ln(Hdom_1)) + \beta_3(ES_2 - ES_1) \quad (11)$$

Rearranjando a Equação 11, obtém-se:

$$V_2 = \exp\left(\alpha_0 + \alpha_1(\ln(Hdom_2)) + \alpha_2 \ln(G_1) + \beta_1\left(\frac{1}{I_2} - \frac{1}{I_1}\right) + \beta_2(\ln(Hdom_2) - \ln(Hdom_1))\right) + \beta_3\left(\left(\frac{\sqrt{\frac{10000}{N_2}}}{Hdom_2}\right) - \left(\frac{\sqrt{\frac{10000}{N_1}}}{Hdom_1}\right)\right) \quad (12)$$

Onde  $V$  passa a ser  $V_2$  visto que as variáveis utilizadas na Equação 10 estão na idade 2. Na Equação 12 são inseridas duas variáveis,  $Var_1$  e  $Var_2$ , multiplicando  $Hdom_2$  e  $N_2$ , respectivamente, obtendo a Equação 13:

$$\begin{aligned}
V_2 = \exp & \left( \alpha_0 + \alpha_1(\ln(Hdom_2)Var_1) + \alpha_2 \ln(G_1) + \beta_1 \left( \frac{1}{I_2} - \frac{1}{I_1} \right) + \beta_2 ((\ln(Hdom_2)Var_1) - \ln(Hdom_1)) \right. \\
& \left. + \beta_3 \left( \left( \frac{\sqrt{\frac{10000}{N_2 Var_2}}}{Hdom_2 Var_1} \right) - \left( \frac{\sqrt{\frac{10000}{N_1}}}{Hdom_1} \right) \right) \right) \quad (13)
\end{aligned}$$

A compatibilização foi realizada por meio da iteração das variáveis  $Var_1$  e  $Var_2$ , visando alterar  $Hdom_2$  e  $N_2$  para que o resultado obtido na Equação 13 seja igual ao volume estimado pela dupla amostragem ( $V_2 = VOL_{DA}$ ). Após a convergência da iteração, os valores corrigidos de  $Hdom_2$  e  $N_2$  são determinados, permitindo, por meio da Equação 9, a obtenção da estimativa compatibilizada da área basal ( $G_2$ ). Assim, garantiu-se consistência entre a estimativa do volume e as demais variáveis do inventário ( $Hdom$ ,  $N$  e  $G$ ). Foram necessárias restrições biológicas sobre as variáveis  $Var_1$  e  $Var_2$  na iteração. Como  $Var_1$  multiplica a altura dominante, seu espaço de busca foi de 0,6 até 1,5, permitindo tanto a redução quanto o aumento desse parâmetro. Já para  $Var_2$ , que atua como fator de ajuste do número de fustes, o intervalo foi restrito entre 0,8 e 0,99, uma vez que, biologicamente, não é possível que um plantio aumente o número de fustes. Além disso, a iteração impõe regras que minimizam a perturbação nos valores de  $Hdom$  e  $N$ , garantindo maior consistência nas estimativas.

## 2.4 Validação da abordagem proposta

A validação da abordagem proposta foi realizada por meio da comparação entre o método tradicional (IFC) e o método proposto (IFO) em três aspectos principais: i) redução do esforço amostral, quantificando a redução de medições no campo proporcionada pelo IFO; ii) acurácia das estimativas de volume, avaliando os desvios em relação ao IFC de forma geral, por idade, ao nível do estrato e ao nível do talhão, tanto em termos médios quanto na distribuição dos erros; e iii) consistência e acurácia das estimativas das outras variáveis do inventário (altura dominante, área basal e número de fustes), considerando os mesmos níveis de análise do volume.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Redução de talhões medidos no design do IFO

Para as idades de 4, 5 e 6 anos, a redução em número de talhões medidos, em média, foi de 55%. As regiões D e C apresentaram a maior redução, seguidas pelas regiões A e B. Já considerando em área (hectares), a redução foi de 50% de área medida, onde as regiões D e A apresentaram maior redução, seguidas pelas regiões C e B (Tabela 5).

