



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

LUANA MARTINS DA SILVA SÁ

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS VOLUMÉTRICOS NA ESTIMATIVA DO
ESTOQUE DE CARBONO EM POVOAMENTOS DE EUCALIPTO**

Prof. Dr. Emanuel José Gomes de Araújo
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
ABRIL – 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

LUANA MARTINS DA SILVA SÁ

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS VOLUMÉTRICOS NA ESTIMATIVA DO
ESTOQUE DE CARBONO EM POVOAMENTOS DE EUCALIPTO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. EMANUEL JOSÉ GOMES DE ARAÚJO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
ABRIL – 2022

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS VOLUMÉTRICOS NA ESTIMATIVA DO
ESTOQUE DE CARBONO EM POVOAMENTOS DE EUCALIPTO**

LUANA MARTINS DA SILVA SÁ

APROVADA EM: 25/04/2022

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. EMANUEL JOSÉ GOMES DE ARAÚJO – UFRRJ
Orientador

Prof. Dr. MARCO ANTONIO MONTE – UFRRJ
Membro

Me. DANILO HENRIQUE DOS SANTOS ATAÍDE – UFRRJ
Membro

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo apoio incondicional, por serem meu abrigo e a base que me propulsiona todos os dias a ser uma pessoa melhor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pela minha saúde e de toda a minha família, que me proporcionou a chance de me dedicar até aqui.

Aos meus pais, por todo esforço e dedicação. À minha mãe Rosilda, por ser a minha base de confiança, meu alento e a pessoa que está por mim o tempo todo, seja onde for e como for. Ao meu pai Wanderley, pelo esforço incondicional, por fazer e abrir mão de tanto para que eu pudesse ter a chance de me dedicar, e por toda compreensão que aconchega nos momentos difíceis. Sem vocês nada disso seria possível.

Ao meu namorado, Ian, por ser a pessoa com quem compartilho as maiores alegrias, por ser o ponto de vista positivo de cada jornada, por me mostrar que sou capaz de muito e que juntos somos capazes de ir além.

À minha avó Maria, por todo apoio, atenção e incentivo constante. Aos meus avós, Ernestina, Sebastião e Jovelino (*in memorian*). Por serem meus exemplos de força e humildade.

À minha tia Jovelina (*in memorian*), minha maior saudade, por todo ensinamento, por me mostrar que a vida é curta demais e que cada segundo vale a pena.

As minhas madrinhas, Fabiana, Lilian, Nair e minha tia Tânia, que mesmo de longe foram meu apoio e o suporte constante aos meus pais quando eu não poderia.

À toda minha família, que de alguma forma contribuiu para que eu pudesse chegar até aqui.

Aos meus amigos de turma, por compartilharmos momentos lindos ao longo de toda a graduação, por serem o motivo das maiores alegrias e das melhores lembranças ao longo dessa jornada.

Aos meus amigos de infância e de vida, que mesmo de longe se fizeram o tempo todo presentes, por vibrarem a cada conquista minha e por tornarem nossos encontros uma das melhores partes de voltar para casa.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, por proporcionar um ensino público, gratuito e de qualidade. Por me ensinar tanto sobre a vida e fazer parte de ser quem eu sou, carregarei sempre um enorme carinho.

Ao meu orientador Prof. Emanuel Araújo, pela dedicação e prontidão constante, pelos ensinamentos e pelo apoio ao longo de toda a graduação.

À banca examinadora, Prof. Marco Monte e doutorando Danilo Ataíde, pelas contribuições e ensinamentos ao longo do trabalho.

A todos os mestres que fizeram parte da minha trajetória, meu agradecimento por compartilharem tantos conhecimentos e fazerem parte da profissional e da pessoa que sou hoje.

E por fim, à todas as pessoas que se fizeram presentes nessa trajetória, cada um deixa um pouco de si por onde passa e tenho certeza que cada um de vocês constitui um pouquinho do que sou hoje.

RESUMO

O estoque de carbono em florestas tem recebido maior atenção pelo seu efeito na mitigação do processo de aquecimento global. Um dos métodos de quantificação do estoque de CO₂ consiste na utilização dos dados de volume (m³/ha) do povoamento florestal. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar diferentes métodos de estimativa do volume e sua influência na estimativa do estoque de carbono em povoamentos de Eucalipto. O estudo foi realizado nas fazendas A e B, localizadas nos municípios de Rio das Flores e Paty do Alferes, ambos no estado do Rio de Janeiro. A fazenda A conta com área total de 305 ha, sendo 174 ha no sítio 1 em espaçamento 3 x 2 m (9 anos) e 131 ha no sítio 2 em espaçamento 3 x 3 m (8,4 anos). A fazenda B possui área total plantada de 62 ha no sítio 3, em espaçamento 3 x 3 m (7 anos). Em cada sítio estudado, o plantio foi realizado com um material genético de Eucalipto, totalizando três materiais genéticos diferentes. Foram alocadas 20 unidades amostrais, com formato circular e área de 400 m², na fazenda A, e 10 na fazenda B. Em cada unidade amostral foram obtidos os pares de dados de DAP e Ht nas linhas centrais, que possibilitaram o ajuste equações hipsométricas conforme o modelo de Trorey para o sítio 1 e o modelo de Curtis para os sítios 2 e 3. As estimativas de volume das árvores foram obtidas por meio de três metodologias: a primeira com base na equação de Schumacher e Hall (método 1): $Ln V = -9,931094317 + 1,964493521 Ln (DAP) + 0,925664089 Ln (Ht)$ ($R^2 = 98,98\%$ e $S_{yx} = 6,81\%$); a segunda e terceira utilizando fatores de forma obtidos em bibliografia. As estimativas com os fatores de forma foram realizadas com fator médio utilizado para Eucalipto de 0,5 (método 2) e com fatores específicos para cada material genético (método 3). A estimativa de biomassa florestal foi obtida por meio dos volumes estimados e densidade básica da madeira. O teor de carbono foi considerado como 45% da biomassa total e o fator de 3,66 foi usado na conversão do carbono em CO₂. As estimativas de volume obtidas pelos três métodos avaliados foram avaliadas estatisticamente pelo software R, onde foi realizado o teste de normalidade de Shapiro Wilk ($p = 0,05$), posteriormente as estimativas foram comparadas pelo teste de Friedman e de Wicoxon W ($p = 0,05$) e as distribuições de frequência dos teores de CO₂ foram comparadas por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov ($p = 0,05$). A estimativa do volume por fator de forma médio indicou os maiores volumes e, conseqüentemente, os maiores estoques de carbono nos três sítios em estudo. Os estoques são entre 4 a 6% superiores ao estimados quando se obtém o volume por fator de forma específico e aproximadamente 12% ao observado para estimativas por equação. O teste de Wilcoxon W confirmou a existência de diferença significativa entre os três métodos de estimativa do volume, nos três sítios avaliados. As distribuições de frequência do estoque de CO₂ apresentaram diferença significativa pelo teste de Kolmogorov Smirnov para o método da equação volumétrica quando comparado ao fator de forma médio, nos três sítios, e comparado ao fator de forma específico no sítio 2. As metodologias analisadas apresentaram diferença significativa entre si, demonstrando que o método de estimativa do volume, apresenta influência significativa nas estimativas dos estoques de biomassa e de carbono em povoamentos de Eucalipto.

Palavras-chave: Fator de forma; Equação; Volume; Biomassa; Floresta plantada.

ABSTRACT

The stock of carbon in forests has received greater attention for its effect on mitigating the process of global warming. One of the methods for quantifying the CO₂ stock is to use volume data (m³/ha) of the forest stand. Therefore, the present study aimed to evaluate different methods of estimating the volume and its influence on the estimation of carbon stock in Eucalyptus stands. The study was carried out on farms A and B, located in the municipalities of Rio das Flores and Paty do Alferes, both in the state of Rio de Janeiro. Farm A has a total area of 305 ha, with 174 ha on site 1 in a 3 x 2 m spacing (9 years) and 131 ha in site 2 in a 3 x 3 m spacing (8.4 years). Farm B has a total planted area of 62 ha on site 3, spaced 3 x 3 m (7 years). In each studied site, planting was carried out with a Eucalyptus genetic material, totaling three different genetic materials. 20 sampling units were allocated, with a circular shape and an area of 400 m², on farm A, and 10 on farm B. In each sampling unit, pairs of DAP and Ht data were obtained in the central lines, which made it possible to adjust hypsometric equations according to the Trorey model for site 1 and the Curtis model for sites 2 and 3. Tree volume estimates were obtained using three methodologies: the first based on the Schumacher and Hall equation (method 1): $Ln V = -9,931094317 + 1,964493521 Ln (DAP) + 0,925664089 Ln (Ht)$ ($R^2 = 98,98\%$ e $S_{yx} = 6,81\%$); the second and third using form factors obtained from the bibliography. The estimates with the form factors were carried out with an average factor used for Eucalyptus of 0.5 (method 2) and with specific factors for each genetic material (method 3). The estimate of forest biomass was obtained through the estimated volumes and basic density of the wood. The carbon content was considered as 45% of the total biomass and a factor of 3.66 was used in the conversion of carbon to CO₂. The volume estimates obtained by the three evaluated methods were statistically evaluated by the R software, where the Shapiro Wilk normality test was performed ($p < 0.05$), later the estimates were compared by the Friedman and Wilcoxon W test ($p = 0.05$) and the frequency distributions of CO₂ contents were compared using the Kolmogorov-Smirnov test ($p = 0.05$). The estimation of the volume by average form factor indicated the largest volumes and, consequently, the largest carbon stocks in the three sites under study. Inventories are between 4 and 6% higher than estimated when obtaining the volume by specific form factor and approximately 12% higher than that observed for estimates by equation. The Wilcoxon W test confirmed the existence of a significant difference between the three volume estimation methods at the three evaluated sites. The frequency distributions of the CO₂ stock showed a significant difference by the Kolmogorov Smirnov test for the volumetric equation method when compared to the mean form factor, in the three sites, and compared to the specific form factor at site 2. The methodologies analyzed showed differences significant among themselves, demonstrating that the volume estimation method has a significant influence on the estimates of biomass and carbon stocks in Eucalyptus stands.

Keywords: Form factor; Equation; Volume; biomass; Planted forest.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1. Efeito estufa, aquecimento global e mudanças climáticas.....	2
2.2. Conferências climáticas e a gestão estratégica do carbono.....	3
2.3. O Gênero <i>Eucalyptus</i> no Brasil.....	4
2.4. Dinâmica do carbono e biomassa florestal	5
2.5. Metodologias para estimativa de biomassa e carbono	6
2.6. Metodologias para estimativa de volume: equações volumétricas e fator de forma	7
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	8
3.1. Área de Estudo	8
3.2. Coleta dos dados.....	10
3.3. Métodos de Estimativa dos Estoques de CO₂.....	10
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
5. CONCLUSÃO.....	20
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20
ANEXO A – ÁREA DOS TALHÕES	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Equações hipsométricas ajustadas, conforme modelos também apresentados, e suas respectivas estatísticas de precisão e ajuste: erro padrão da estimativa (S_{yx}) e coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajus}) em cada Sítio estudado nas fazendas A e B.....	10
Tabela 2. Fatores de forma específicos utilizados nas estimativas de volume pelo método 3 e densidade básica da madeira aplicada na obtenção das estimativas de biomassa do fuste nos sítios estudados.....	11
Tabela 3. Parâmetros estatísticos obtidos por meio do teste de Shapiro Wilk, à 5% de probabilidade, para as estimativas de volume (m^3/ha) realizadas por meio dos três métodos avaliados.....	13
Tabela 4. Resultados da análise estatística descritiva dos métodos testados nos três sítios....	14
Tabela 5. Parâmetros estatísticos obtidos por meio do teste de Wilcoxon W na comparação entre as estimativas de volumes (m^3/ha) realizadas por meio dos três métodos avaliados.	15
Tabela 6. Comparação entre os estoques de carbono/planta, estoque de carbono/planta/ano e estoque de carbono total estimado entre os três métodos aplicados em cada sítio.....	16
Tabela 7. Resultados dos testes de Kolmogorov-Smirnov à 5% de probabilidade na comparação da distribuição de frequência do estoque de CO_2 , entre os diferentes métodos de estimativa do volume.....	17

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização, delimitação e identificação dos espaçamentos de plantio na fazenda A, município de Rio das Flores, RJ.....	9
Figura 2. Localização, delimitação e identificação do plantio em espaçamento 3 x 3 m na fazenda B, Paty do Alferes, RJ.....	9
Figura 3. Distribuição de frequência diamétrica nos três sítios estudados.....	13
Figura 4. Distribuição de frequência do estoque de carbono no Sítio 1, para as estimativas pelo método da equação volumétrica (método 1), fator de forma médio (método 2) e fator de forma específico (método 3).	18
Figura 5. Distribuição de frequência do estoque de carbono no Sítio 2, para as estimativas pelo método da equação volumétrica (método 1), fator de forma médio (método 2) e fator de forma específico (método 3).	18
Figura 6. Distribuição de frequência do estoque de carbono no Sítio 3, para as estimativas pelo método da equação volumétrica (método 1), fator de forma médio (método 2) e fator de forma específico (método 3).	19

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, com o avanço contínuo da sociedade e a consequente intensificação das atividades antrópicas, o homem tem sido responsável por uma série de alterações na paisagem terrestre e também na atmosfera. Tais alterações atmosféricas consistem no aumento da concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE) e esses integram o processo natural do efeito estufa, imprescindível para a manutenção da vida na Terra (BALBINOT, 2003). No entanto, em altas concentrações trazem consequências para o aquecimento global, causando o aumento da temperatura da terra, maior frequência no acontecimento de eventos climáticos extremos e maior instabilidade da produtividade agrícola. Os principais GEE são: Dióxido de carbono (CO_2), Metano (CH_4) e Óxido nitroso (N_2O). O CO_2 é responsável pelos maiores quantitativos, oriundo principalmente da queima de combustíveis fósseis e pela mudança de uso do solo (IPCC, 2014).

As florestas, nativas ou plantadas, consistem na principal alternativa de remoção de carbono da atmosfera, e consequentemente de estoque. As árvores capturam o CO_2 atmosférico por meio do processo da fotossíntese, e fixam em sua própria estrutura, tornando-o temporariamente indisponível ao ambiente. Sendo os ecossistemas florestais os responsáveis pelas maiores capacidades de fixação de carbono quando comparado à outras formações vegetais, contendo aproximadamente 90% da biomassa terrestre (BALBINOT, 2008).

As florestas plantadas apresentam grande efetividade na remoção de carbono da atmosfera, devido a sua alta produtividade volumétrica e rápido crescimento (BALBINOT, 2003). Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (2020), o Eucalipto, espécie amplamente difundida em seu aspecto comercial, atinge no Brasil uma das maiores produtividades do mundo, em média $38,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Reis et al. (1994) ao estudar florestas de Eucalipto no estado do Espírito Santo, determinaram um potencial de seqüestro de carbono de $12,38 \text{ tC ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Resultado parecido foi obtido por Paixão (2006), que verificou um estoque de 71,13 toneladas de carbono total por hectare em povoamento de Eucalipto aos 6 anos de idade.

Estimativas precisas do estoque de carbono em plantios de Eucalipto são uma necessidade crescente, uma vez que os resultados permitem aferir a respeito do comportamento ambiental do povoamento no que se refere ao balanço de carbono. Tais análises contribuem para a evolução do setor florestal e possuem grande apelo ambiental a respeito da acuracidade das áreas florestais, tanto do ponto de vista econômico quanto do conservacionismo.

Diante disso, a quantificação do estoque de carbono em florestas tem recebido maior atenção, tal determinação acontece por meio dos dados de biomassa florestal, que podem ser obtidos por método destrutivos (diretos) e não destrutivos (indiretos). Os métodos diretos consistem na pesagem de toda biomassa, o que torna inviável sua aplicação em áreas extensas, devido ao custo, tempo e mão de obra para execução. Por outro lado, os métodos indiretos consistem no ajuste de modelos (SANQUETTA *et al.*, 2014), onde as estimativas podem ser feitas por meio de relações matemáticas. Somogyi *et al.* (2006) afirmam que os métodos indiretos trabalham geralmente com duas abordagens: a utilização do volume e densidade básica da madeira e o ajuste de equações específicas para a estimativa direta da biomassa florestal. O ajuste de equações de biomassa envolve a amostragem de parcelas, que consiste na derrubada e determinação do peso das árvores, o que representa maior esforço e complexidade prática quando comparado aos demais métodos indiretos. Dessa forma, uma alternativa consiste nas estimativas indiretas por meio dos dados de volume, que podem ser obtidos por diferentes formas: entre elas a aplicação de equações volumétricas e o uso de fatores de forma.

As equações são relações matemáticas, desenvolvidas por análises de regressão, onde o volume é estimado a partir de uma, ou duas, variáveis facilmente obtidas em inventários florestais. Dentre estas equações, encontram-se aquelas que estimam o volume total por meio de uma única variável dendrométrica, geralmente o DAP, chamadas de modelos de simples

entrada, e aquelas que explicam o volume através de duas variáveis: DAP e altura. (SCOLFORO, 2005). As primeiras são aplicáveis apenas em situações de forte correlação entre a variável DAP e altura, assim, as variações em volume podem ser explicadas apenas pelas variações em DAP. Existem ainda, diferentes modelos aplicáveis em povoamentos de Eucalipto, entre eles, o modelo de Schumacher & Hall é um dos mais difundidos na obtenção de estimativas volumétricas (MARTINS, 2013).