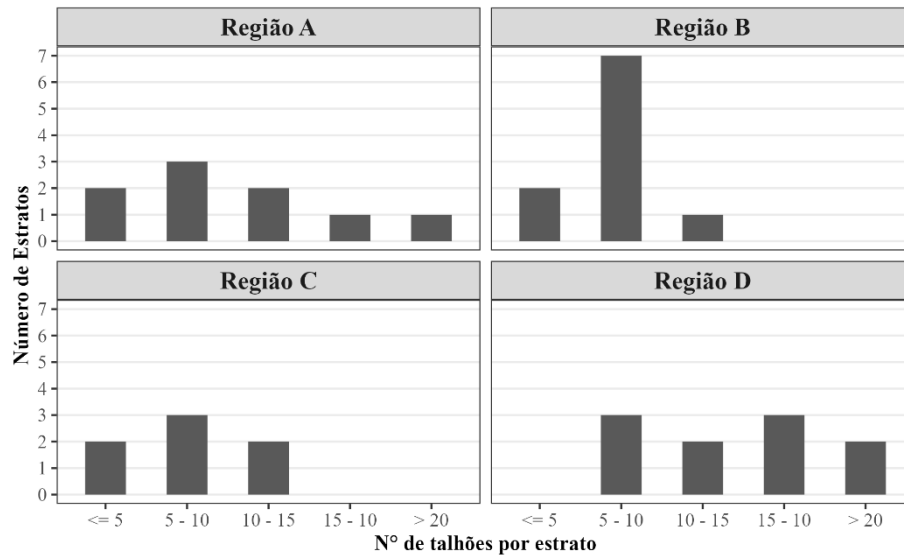
Tabela 5 — Redução em percentual do número de talhões medidos e da área para as 4 regiões por ano.

Região	Bloco	Área (ha)	Área (%)	Nº Talhões	Talhões (%)
A	Descontinuado	2.537	52%	53	55%
A	Permanente	2.344	48%	43	45%
B	Descontinuado	1.519	45%	37	51%
B	Permanente	1.890	55%	35	49%
C	Descontinuado	1.007	47%	32	57%
C	Permanente	1.135	53%	24	43%
D	Descontinuado	3.160	54%	87	58%
D	Permanente	2.745	46%	64	42%

Fonte: Do autor (2025).

A diferença na redução entre as regiões está associada à variação no número e no tamanho dos estratos. Na seleção dos talhões do Bloco Permanente, adotou-se o critério de estratos com 10 ou mais talhões, selecionar 40% dos talhões, enquanto em estratos com menos de 10 talhões, o percentual aumenta para 50%. Sendo assim, as regiões com estratos maiores tendem a ter a maior redução em número de talhões (Figura 3).

Figura 3 — Distribuição do número de estratos por classe de número de talhões para as 4 regiões.



Fonte: Do autor (2025).

### 3.2 Contraste da acurácia do IFO vs IFC

A comparação entre as estimativas de volume obtidas pelo IFC - onde houve a medição de todos os talhões – e pelo IFO, método proposto neste estudo, foi realizada para as quatro regiões e para as idades de 4, 5 e 6 anos da floresta. Os resultados demonstram que a abordagem otimizada apresentou estimativas de volume muito próximas às do IFC tradicional, com variações que diferem entre as regiões analisadas. Na média geral, a estimativa do volume apresentou desvios de 0,10%, 0,13% e 0,06% para as idades de 4, 5 e 6 anos, respectivamente (Tabela 6).

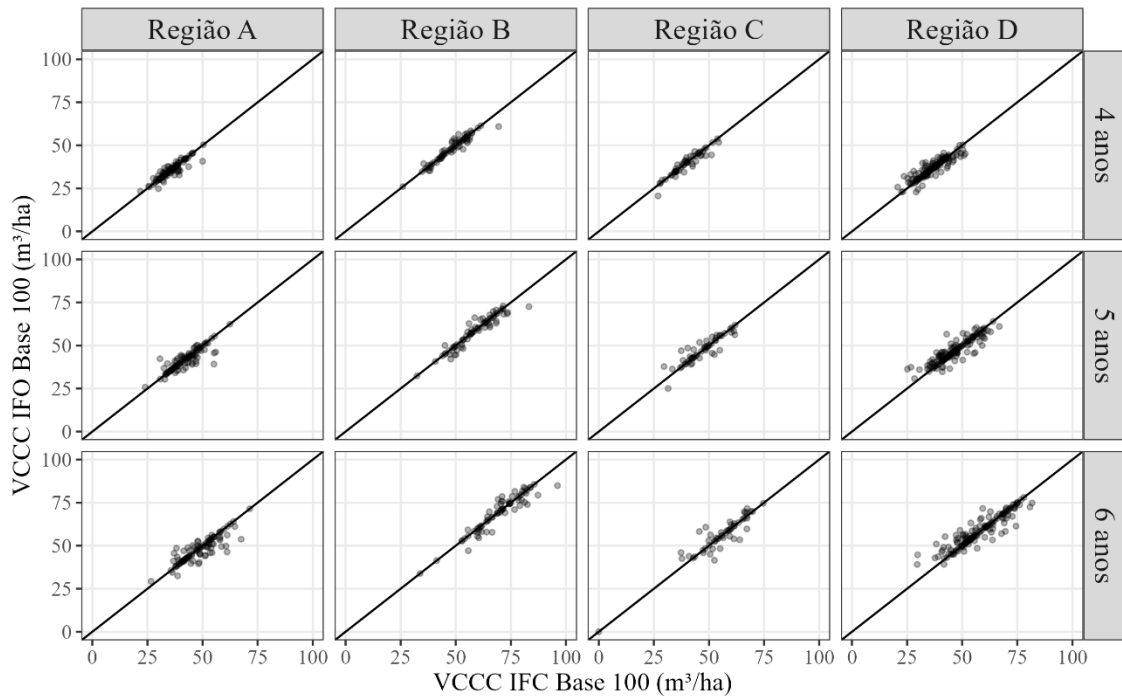
Tabela 6 — Contraste da estimativa do volume comercial com casca (VCCC) na base 100 do IFC vs IFO das quatro regiões ao longo das idades de 4, 5 e 6 anos.