O fator de forma consiste na razão entre o volume do fuste, obtido por meio da cubagem rigorosa, e o volume de um cilindro com altura igual à altura da árvore e diâmetro igual ao DAP. O fator de forma é utilizado para corrigir o volume do cilindro para o volume da árvore. A medida em que o fator de forma se aproxima de 1, melhor é a forma do tronco e mais cilíndrica é a árvore. No entanto, fatores iguais a 1 não são encontrados, devido ao afilamento natural presente ao longo do tronco (FINGER, 1992).

A estimativa do volume total por fator de forma médio é uma alternativa interessante, devido sua praticidade. Esse método se torna uma ferramenta de grande valia na obtenção de estimativas rápidas da variável volume. No entanto, segundo Péllico Neto (2004), a estimativa por meio do fator de forma demonstra resultados confiáveis desde que considerados fatores como espécie, sítio, espaçamento, idade dos plantios, etc. Além disso, o volume de árvores tem sido estimado com certa facilidade e acuracidade quando aplicadas equações de volume. Sendo assim, deve-se ter ponderações e cuidados quanto ao uso de fatores de forma médios.

Azevedo (2011) obteve a maior acurácia dos modelos volumétricos ajustados e do fator de forma específico, observou ainda, uma leve tendência do fator de forma a superestimar o volume quando comparado aos valores obtidos por meio das equações ajustadas. Cabacinha (2003), verificou erros de 2,02% para o uso do fator de forma médio e -1,04% na aplicação de equação volumétrica de dupla entrada. Assim, espera-se que a variação do método de estimativa do volume exerça influência significativa sobre as estimativas de biomassa e carbono em povoamentos de Eucalipto.

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi avaliar diferentes métodos de estimativa do volume e sua influência na estimativa do estoque de biomassa e carbono em povoamentos de Eucalipto.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Efeito estufa, aquecimento global e mudanças climáticas

Desde o primeiro relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC em 1990, o número de estudos científicos sobre o clima global tem crescido e o tema começou a envolver não só os governos, como também o setor privado. De acordo com o relatório do IPCC (2014), a concentração de Gases de Efeito Estufa na atmosfera está aumentando e consequentemente têm-se observado a elevação da temperatura da superfície terrestre, aumento da frequência de eventos climáticos extremos, desertificação e perda de biodiversidade que podem trazer problemas à manutenção da vida humana.

O Efeito Estufa é um fenômeno de ocorrência natural, onde a radiação solar de comprimento de onda curto ultrapassa a atmosfera terrestre, no momento em que atinge a superfície a energia é refletida e volta para a atmosfera com um comprimento de onda longo (infravermelho), que interage com os GEE. Parte dessa irradiação é retida na atmosfera, o que aumenta a temperatura média do ar, mantendo-a em cerca de 15 °C, promovendo o chamado “efeito estufa natural” (MACHADO, 2012). Caso não houvesse esses gases na atmosfera, a temperatura média da Terra seria de -18 °C, o que inviabilizaria a vida na terra. No entanto, desde a Revolução Industrial, quando se iniciou uma intensificação do uso de combustíveis fósseis, houve um crescimento exponencial da concentração desses gases na atmosfera, gerando

um efeito considerado além do natural. Os principais responsáveis pela atual problemática são: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), clorofluorcarbonos (CFCs) e vapor d'água. Em termos quantitativos o CO₂ é o gás que mais contribui para o efeito estufa, devido o volume em que é emitido – cerca de 55 % do total. Todavia, cada gás possui relacionado ao quantitativo de emissão o próprio Potencial de Aquecimento Global (PAG). O CH₄ por exemplo é emitido em quantidades bem menores, porém possui um PAG 23 vezes maior que o de CO₂. O N₂O e os CFCs são emitidos em percentuais ainda menores, porém possuem PAG, respectivamente, na ordem de 298 e de 6.200 a 7.100 vezes maior que o de CO₂ (CERRI *et al.*, 2007). O que ressalta a importância da preocupação em gênero e grau com cada gás de efeito estufa. Em níveis quantitativos históricos, ao longo 250 anos, a concentração de CO₂ aumentou de 280 para 390 ppmv (partes por milhão em volume) nos anos de 2019/2020 e, atualmente, aumenta a uma taxa estimada de 2,2 ppmv ano⁻¹, equivalente a um incremento de 3,3 Pg ano⁻¹ de C (IPCC, 2007).

No século passado, o aumento da concentração de GEE na atmosfera devido às atividades antrópicas aumentou a temperatura média do globo em 0,6 °C (SCARPINELLA, 2002). Alguns cientistas já preveem aumentos da ordem de 5,8 °C para os próximos 100 anos (IPCC, 2007). Variações dessa ordem estão além do esperado e previsto por cientistas ao longo dos anos, julgado por Lal (2004) acima do nível crítico considerado. O parâmetro estabelecido pelo mesmo autor, classifica aumentos acima de 0,1 °C por década como críticos para os ecossistemas, ou seja, em incrementos de temperatura superiores a esse, os ecossistemas não seriam resilientes o suficiente para se reajustarem às novas condições (CARVALHO, 2010). De acordo com o IPCC (2014) entre os principais efeitos do aumento da temperatura global estão a ocorrência de eventos extremos, como secas, inundações e maior irregularidade na distribuição da precipitação global, que trazem riscos à segurança alimentar, alterando a cadeia produtiva de grande parte dos alimentos cultivados.

2.2. Conferências climáticas e a gestão estratégica do carbono

Durante a Rio-92, Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, foi criada a Convenção Quadro das Nações Unidas para Mudança do Clima – CQNUMC (*United Nations Framework Convention on Climate Change* – UNFCCC). O objetivo desta instituição é estabilizar a concentração de gases de efeito estufa em um nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático global. Os países signatários definiram medidas para mitigar as ações antrópicas de mudança do clima como: submeter informações sobre seus programas e inventários nacionais de mudança do clima; promover adaptações para futuros impactos das mudanças climáticas; e promover a consciência pública, educação e treinamento. Para executar tais atividades e garantir o funcionamento das diretrizes da UNFCCC foi criada a Conferência das Partes (*Conference of the Parties*) ou COP, que se reúne anualmente para debater as questões acerca da mudança do clima.

A conferência de Quioto, uma das mais importantes e referência do sistema, realizada no ano de 1997, definiu em seu anexo I os países com metas de redução de emissão e países sem metas no chamado não Anexo I. Além disso, o protocolo de Quioto gerado na conferência, propôs três mecanismos adicionais de flexibilização: (i) Implementação Conjunta, (ii) Comércio de Emissões e (iii) Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que possuem como objetivo facilitar o cumprimento das metas de redução de emissão dos GEE por parte dos países Anexo I. No entanto, o MDL é o único que prevê a participação de países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil. Conforme o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, países desenvolvidos poderão investir em projetos que sejam realizados em países em desenvolvimento, adquirindo Reduções Certificadas de Emissões (RCEs) (FRONDIZI, 2009). Essas podem ser usadas para abater as metas de redução de emissões para os países Anexo I ou

negociadas no mercado de créditos de carbono. Hoje existem basicamente dois mercados: o mercado “Quioto”, que segue as regras estabelecidas pelo Protocolo de Quioto; e o mercado voluntário, que é formado por mercados em países que não ratificaram o Protocolo e, ou, que não seguem todas as regras estabelecidas por esse tratado, que possibilita maior flexibilidade de atuação e utilização de procedimentos e metodologias inovadoras, o que tem atraído o setor florestal, fato esperado, considerado a grande participação de projetos florestais no mercado de carbono.

O Brasil segue realizando sua atuação interna, com um dos principais documentos instituídos no ano de 2009, a política nacional sobre mudança do clima (PNMC). A meta nacional é reduzir entre 36 e 39%, permanecendo em uma linha de base de 3,2 Gt de CO₂ equivalente (IBARR, 2016). Recentemente a COP 26, que aconteceu na Escócia, gerou o chamado Pacto Climático de Glasgow. O documento renovou o compromisso dos países com o tema, definindo o aumento da temperatura média global em até 1,5 graus e a redução em 30% da quantidade de emissões de CH₄ até 2030, em relação aos níveis de 2020. E a Redução das emissões de CO₂ de 45% até 2030, em relação aos níveis de 2010. Além disso, a conferência mencionou, de forma inédita, a necessidade da redução gradual do uso de energia a base de carvão mineral.

Diante das metas estabelecidas, a gestão do carbono vem sendo uma demanda cada vez mais estratégica para pequenos e grandes negócios. Diferentes setores da economia veem sofrendo pressões de mercado pela busca de produtos e/ou serviços que sejam eco suficientes. A organização a respeito dos projetos e tomadas de ações sobre o investimento em carbono passa por três etapas essenciais: a primeira delas consiste no diagnóstico e conhecimento das emissões oriunda do empreendimento, coletivo ou pessoa individual. Tal levantamento é realizado por meio dos chamados Inventários de Gases de Efeito Estufa, nele são consideradas todas as emissões passíveis de controle da parte responsável. As emissões são levantadas por meio de três escopos diferentes: Escopo 1: responsável pelas emissões diretas ou indiretas oriundas da atividade. Escopo 2: emissões por uso e consumo de energia. Escopo 3 (não obrigatório): são declaradas demais emissões que sejam consideradas importantes para o negócio. A partir do diagnóstico de emissões realizado, passamos para fase de implementação, que consiste na aplicação de medidas de controle e redução de emissões de GEE ou a implantação de projetos que busquem o aumento das remoções de GEE da atmosfera, basicamente o investimento em projetos de reflorestamento e florestamento. E por último o processo de divulgação e engajamento que passa em grande parte pelo que se chama de marketing verde. No entanto os inventários de GEE devem ser orientados por instituições certificadas por órgão responsável, o que credita a validade dos dados e permite a divulgação em plataformas específicas. No Brasil a maior plataforma de divulgação de inventário de GEE pertence ao GHG protocol Brasil, que segue as orientações e normas do GHG internacional adequadas a realidade brasileira.

Assim, é nesse contexto que as empresas do ramo florestal tomam grande importância, uma vez que detém sobre o próprio controle uma das mais importantes alternativas na mitigação do processo de aquecimento global, as grandes áreas de florestas plantadas ou nativas, responsáveis pelo estoque de bilhões de toneladas CO₂ atmosférico (IBA, 2021). Dessa forma, o levantamento do balanço de carbono, que transcenda o nível das emissões se faz extremamente necessário. Obtendo-se um diagnóstico preciso a respeito do nível de remoções de carbono pela floresta em balanço ao nível de emissões do empreendimento florestal em questão.

2.3. O Gênero *Eucalyptus* no Brasil.

O interesse sobre as florestas plantadas a respeito da fixação de CO₂ atmosférico já é um consenso entre especialistas. Além de legítimo, isso porque as elevadas taxas de crescimento proporcionam alta capacidade de remoção do CO₂ da atmosfera (BALBINOT, 2003).

A introdução do gênero Eucalipto, no Brasil, ocorreu no início do século XIX. Com objetivo inicialmente ornamental, rapidamente as espécies demonstraram aplicabilidades diversas, se prestando de forma versátil à diferentes e importantes usos, facilitando o seu cultivo e expansão florestal. Na década de 70 com as políticas de incentivos fiscais para o reflorestamento, os povoamentos de Eucalipto e Pinus se tornaram uma alternativa interessante para o suprimento da demanda por matéria prima florestal. Atualmente, o setor de árvores plantadas no Brasil é considerado um dos mais competitivos a nível mundial. E segue conquistando reconhecimento da sociedade por sua contribuição econômica, social e distintamente ambiental ao país (SILVA, 2013). Quando manejados de forma adequada os plantios de Eucalipto oferecem inúmeras vantagens ao meio ambiente e à sociedade em geral, atuando no controle da erosão e na estabilização do solo, contribuindo na regulação do fluxo e da qualidade dos recursos hídricos e na redução do aquecimento global. Assim, as áreas de Eucalipto veem se destacando em projetos de MDL por apresentarem elevada eficiência fotossintética, e, conseqüentemente, no sequestro de carbono (PÉREZ CRUZADO *et al.*, 2011).

No ano de 2020, segundo o último relatório da Indústria Brasileira de Árvores (2021), a área total de plantios florestais totalizou 9,55 milhões de hectares, responsáveis pelo estoque de 1,9 bilhões de toneladas de CO₂. Além disso, o setor florestal é responsável por 6 milhões de hectares de áreas protegidas, que respondem pelo estoque de 2,6 bilhões de toneladas de CO₂.

Entre as espécies mais plantadas no Brasil, o Eucalipto responde pelo maior quantitativo, com 78% da área total composta pelo cultivo, o que totaliza 7,47 milhões de hectares. O relatório ainda menciona a influência das mudanças climáticas sobre a produtividade média por ano dos plantios de Eucalipto, que apresentou redução de 38,6 m³/ha no ano de 2019 para 36,8 m³/ha em 2020.

É estrategicamente importante que o país detenha informações atualizadas e confiáveis a respeito do estado e as tendências futuras de suas florestas, baseando a adoção de políticas públicas que atendam das demandas do setor florestal e orientem as ações necessárias para o compromisso ambiental brasileiro frente as mudanças climáticas globais. A cada 5 anos, o Brasil aporta suas informações florestais à FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), onde são reportados os estoques volumétricos de madeira, biomassa e carbono, bem como a sua dinâmica temporal (FAO, 2014). Tais estatísticas obtidas pelo SFB (Serviço Florestal Brasileiro) ainda se baseiam em dados secundários e indiretos, devido à carência de informações primárias. Desenvolver a qualidade das informações é imprescindível para assegurar que os dados possam ser utilizados de forma segura pelos usuários. Entre elas, as estimativas de biomassa e carbono ainda requerem refinamento substancial, visando diminuir o grau de incerteza das informações para atender às demandas internas do país e àquelas impostas pelos acordos dos quais o Brasil é signatário.

2.4. Dinâmica do carbono e biomassa florestal

O carbono é um dos elementos químicos mais abundantes. No globo terrestre circula entre os diferentes compartimentos da biosfera, constituindo um grande ciclo biogeoquímico. Existindo na sua forma orgânica ou inorgânica, o mesmo circula na atmosfera, oceanos, na terra e também nos organismos (VIEIRA *et al.*, 2015). As florestas exercem sua participação no ciclo do carbono por meio dos processos de fotossíntese, respiração e decomposição. No entanto, quantidade de carbono fixado e o seu tempo de residência dependem do componente em que é

alocado, alguns demonstram ciclo relativamente curto (folhas, galhos, raízes finas), onde o carbono retorna rapidamente para atmosfera, todavia outros possibilitam a permanência do carbono ao longo de muitos anos. A determinação do carbono fixado ao longo do ciclo de crescimento das árvores é verificada pelo aumento em biomassa, principalmente de produtos madeireiros (tronco, galhos e raízes grossas) e, também, de produtos não-madeireiros (folhas e raízes finas) (HOEN; SOLBERG, 1994).

O termo biomassa florestal significa toda massa biológica presente em ecossistema florestal, ou apenas na fração arbórea. Conforme Odum (1986), pode ser expressa em termos de peso seco, peso úmido e peso em carbono. Na fase inicial de desenvolvimento de um plantio florestal os carboidratos são destinados para produção de biomassa na copa (folhas e galhos), no momento em que as copas começam a competir entre si, essa produção reduz gradativamente (OTTO *apud* CALDEIRA *et al.*, 2000). Nos plantios de Eucalipto, por exemplo, o fechamento do dossel tende a diminuir a produção de biomassa (GATTO, 2005).

Sobre o particionamento da biomassa florestal, além da constituição das raízes, temos a biomassa aérea: fuste, galhos, casca e folhas, geralmente, sendo o fuste o compartimento que possui mais da metade da biomassa total. Segundo Alves (2007) o particionamento médio dos componentes da parte aérea de clones de Eucalipto aos quatro anos e meio de idade é: Fuste-70%, galhos 13%, casca 9% e folhas 8%.

O acúmulo de biomassa e a consequente taxa de sequestro de carbono variam em função de diversos fatores, entre eles o clima, a idade de plantio, espécie, e práticas silviculturais. Fisiologicamente falando, a retenção de biomassa depende de todos os fatores que atuam sobre o processo da fotossíntese e da respiração celular, sendo eles a luz, temperatura, concentração de CO₂ do ar, umidade e fertilidade do solo, fungicidas, inseticidas e doenças. Nesse sentido, as florestas jovens (em crescimento) sequestram maiores quantidades de carbono, devido o acelerado processo de fotossíntese, quando comparadas as florestas maduras que já se encontram em processo de estabilização de crescimento. Dessa forma, as florestas mais velhas são geralmente vistas por constituírem grandes reservatórios de carbono, não por sua atividade líquida, mas sim pelo volume sequestrado ao longo do tempo (JACOVINE *et al.*, 2013). Em análise climática global, as florestas localizadas nos trópicos possuem o metabolismo mais acelerado, o que leva a demonstração de elevado crescimento e produtividade volumétrica quando comparada as florestas de clima temperado (ACHARD *et al.*, 2008).