Região	4 anos			5 anos			6 anos		
	IFC	IFO	Desvio (%)	IFC	IFO	Desvio (%)	IFC	IFO	Desvio (%)
A	100	99,9	0,1	100	99,3	0,7	100	98,4	1,6
B	100	99,7	0,3	100	99,1	0,9	100	99,3	0,7
C	100	99,3	0,7	100	100,7	-0,7	100	100,7	-0,7
D	100	100,3	-0,3	100	100,5	-0,5	100	101,1	-1,1
<b>Média</b>	<b>100</b>	<b>99,9</b>	<b>0,10</b>	<b>100</b>	<b>99,8</b>	<b>0,13</b>	<b>100</b>	<b>100,0</b>	<b>0,06</b>

Fonte: Do autor (2025).

Ao analisar a comparação ao nível do talhão, as estimativas do IFO demonstraram alta confiabilidade e estabilidade em relação ao IFC nas três idades avaliadas. Não foi observada nenhuma tendência sistemática de superestimativa ou subestimativa, independentemente da região ou da idade considerada (Figura 4).

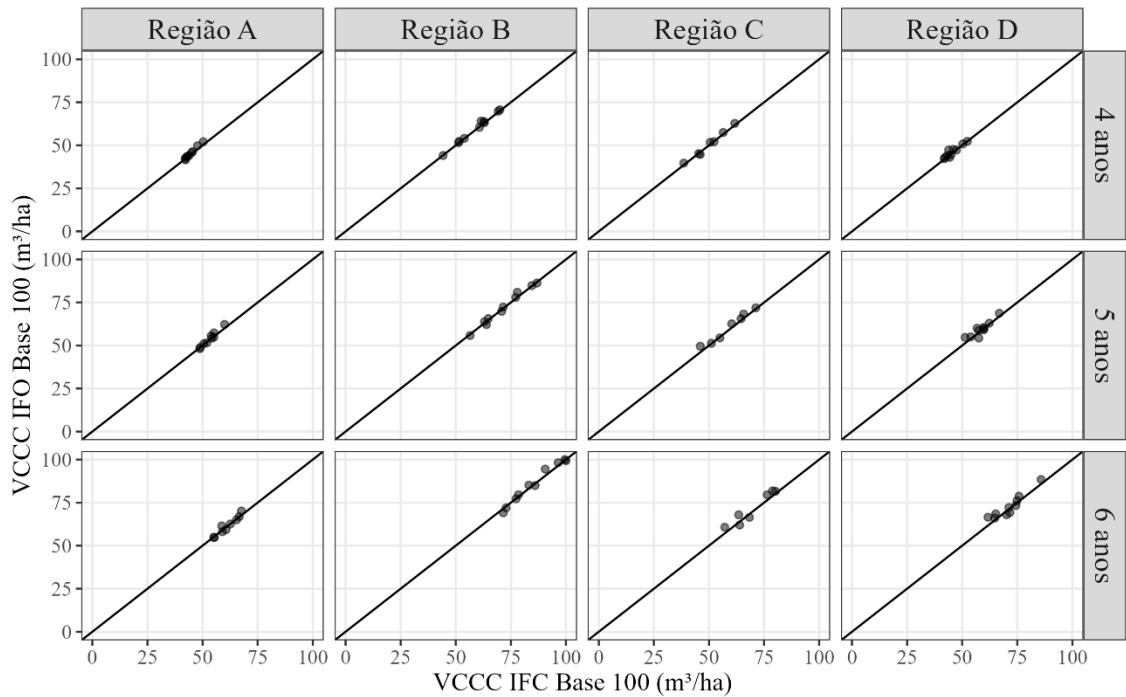
Figura 4 — Gráfico 1 x 1 da estimativa do volume comercial com casca na base 100 do IFC vs IFO para as quatro regiões e 3 idades avaliadas ao nível do talhão.