No entanto, da quantidade de carbono fixada pela floresta ao longo do tempo, grande parte pode ser emitida em um curto período. Isso porque as produções florestais destinam-se em sua grande maioria para o consumo de produtos madeireiros, logo, dependendo ao uso final que se aplica, todo o carbono removido será emitido novamente para a atmosfera (HOUGHTON, 1994). Assim, a produção florestal voltada para obtenção de madeira sólida é uma alternativa interessante para reduzir o retorno do carbono ao ambiente.

2.5. Metodologias para estimativa de biomassa e carbono

Os estudos da biomassa florestal são realizados com objetivos variados, entre eles os levantamentos para uso energético, as análises da ciclagem de nutrientes e como base de informação para análises do sequestro de carbono.

Ambos estudos são realizados por meio de métodos diretos ou indiretos. Os métodos diretos consistem na pesagem real de toda a biomassa florestal, em que destrutivamente, as árvores são derrubadas e obtém-se o peso seco e teor de umidade do material. A unidade amostral nesse caso pode ser tanto as árvores individuais quanto parcelas que sejam delimitadas para tal finalidade e os resultados posteriormente são extrapolados para toda a área de interesse. No entanto, essa abordagem demanda alta mão de obra, tempo e custos exorbitantes, o que à

torna inviável para aplicação em áreas extensas, sendo utilizado na grande maioria das vezes para fins específicos de pesquisa (FAO, 2009).

Em contrapartida, as estimativas por métodos indiretos são realizadas a partir de correlações estabelecidas com variáveis facilmente obtidas em inventários florestais, que requerem a destruição do material vegetal apenas para fins de ajuste dos modelos. Nelas as variáveis de difícil obtenção (biomassa e carbono) são estimadas por meio das variáveis independentes de fácil obtenção (altura e diâmetro). As avaliações de biomassa por método indireto podem ser feitas de duas formas específicas: estimativa do volume e posterior utilização de fatores de biomassa, que convertem o volume em estimativa de biomassa florestal; e o ajuste de equações diretas em que a biomassa florestal é a variável dependente (SOMOGYI *et al.*, 2006). Ainda sobre os métodos indiretos, tem-se observado um avanço crescente de metodologias que utilizam o sensoriamento remoto na obtenção de estimativas cada vez mais precisas do conteúdo de biomassa florestal (SILVA, 2013).

A determinação do estoque de carbono pode ser realizada por análise química elementar, em laboratório, a partir da coleta direta de material em campo. Todavia, a disponibilidade de fatores de conversão em bibliografia é abundante e apresenta considerável acurácia na conversão do conteúdo de biomassa florestal em carbono. Vidaurre (2010) refere a fração de carbono na biomassa florestal de Eucalipto de 45%. O IPCC (2011) recomenda ainda, que na ausência da análise elementar e da informação da quantidade de carbono para a espécie de interesse, a utilização de um fator de conversão referencial de 0,5, ou seja, considera-se que 50% da biomassa constitui-se de carbono.

Estimativas precisas da produção de biomassa e conseqüentemente do conteúdo de carbono são necessárias para reduzir as incertezas sobre o potencial de remoção e estoque dessas áreas. Ambas metodologias estão sujeitas a discrepâncias associadas a limitações nos parâmetros de medição. Logo, a obtenção de dados confiáveis é um passo significativa na geração de resultados acurados.

2.6. Metodologias para estimativa de volume: equações volumétricas e fator de forma

Equações volumétricas são funções matemáticas que relacionam uma variável de difícil obtenção (variável dependente), neste caso o volume, com variáveis mais facilmente mensuráveis como o DAP, e altura total (variáveis independentes). Elas permitem o cálculo de volume sólido de cada árvore e a extrapolação dos dados por área, através de modelos matemáticos especialmente testados para apresentar os menores erros possíveis (COUTO, 1987). Na área florestal, tais relações são obtidas por meio da análise de regressão. O ajuste de modelos volumétricos é realizado com base nos dados obtidos pela cubagem rigorosa de árvores amostra (KIRCHNER, 1988).

Segundo Scolforo (2005), as equações volumétricas podem ser divididas em: modelos de simples entrada, que explicam o volume por meio de uma única variável e modelos de dupla entrada, que utilizam duas variáveis, no caso DAP e altura. Os primeiros podem ser aplicados quando se observa forte correlação entre os dados de DAP e altura, dessa forma apenas os dados de DAP são suficientes para explicar o volume. Geralmente, estas equações são específicas para uma determinada espécie, idade e local, o que causa limitações no uso e aplicação das mesmas para áreas com características diferentes, o que pode ser um problema, visto que os custos envolvidos na obtenção de dados de cubagem rigorosa para construir equações são altos.

Uma alternativa consiste na estimativa do volume pelo emprego de um fator de forma, determinado pela razão entre o volume sólido (volume da cubagem rigorosa) e o volume do cilindro (SILVA; PAULA NETTO, 1979). Tais fatores também apresentam acurácia significativa quando controlados fatores de desenvolvimento das árvores, possibilitando o

emprego de fatores obtidos em bibliografia. Este método pode ser utilizado em situações de ausência de informação, ou ainda de necessidade de maior rapidez no trabalho.

Scolforo (2005) apontam que dois tipos de fator de forma podem ser aplicados na correção do volume cilíndrico para o volume sólido da árvore, sendo eles: fator de forma absoluto ou comum, onde o volume cilíndrico é obtido com diâmetro à 1,30 m do solo, e o fator de forma de Hohenadl ou natural, onde o volume do cilindro é obtido com o diâmetro à altura de 10% da altura total da árvore. Apesar de o fator de forma de Hohenadl ou natural ser mais eficiente, é importante ressaltar que ao nível de campo, o fator de forma normal é mais simples de ser utilizado, pois é mais fácil medir o diâmetro à altura do peito do que fazer o cálculo de 10% da altura de cada árvore amostrada.

Miranda *et al.* (2015), comparando a eficiência da estimativa de volume para *Eucalyptus grandis* x *urophylla*, mostraram não haver diferença estatística significativa ($p > 0,05$) ao estimar o volume utilizando o fator de forma ou a equação de Schumacher e Hall. Ainda assim, é importante ressaltar que a equação volumétrica de Schumacher e Hall apresentou melhor distribuição gráfica dos resíduos quando comparada as estimativas por fator de forma.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de Estudo

O estudo foi realizado em povoamentos com clones de Eucalipto localizados em duas fazendas (A e B), nos municípios de Rio das Flores e Paty do Alferes, no Estado do Rio de Janeiro. Segundo a classificação climática de Köppen, a região possui clima tropical úmido de altitude, apresentando chuvas no verão e estiagem no inverno (Cw) (ALVARES *et al.*, 2014). O relevo é considerado ondulado a fortemente ondulado (RIO DE JANEIRO, 1992) e os solos registrados na região são os Argissolos Vermelhos Distróficos (PVd1) e os Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos (LVCd5) (EMBRAPA, 2020).

A fazenda A possui área total plantada de 305 hectares (Figura 1), sendo 174,16 hectares plantados entre setembro e dezembro de 2009 (9 anos) no espaçamento 3 x 2 m (Sítio 1) e 130,84 hectares plantados entre junho e julho de 2010 (8,4 anos) no espaçamento 3 x 3 m (Sítio 2). A fazenda B possui área total de 62,72 hectares (Figura 2), plantados entre novembro e dezembro de 2011 (7 anos) no espaçamento 3 x 3 m (Sítio 3). Em cada sítio estudado, o plantio foi realizado com um material genético de Eucalipto, totalizando três materiais genéticos diferentes.

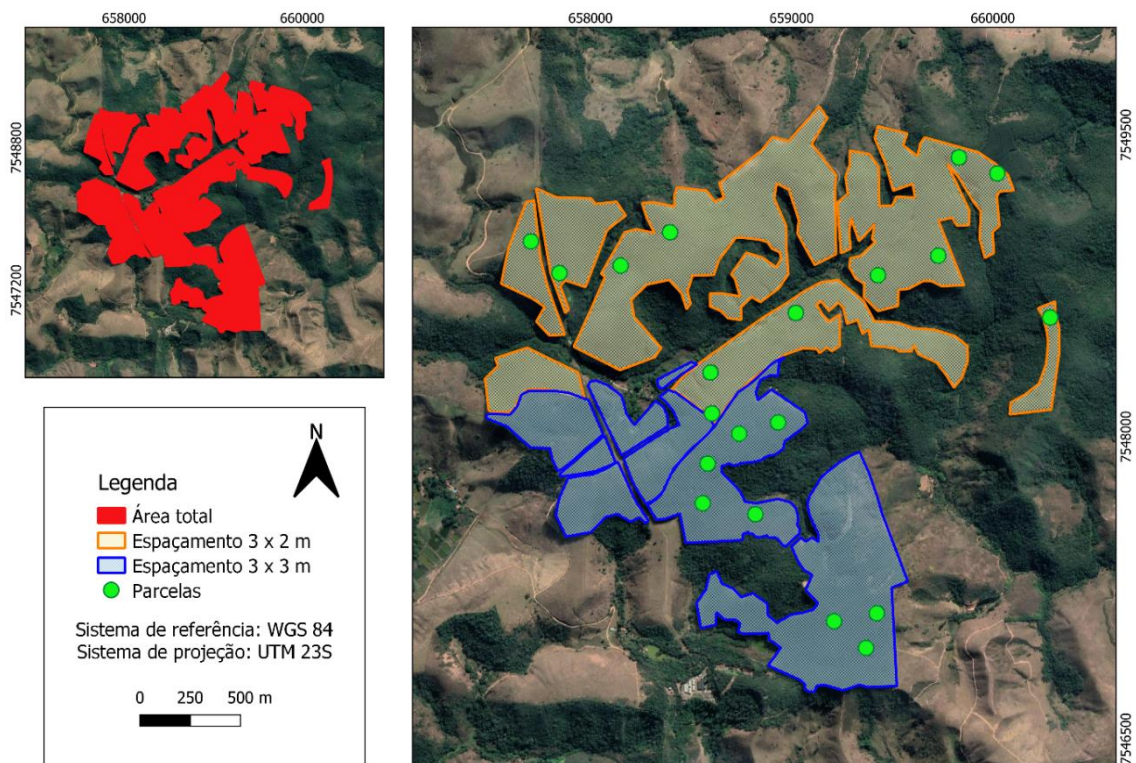


Figura 1. Localização, delimitação e identificação dos espaçamentos de plantio na fazenda A, município de Rio das Flores, RJ.

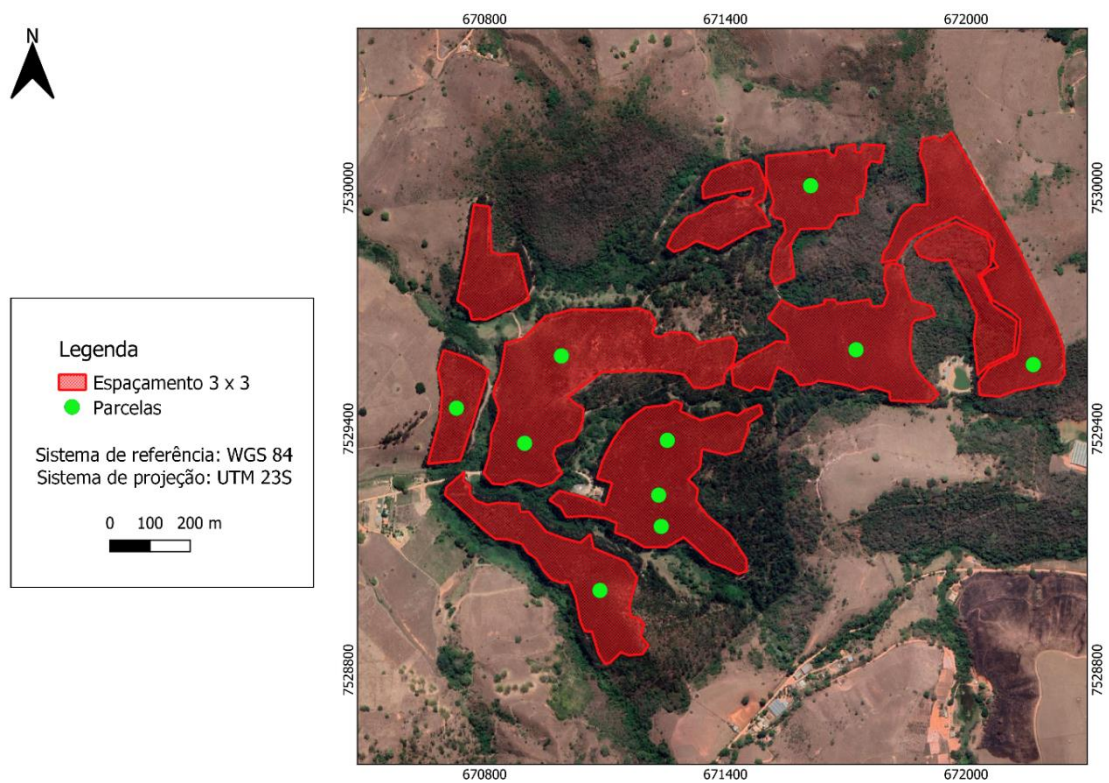


Figura 2. Localização, delimitação e identificação do plantio em espaçamento 3 x 3 m na fazenda B, Paty do Alferes, RJ.

3.2. Coleta dos dados

Nas duas fazendas utilizou-se o processo de amostragem aleatória estratificada, com unidades amostrais circulares (parcelas) com raio de 11,28 m e área fixa de 400 m². Na fazenda A foram alocadas 12 parcelas no espaçamento 3 x 2 m e 8 parcelas no espaçamento 3 x 3 m. Na fazenda B foram alocadas 10 parcelas. Para delimitação das parcelas em campo foi utilizado o Vertex IV (com transponder).

Em cada unidade amostral foram mensuradas, utilizando fita métrica, as circunferências a 1,30 m do solo (CAP) de todos os indivíduos que atendiam o critério de inclusão adotado (CAP ≥ 15,7 cm). Mediu-se também a altura total (Ht) das árvores nas duas linhas centrais de cada parcela, utilizando o hipsômetro Vertex IV. Posteriormente os valores de CAP foram divididos pela constante π (3,1415) e convertidos em diâmetro (DAP).

Com os pares de dados de DAP e altura total (Ht), foram ajustadas equações hipsométricas para estimar a altura total dos indivíduos em que foram mensurados apenas o DAP. Para cada espaçamento foi ajustada e selecionada a equação mais adequada (Tabela 1), com base nos valores de Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajus}), erro padrão da estimativa S_{yx} e análise gráfica de resíduos (erro).

Tabela 1. Equações hipsométricas ajustadas, conforme modelos também apresentados, e suas respectivas estatísticas de precisão e ajuste: erro padrão da estimativa (S_{yx}) e coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajus}) em cada Sítio estudado nas fazendas A e B.

Sítio	Modelo	Equações ajustadas	S_{yx} (%)	R^2_{ajus} (%)
1	Trorey	$Ht = -14,4519 + 4,2982 DAP - 0,1074DAP^2$	7,51	56,77
2	Curtis	$\ln(Ht) = 3,7978 - 10,8565 (1/DAP)$	9,99	58,10
3	Curtis	$\ln(Ht) = 3,7751 - 7,8916 (1/DAP)$	8,95	39,10

No sítio 1 o ajuste foi realizado com 122 pares de dados de DAP e Ht, no sítio 2 foram utilizados 57 pares de dados e no sítio 3, 141 pares de dados de DAP e Ht. As equações hipsométricas ajustadas apresentaram parâmetros significativos e capazes de estimar a altura total das árvores com exatidão.

3.3. Métodos de Estimativa dos Estoques de CO₂

A estimativa de volume das árvores foi realizada utilizando os seguintes métodos: equação volumétrica (método 1), fator de forma médio para Eucalipto (método 2) e fator de forma específico, considerado espécie e idade do povoamento (método 3).

A equação volumétrica (método 1) foi ajustada anteriormente para área de estudo, a partir do modelo de Schumacher e Hall (OLIVEIRA, 2011), sendo ela:

$$\ln V = -9,931094317 + 1,964493521 \ln(DAP) + 0,925664089 \ln(Ht)$$

($R^2 = 98,98\%$ e $S_{yx} = 6,81\%$).

Os fatores de forma (métodos 2 e 3) foram multiplicados pelo volume cilíndrico das árvores, a fim de se ter o volume estimado de cada árvore em pé conforme equação abaixo (MIGUEL, 2010).

$$V = \frac{\pi \cdot DAP^2}{40000} \cdot Ht \cdot ff$$

O fator de forma médio utilizado para Eucalipto foi de 0,5 (VILAS BÔAS, 2009) e os fatores de forma específicos estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Fatores de forma específicos utilizados nas estimativas de volume pelo método 3 e densidade básica da madeira aplicada na obtenção das estimativas de biomassa do fuste nos sítios estudados.

Sítio	Densidade (g/cm ³)	Fator de forma	Referência
1	0,53	0,47	OLIVEIRA, 2011
2	0,47	0,48	JUNIOR, 2016
3	0,48	0,47	MIGUEL, 2010

A estimativa de biomassa do fuste foi obtida por meio das estimativas de volume, realizadas através dos três métodos analisados, e da densidade básica da madeira para cada material genético estudado (tabela 2). O carbono foi considerado como 45% da biomassa total (VIDAURRE, 2010). E por fim, utilizando o fator de 3,66 estabelecido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC (2011), foi realizada a conversão do conteúdo de carbono em CO₂. Dessa forma, cada árvore teve a biomassa e o carbono estimado por meio das estimativas de volume obtidas nos três métodos, que posteriormente foram extrapolados para as áreas totais de estudo.