Fonte: Do autor (2025).

Na prática, a precisão do inventário é normalmente avaliada ao nível do estrato. Dessa forma, essa comparação reforça a estabilidade do método proposto, evidenciando a consistência na manutenção da precisão das estimativas em diferentes escalas de análise (Figura 5). Mesmo com a redução da medição de aproximadamente 50% dos talhões nas 3 idades avaliadas no IFO, é possível observar que a metodologia proposta conseguiu capturar a tendência de crescimento da floresta, reduzindo o esforço amostral sem comprometer a precisão das estimativas.

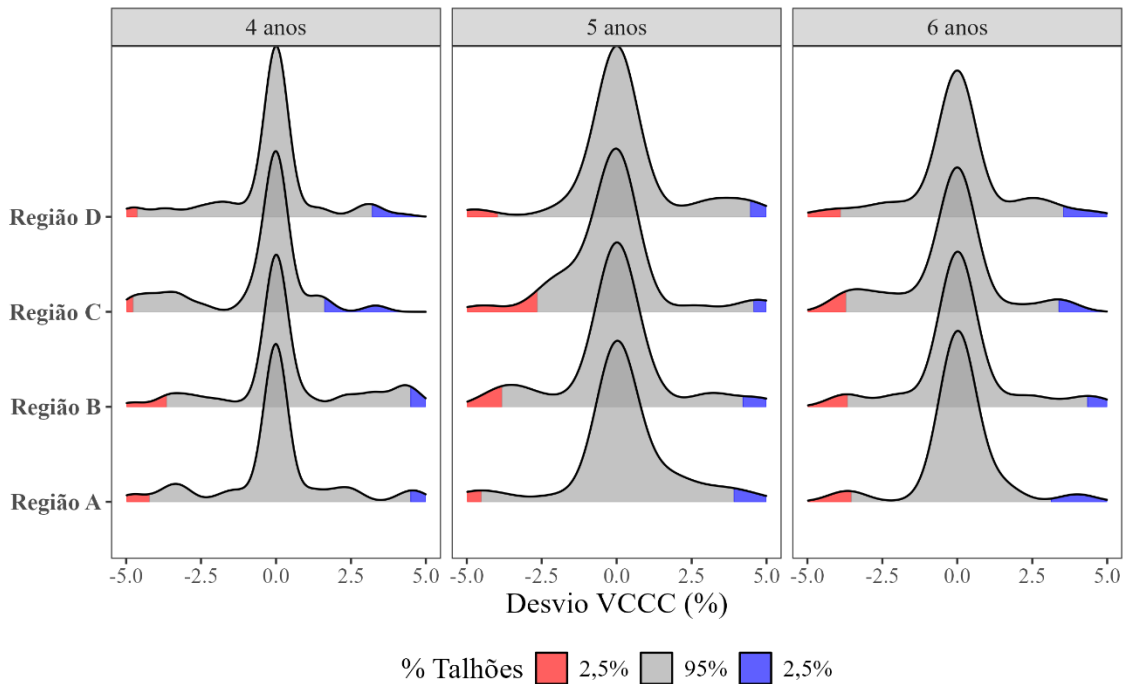
Figura 5 — Gráfico 1 x 1 da estimativa do volume comercial com casca na base 100 do IFC vs IFO para as quatro regiões e 3 idades avaliadas ao nível do estrato.



Fonte: Do autor (2025).

O método foi capaz de captar as variações tanto para o nível do talhão quanto para o nível de estrato analisado. A Figura 6 apresenta a distribuição dos desvios de VCCC entre o IFO e o IFC, evidenciando que independentemente da região e da idade avaliada a maior parte dos desvios se concentra no intervalo de -2,5% a 2,5%, o que representa 70% dos talhões em cada cenário analisado, em média.

Figura 6 — Distribuição dos desvios do VCCC ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) estimado pelo IFC e do VCCC ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) estimado pelo IFO ao nível do talhão, para as quatro regiões e três idades avaliadas.



Fonte: Do autor (2025).

### 3.3 Acurácia da estimativa de outros atributos do inventário

Como todos os talhões foram mensurados em todas as idades, foi possível comparar diretamente os valores das variáveis medidas em campo com aqueles estimados e compatibilizados com o volume pelo método proposto na Seção 2.3.5. As variáveis analisadas incluem altura dominante (Hdom, m), área basal (G,  $\text{m}^2$ ) e número de fustes por hectare (N° Fustes/ha). As estimativas apresentaram uma forte aderência às medições de campo, com desvios extremamente baixos em todas as regiões e idades analisadas. No conjunto total dos dados, os desvios entre as estimativas e os valores observados foram de -0,08% para Hdom, -0,2% para G e 0,4% para N° Fustes (Tabela 7).