Realizou-se a determinação e posterior análise descritiva do volume (m³/ha), incremento médio anual (IMA) (m³/ha.ano), biomassa (t/ha), carbono (t/ha) e estoque de CO₂ (tCO₂/ha).

As estimativas de volume (m³/ha), obtidas nos 3 sítios por meio dos 3 métodos analisados, totalizando 9 conjuntos de dados, foram avaliadas estatisticamente pelo software R, onde foi realizado o teste de normalidade de Shapiro Wilk a 5% de probabilidade.

Posteriormente, foi aplicado o teste de Friedman (p = 0,05) seguido do teste post hoc de Wilcoxon W (p = 0,05) para avaliar a existência de diferença significativa entre as estimativas realizadas pelos 3 métodos, dentro de cada sítio estudado.

As estimativas do estoque foram plotadas em gráficos de frequência com classes de amplitude de 50 kg CO₂, obtidas com base na fórmula de Sturges:

$$Ac = \frac{Máximo (n) - Mínimo (n)}{n - 1}$$

Em que:

Ac = Amplitude de classe;

n = número de indivíduos amostrados.

Para verificar a diferença entre os estoques de carbono estimados por cada método, em cada sítio, foi aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov, com 5% de probabilidade, conforme expressão abaixo:

$$D_n = F(x) - S(x)$$

Em que:

D_n = Maior diferença de todas as diferenças pontuais;
 $F(x)$ = Frequência relativa observada em F;
 $S(x)$ = Frequência relativa observada em S.

Esse teste compara duas distribuições de frequência, à um determinado nível de significância ($\alpha = 0,05$). As estimativas de volume, obtidas por meio dos três métodos em cada sítio estudado, foram pareadas duas a duas, ao final, foram realizadas 9 combinações possíveis. O resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov se baseia no módulo da maior diferença entre as duas frequências observadas (CATALUNHA, 2002). Caso o valor D calculado seja menor que o valor tabelado (d), assume-se a hipótese nula, de que as distribuições de frequência são iguais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 3 apresenta a distribuição diamétrica das árvores nos três sítios avaliados. Nos três sítios estudados observa-se maior frequência diamétrica nas classes centrais da distribuição (15-|19 cm e 19-|21 cm). O sítio 1 apresenta 69% da frequência diamétrica total nas duas classes centrais e 29% nas classes com diâmetros menores, entre os limites inferior de 5 cm e superior de 15 cm, o que evidencia a maior ocorrência de árvores com diâmetros menores quando comparado aos demais sítios. O sítio 2, por exemplo, demonstra apenas 6% da frequência diamétrica total nas classes inferiores, mencionadas anteriormente, tendo maior ocorrência de diâmetros maiores, explicado pela frequência de 18% nas classes superiores, entre os limites inferior de 21 cm e superior de 27 cm. Ainda assim, 76% da frequência observada encontra-se nas duas classes centrais. O sítio 3 apresenta comportamento parecido ao observado no sítio 2, no entanto, com maior frequência na classe de 23-| 25 cm, o que demonstra a maior ocorrência de árvores com diâmetros maiores quando comparado ao sítio 2.

Júnior (2010) ao avaliar as distribuições diamétricas de povoamentos híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* em diferentes idades, observou distribuições diamétricas que não seguem a normalidade mas que se ajustaram adequadamente a função de Weibull, a qual possui maior flexibilidade em descrever tendências diversas. Assim, as distribuições diamétricas observadas no presente trabalho encontram-se dentro do já observado para povoamentos plantados de Eucalipto, no entanto, essas não demonstraram distribuição normal dos dados.

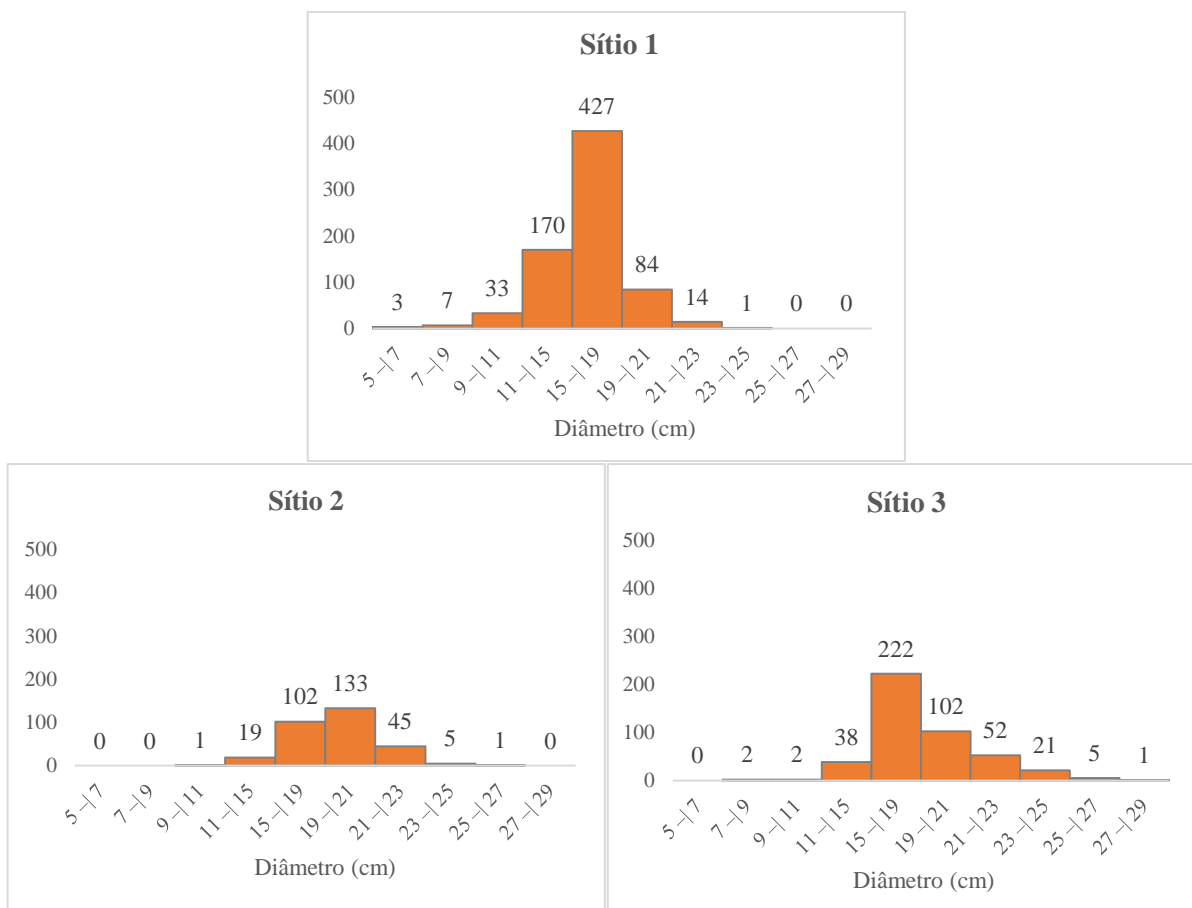


Figura 3. Distribuição de frequência diamétrica nos três sítios estudados.

A tabela 3 apresenta os resultados obtidos pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk, referente as estimativas de volume realizadas pelos métodos da equação volumétrica, fator de forma médio e fator de forma específico para cada sítio estudado. Os resultados indicaram que os valores de volume não apresentaram aderência a distribuição normal, com 5% de probabilidade.

Tabela 3. Parâmetros estatísticos obtidos por meio do teste de Shapiro Wilk, à 5% de probabilidade, para as estimativas de volume (m^3/ha) realizadas por meio dos três métodos avaliados.

	Valor p		
	Método 1	Método 2	Método 3
Sítio 1	0,0113	0,0150	0,0150
Sítio 2	0,0013	0,0012	0,0021
Sítio 3	0,0001	0,0001	0,0001

A tabela 5 apresenta as análises descritivas do volume, IMA e estoques de biomassa, carbono e CO_2 . A estimativa do volume por fator de forma médio (método 2) indicou os maiores volumes e incremento médio anual e, conseqüentemente, os maiores estoques de carbono nos três sítios em estudo. Os estoques estimados são entre 4 a 6% superiores ao estimados quando se obtém o volume por fator de forma específico (método 3) e aproximadamente 12% superior para estimativas por equação (método 1).