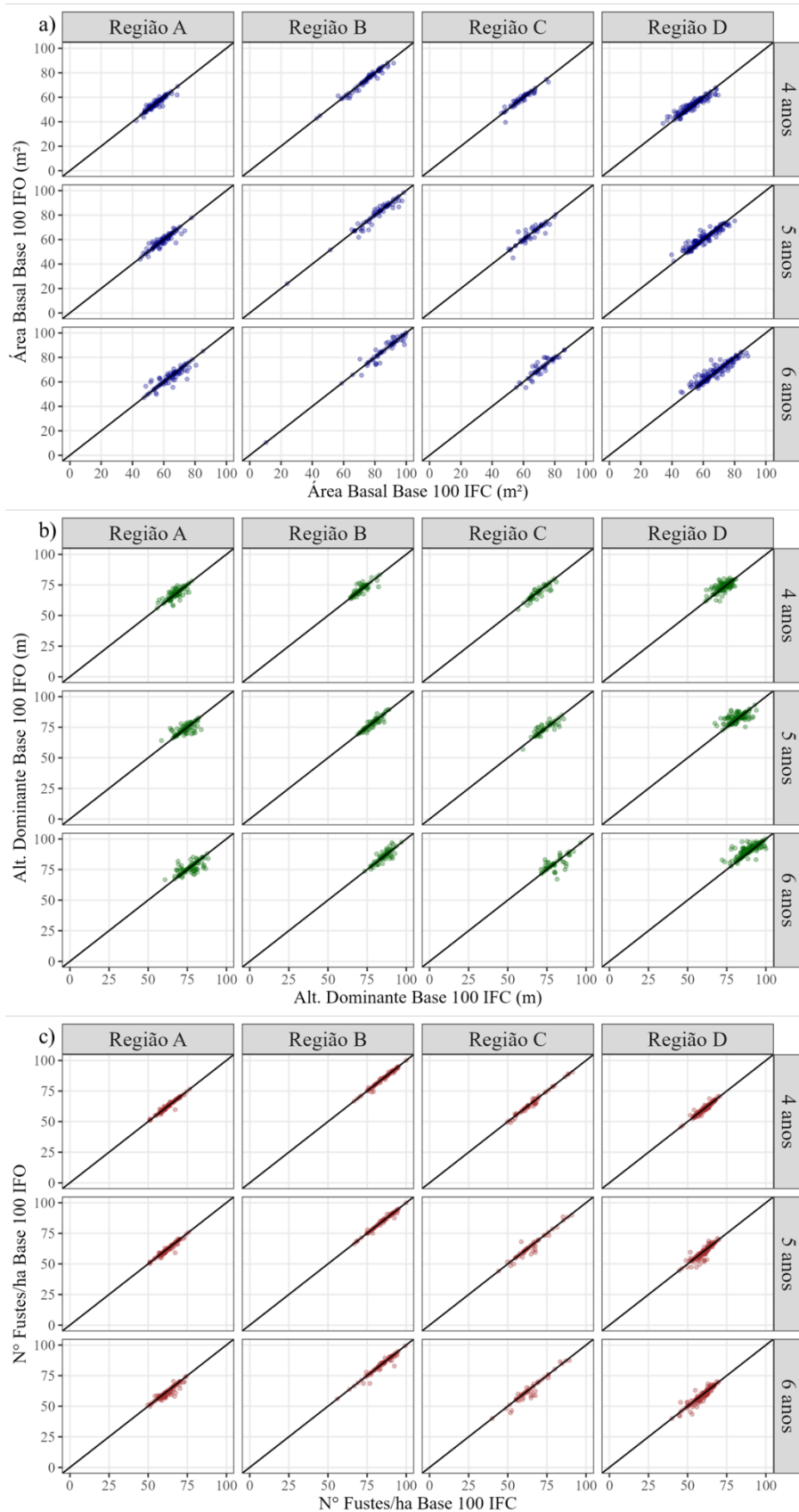
Tabela 7 — Valores medidos no campo (IFC) e valores estimados (IFO) na base 100 das variáveis altura dominante (Hdom), área basal (G) e número de fustes (N° Fustes) das quatro regiões ao longo das idades de 4, 5 e 6 anos.

Região	Idade (anos)	Hdom (m)			G (m <sup>2</sup> )			N° Fustes/ha		
		IFC	IFO	Δ%	IFC	IFO	Δ%	IFC	IFO	Δ%
A	4	100	100,1	-0,1	100	100,0	0,0	100	100	0,1
	5	100	100,1	-0,1	100	100,3	-0,3	100	99	0,7
	6	100	99,6	0,4	100	100,6	-0,6	100	99	1,5
B	4	100	99,7	0,3	100	99,4	0,6	100	100	0,2
	5	100	99,4	0,6	100	99,2	0,8	100	100	0,1
	6	100	99,7	0,3	100	99,4	0,7	100	100	0,4
C	4	100	99,0	1,0	100	100,0	0,0	100	100	0,4
	5	100	99,7	0,3	100	100,8	-0,8	100	100	0,1
	6	100	99,5	0,5	100	101,0	-1,0	100	100	0,2
D	4	100	100,3	-0,3	100	100,4	-0,4	100	100	0,2
	5	100	100,5	-0,4	100	100,7	-0,7	100	99	0,6
	6	100	101,3	-1,3	100	101,1	-1,1	100	99	0,9

Fonte: Do autor (2025).

A Figura 7 permite avaliar o contraste da estimativa na base 100 das 3 variáveis nas quatro regiões e 3 idades estudadas ao nível do talhão. De maneira geral, observa-se pouca ou nenhuma tendência de sub ou superestimativa das variáveis estimadas e compatibilizadas com o volume. Esses resultados reforçam a robustez da abordagem IFO em diferentes regiões do país e em diferentes idades.

Figura 7 — Gráfico 1 x 1 da estimativa da área basal (a), altura dominante (b) e número de fustes (c) na base 100 estimados no IFO vs medidos no IFC para as quatro regiões e 3 idades avaliadas ao nível do talhão.



Fonte: Do autor (2025).

#### 4. DISCUSSÃO

Neste estudo, foi desenvolvido um novo método para a realizar inventário florestal de plantios de *Eucalyptus sp.* no Brasil, propondo uma alternativa ao Inventário Florestal Contínuo (IFC) tradicional. O método, denominado Inventário Florestal Otimizado (IFO), integra conceitos avançados de amostragem, modelos de crescimento e produção florestal, estatística e otimização, com o objetivo de reduzir o número de talhões medidos em campo sem comprometer a precisão e a acurácia das estimativas do inventário. Os resultados demonstraram uma redução média de aproximadamente 50% do número de talhões medidos em cada ano de medição a partir dos 4 anos de idade da floresta. Mesmo com essa redução, as estimativas do volume, altura dominante, área basal e número de fustes apresentaram alta aderência aos valores reais mensurados em campo, evidenciando a eficácia do método proposto. Além disso, foi apresentada e implementada uma técnica que garante a compatibilização entre o volume e as demais variáveis do inventário, assegurando a consistência entre as estimativas.

A redução do número de talhões medidos no campo representa um avanço significativo em termos de eficiência operacional e redução de custos no inventário florestal. Diferentemente de estudos anteriores que focaram na diminuição da intensidade amostral dentro dos talhões, reduzindo o número de parcelas mensuradas (Raimundo *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2023), o método proposto neste estudo elimina a necessidade de medição diretamente de talhões inteiros, proporcionando uma economia ainda maior. Essa abordagem reduz diretamente os custos operacionais, além de mitigar um desafio crescente no setor florestal no Brasil: a escassez de mão de obra para medições de grandes blocos. Com um menor número de talhões a serem visitados, a necessidade de profissionais capacitados para a coleta de dados é reduzida, permitindo um uso mais estratégico da força de trabalho disponível.

Similarmente ao método proposto, Von Lüpke, Hansen e Saborowski (2012) apresentaram um procedimento de amostragem em três fases para o IFC, no qual a combinação da remedição parcial e atualização das estimativas das parcelas com um modelo de crescimento e produção permitiu uma redução significativa na intensidade amostral, porém os resultados demonstraram que houve impacto na precisão da estimativa da variável de interesse. O método proposto no presente trabalho demonstrou, além da redução do esforço amostral, elevada acurácia e precisão na estimativa das variáveis do inventário, com valores de volume muito próximos aos medidos em campo em todas as idades avaliadas. Mesmo para a idade mais avançada de 6 anos, as estimativas mantiveram alta aderência aos valores reais. Como a técnica

aplicada de dupla amostragem adotada utiliza as medições aos 3 anos como sendo a primeira fase do inventário para todas as idades subsequentes (4, 5 e 6 anos), esse resultado corrobora os achados de Raimundo *et al.* (2017), que demonstraram uma forte correlação entre as medições aos 3 anos e as idades posteriores no crescimento do povoamento.

Assim como no estudo de McTague, Scolforo, J. e Scolforo, H. (2022), o presente trabalho desenvolveu uma técnica para a estimativa e compatibilização do volume estimado com variáveis chave no inventário. Essa técnica permite estimar com alta acurácia a altura dominante (Hdom), área basal (G) e número de fustes por hectare (Nº Fustes), apresentando alta aderência aos valores mensurados em campo. Essa capacidade amplia o escopo das estimativas para os talhões não mensurados. Através do modelo de árvore individual proposto por Scolforo *et al.* (2019b), é possível obter a estimativa de outras variáveis ao nível do talhão como DAP (diâmetro à altura do peito) e HT (altura total), assim como o sortimento de múltiplos produtos da floresta com a aplicação de um modelo de afilamento. Dessa forma, o IFO se apresenta como uma ferramenta viável para empresas do setor florestal, garantindo um alto nível de detalhamento e precisão para as áreas não medidas – fator imprescindível para o planejamento florestal.

Uma oportunidade de melhoria ao método proposto é a integração de dados de sensoriamento remoto, visando aumentar ainda mais a precisão e a confiabilidade. O uso de índices espectrais e métricas derivadas de sensores orbitais podem aprimorar a técnica de dupla amostragem, permitindo uma melhor caracterização da variabilidade das florestas, reduzindo a incerteza das estimativas. Além disso, possibilita possuir uma métrica das florestas não medidas após os 3 anos de idade. Diversos estudos demonstram que a incorporação de variáveis espectrais pode melhorar significativamente a modelagem de atributos dendrométricos (Brito *et al.*, 2021; Da Silva *et al.*, 2021; Dos Reis *et al.*, 2018; Le Maire *et al.*, 2011; Powell *et al.*, 2010), o que sugere que a combinação dessas informações com a abordagem otimizada poderia resultar em ganhos na acurácia das estimativas. Além disso, a sugestão para estudos futuros é se essa estratégia poderia viabilizar a limitação das medições de campo até os 3 anos de idade, utilizando dados de sensoriamento remoto para atualizar e refinar as estimativas ao longo do restante do ciclo. Isso reduziria ainda mais os custos operacionais e a dependência de medições presenciais, tornando o processo de inventário ainda mais eficiente e escalável para grandes áreas florestais.

## 5. CONCLUSÃO

O método proposto, denominado Inventário Florestal Otimizado (IFO), demonstrou ser uma alternativa viável e eficiente ao Inventário Florestal Contínuo (IFC), permitindo uma redução significativa no número de talhões medidos sem comprometer a precisão e a acurácia das estimativas do inventário. A abordagem combinou técnicas avançadas de amostragem, estatística e otimização para garantir a compatibilização entre as variáveis mensuradas, assegurando estimativas consistentes ao longo do ciclo da floresta. Dessa forma, o IFO se apresenta como uma ferramenta promissora para o setor florestal, promovendo um inventário mais eficiente, acessível e adaptável às crescentes demandas tecnológicas e operacionais. Ao mesmo tempo, permite manter a qualidade das estimativas e torna o processo mais viável economicamente e sustentável a longo prazo, além de mitigar desafios operacionais, como a crescente escassez de mão de obra de campo.

## REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. et al. **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ASSMANN, Ernst. **Principles of forest yield study: Studies in the organic production, structure, increment and yield of Forest Stands**. 1970.
- BRITO, Vitor Vannozzi et al. **Evaluating remote sensing indices as potential productivity and stand quality indicators for Pinus radiata plantations**. 2021.
- CURTIS, Robert O. **Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir**. Forest science, v. 13, n. 4, p. 365-375, 1967.
- DA SILVA, Ana Karina Vieira et al. **Predicting eucalyptus diameter at breast height and total height with uav-based spectral indices and machine learning**. Forests, v. 12, n. 5, p. 582, 2021.
- DOS REIS, Aliny Aparecida et al. **Spatial prediction of basal area and volume in Eucalyptus stands using Landsat TM data: an assessment of prediction methods**. New Zealand Journal of Forestry Science, v. 48, n. 1, p. 1-17, 2018.
- GUEDES, Isabel Carolina de Lima et al. **Técnicas geoestatísticas e interpoladores espaciais na estratificação de povoamentos de Eucalyptus sp**. Ciência Florestal, v. 22, p. 541-550, 2012.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. **Particle swarm optimization**. In: Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks. ieee, 1995. p. 1942-1948.
- LE MAIRE, Gueric et al. **MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation biomass**. Remote sensing of Environment, v. 115, n. 10, p. 2613-2625, 2011.
- MCTAGUE, John Paul; SCOLFORO, Henrique Ferraço; SCOLFORO, Jose Roberto S. **A new paradigm for Continuous Forest Inventory in industrial plantations**. Forest Ecology and Management, v. 519, p. 120314, 2022.
- PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário florestal**. Curitiba: [s. n.], 1997. 316 p.
- POWELL, Scott L. et al. **Quantification of live aboveground forest biomass dynamics with Landsat time-series and field inventory data: A comparison of empirical modeling approaches**. Remote Sensing of Environment, v. 114, n. 5, p. 1053-1068, 2010.
- R Core Team (2023). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL 3.
- RAIMUNDO, Marcel Regis et al. **Geostatistics applied to growth estimates in continuous forest inventories**. Forest Science, v. 63, n. 1, p. 29-38, 2017.
- SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. **Logarithmic expression of timber-tree volume**. Journal of Agricultural Research, v.47, n.9, p.719-734, 1933.

SCOLFORO, Henrique Ferraco et al. **Eucalyptus growth and yield system: Linking individual-tree and stand-level growth models in clonal Eucalypt plantations in Brazil.** Forest Ecology and Management, v. 432, p. 1-16, 2019b.

SCOLFORO, Henrique Ferraco et al. **Stand-level growth and yield model system for clonal eucalypt plantations in Brazil that accounts for water availability.** Forest ecology and management, v. 448, p. 22-33, 2019a.

SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. de. **Inventário Florestal.** Lavras: UFLA/FAEPE, p. 561, 2006.

SHI, Yuhui; EBERHART, Russell C. **Parameter selection in particle swarm optimization.** In: Evolutionary Programming VII: 7th International Conference, EP98 San Diego, California, USA, March 25–27, 1998 Proceedings 7. Springer Berlin Heidelberg, 1998. p. 591-600.

VON LÜPKE, Nikolas; HANSEN, Jan; SABOROWSKI, Joachim. **A three-phase sampling procedure for continuous forest inventory with partial re-measurement and updating of terrestrial sample plots.** European Journal of Forest Research, v. 131, p. 1979-1990, 2012.

VRIES, Pieter G. **Sampling Theory for Forest Inventory: A teach-yourself course.** Springer Berlin Heidelberg, 1986.

WU, Heng et al. **Multistage sampling and optimization for forest volume inventory based on spatial autocorrelation analysis.** Forests, v. 14, n. 2, p. 250, 2023.

## **TERCEIRA PARTE**

## 1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os métodos propostos nesta dissertação representam avanços significativos na otimização do Inventário Florestal Contínuo (IFC), trazendo contribuições tanto para o meio acadêmico quanto para o setor florestal. A abordagem desenvolvida no primeiro artigo demonstrou que é possível reduzir de maneira expressiva o esforço amostral a partir dos 3 anos de idade da floresta, mantendo a confiabilidade das estimativas. Essa redução permite a realocação de recursos para outras etapas do manejo, contribuindo para a sustentabilidade econômica do inventário. No segundo artigo, a introdução do conceito de Inventário Florestal Otimizado (IFO) demonstrou ser uma alternativa viável e eficiente para a redução do número de talhões medidos ao longo do ciclo da floresta, garantindo estimativas consistentes sem comprometer a acurácia dos resultados.

Destaca-se a possibilidade de integração entre os dois métodos propostos nesta dissertação. Enquanto a primeira abordagem otimiza o esforço amostral dentro de cada talhão medido no IFC tradicional, a segunda propõe um design de inventário alternativo ao IFC, permitindo a seleção estratégica dos talhões a serem medidos e a estimativa dos talhões não medidos. Assim, a aplicação do primeiro método nos talhões selecionados pelo segundo método representa uma estratégia promissora. A combinação dessas abordagens pode viabilizar um sistema de inventário mais dinâmico, eficiente e adaptável às necessidades operacionais das empresas florestais.

Do ponto de vista acadêmico, este estudo contribui para a ampliação do conhecimento sobre otimização de inventários florestais, integrando conceitos avançados de estatística, modelagem de crescimento e produção, e métodos de otimização matemática. Os resultados obtidos reforçam a importância da busca por abordagens inovadoras para aprimorar os processos de monitoramento de florestas plantadas, contribuindo para um manejo mais eficiente e sustentável.

Por fim, é importante destacar que a evolução das técnicas de inventário florestal é um campo em constante desenvolvimento. Novas pesquisas podem explorar a integração das metodologias apresentadas com tecnologias emergentes, como sensores remotos, aprendizado de máquina e big data, potencializando ainda mais a eficiência dos inventários florestais. Dessa forma, espera-se que os resultados desta dissertação incentivem futuras investigações.