Tabela 4. Resultados da análise estatística descritiva dos métodos testados nos três sítios

			Método 1					Método 2					Método 3				
	DAP (cm)	Ht (m)	V (m ³ /ha)	IMA (m ³ /ha.ano)	B (t/ha)	C (t/ha)	EC (tCO ₂ /ha)	V (m ³ /ha)	IMA (m ³ /ha.ano)	B (t/ha)	C (t/ha)	EC (tCO ₂ /ha)	V (m ³ /ha)	IMA (m ³ /ha.ano)	B (t/ha)	C (t/ha)	EC (tCO ₂ /ha)
Sítio 1																	
Mediana	16,5	27,1	376,0	41,8	199,0	89,8	329,0	429,0	47,6	227,0	102,0	374,0	403,0	44,9	214,0	96,2	352,0
Modo	16,6	28,5	336,0	44,6	178,0	80,2	294,0	383,0	42,5	203,0	91,3	334,0	360,0	40,0	191,0	85,9	314,0
Curtose	0,7	6,4	1,58	1,62	1,59	1,61	1,59	1,63	1,61	1,63	1,64	1,63	1,63	1,66	1,64	1,63	1,63
Percentil 1	14,5	25,3	351,0	39,0	186,0	83,7	306,0	399,0	44,3	211,0	95,1	348,0	375,0	41,7	199,0	89,5	328,0
Percentil 2	16,5	27,1	376,0	41,8	199,0	89,8	329,0	429,0	47,6	227,0	102,0	374,0	403,0	44,9	214,0	96,2	352,0
Percentil 3	18,1	28,1	401,0	44,6	213,0	95,7	350,0	458,0	50,8	243,0	109,0	400,0	431,0	47,8	228,0	103,0	376,0
Sítio 2																	
Mediana	19,4	25,5	315	37,5	149	67,2	246	360	42,8	171	76,8	281	346	41,2	164	73,7	270
Modo	19,4	25,4	271,0	32,2	128,0	57,6	211,0	307,0	36,5	145,0	65,4	239,0	295,0	35,1	140,0	62,8	230,0
Curtose	1,8	2,7	0,12	0,16	0,14	0,09	0,12	0,15	0,20	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,15	0,18	0,15
Percentil 1	18,3	24,6	283,0	33,8	134,0	60,3	221,0	322,0	38,3	152,0	68,6	251,0	309,0	36,8	146,0	65,9	241,0
Percentil 2	19,4	25,5	315,0	37,5	149,0	67,2	246,0	360,0	42,8	171,0	76,8	281,0	346,0	41,2	164,0	73,7	270,0
Percentil 3	20,6	26,4	322,0	38,3	152,0	68,6	251,0	368,0	43,9	174,0	78,5	287,0	354,0	42,1	167,0	75,3	276,0
Sítio 3																	
Mediana	18,5	28,4	385,0	55,0	185,0	83,2	305,0	443,0	63,2	212,0	95,6	350,0	416,0	59,4	200,0	89,8	329,0
Modo	16,6	28,4	317,0	57,6	194,0	87,1	251,0	363,0	51,8	174,0	78,3	287,0	341,0	48,7	164,0	73,6	270,0
Curtose	0,9	2,0	-1,62	-1,63	-1,62	-1,63	-1,62	-1,67	-1,67	-1,67	-1,67	-1,67	-1,67	-1,67	-1,67	-1,67	-1,67
Percentil 1	16,9	27,0	347,0	49,6	167,0	75,0	275,0	398,0	56,9	191,0	85,9	314,0	374,0	53,4	179,0	80,8	296,0
Percentil 2	18,5	28,4	385,0	55,0	185,0	83,2	305,0	443,0	63,2	212,0	95,6	350,0	416,0	59,4	200,0	89,8	329,0
Percentil 3	20,1	29,8	424,0	60,5	203,0	91,5	335,0	492,0	70,3	236,0	106,0	389,0	463,0	66,1	222,0	99,9	366,0

Legenda: V = Volume; IMA = Incremento médio anual; B = Biomassa; C = Carbono; ET = Estoque de carbono.

Os dados não apresentaram o pressuposto necessário a normalidade, por isso aplicou-se o teste não paramétrico de Friedman, um teste análogo à ANOVA de medidas pareadas, utilizado para comparar 3 ou mais grupos dependentes entre si. À 5% de probabilidade, o teste identificou a existência de pelo menos uma diferença significativa entre os métodos analisados nas estimativas do volume (m³/ha) nos três sítios estudados. Assim, foi procedida a aplicação do teste post hoc de Wilcoxon W, e comparadas as estimativas uma a uma, que observou a existência de diferença significativa entre os três métodos de estimativa do volume, em todos os três sítios, conforme pode ser observado na tabela 4.

Os resultados obtidos através dos testes estatísticos corroboram com o observado em análise descritiva, e afirmam a existência de diferença, independentemente das características do sítio (espaçamento, espécie e idade) na obtenção de estimativas por meio das equações volumétricas, dos fatores de forma médios e dos fatores de forma específicos.

Tabela 5. Parâmetros estatísticos obtidos por meio do teste de Wilcoxon W na comparação entre as estimativas de volumes (m³/ha) realizadas por meio dos três métodos avaliados.

	Valor p		
	1 vs 2	1 vs 3	2 vs 3
Sítio 1	1,81E-122	2,33E-122	1,24E-122
Sítio 2	1,26E-50	6,34E-52	1,26E-50
Sítio 3	1,21E-74	1,21E-74	1,21E-74

Legenda: 1 vs 2 = método 1 comparado ao método 2; 1 vs 3 = método 1 comparado ao método 3 e 2 vs 3= método 2 comparado ao método 3.

Bonazza (2019) observou maior desvio relativo em relação aos valores paramétricos da cubagem rigorosa para o método que utiliza o fator de forma específico (6,6%), enquanto o menor desvio foi do modelo de Schumacher & Hall (0,2%). Além disso, a distribuição gráfica dos resíduos evidenciou leve tendência e problemas de heterocedasticidade da variância dos resíduos na aplicação do fator de forma para as estimativas volumétricas, o que não foi observado no modelo de Schumacher & Hall, que apresentou resíduos distribuídos de forma homogênea e menor tendenciosidade nas estimativas, indicando assim um bom ajustamento para a estimativa do volume.

Martins (2013) em estudo com *P. caribaea* identificou diferença significativa entre os métodos de estimativa por fator de forma arbitrário de 0,5 e as estimativas obtidos por fator de forma específico desenvolvido para o povoamento e o ajuste de equações volumétricas. E revelou que o uso de fator de forma arbitrário 0,5 superestimam os valores de volume total com casca para o estrato analisado, e que os modelos de Schumacher & Hall e Spurr foram melhores ajuste obtido para o povoamento.

Dessa forma, cabe ressaltar que o uso do fator de forma médio deve ser restrito às condições locais de sítio. Qualquer extrapolação além desses limites pode gerar resultados imprecisos e enviesados, conforme reportado por Pertille et al. (2018). Assim, o uso do fator de forma específico representa uma alternativa interessante, por ser um método de simples aplicação e que pode retornar resultados satisfatórios. No entanto, ressalta-se o identificado por diferentes autores (SCHRODER, 2013; MIRANDA et al, 2015), que indicam superioridade do modelo Schumacher & Hall na obtenção de estimativas volumétricas. Sendo esse o mais indicado para obtenção de estimativas precisas da variável volume quando comparado as estimativas obtidas por fator de forma médio e fator de forma específico.

A tabela 3 apresenta os dados do conteúdo de carbono por planta, por área e para área total de cada sítio estudado. As variações oriundas da aplicação das diferentes metodologias de obtenção do volume influenciaram diretamente nas estimativas dos estoques de CO₂.

Em cada método estudado, para os três sítios, o espaçamento 3 x 2 m (Sítio 1) apresentou os maiores estoques de CO₂, o que evidencia a influência dos fatores de crescimento da planta (idade, espaçamento, clone, solo, clima etc.). Os plantios florestais mais jovens tendem a apresentar menor teor de CO₂ fixado, isso porque as árvores acumulam o carbono em sua estrutura ao longo de todo o seu ciclo de vida. Conforme observado por Wink (2013), uma plantação senil de Eucalipto apresentou maior estoque total médio de carbono comparada às plantações jovens. Além disso, espaçamentos menores apresentam maior acúmulo global de CO₂, mesmo que os resultados por árvore possam ser menores quando comparados à espaçamentos mais amplos. Brianezi (2019) ao comparar o estoque de carbono total em diferentes espaçamentos, observou o maior teor de carbono no espaçamento 2 x 1 m, menor espaçamento avaliado em seu trabalho.

À nível de área estudada, o sítio 3 demonstrou os maiores quantitativos de CO₂ por planta, nos três métodos aplicados, ficando o sítio 2 com valores intermediários e os menores valores de CO₂ por planta foram observados no sítio 1 (espaçamento 3 x 2). O que corrobora com o observado por Sereghetti (2015), que volumes individuais são menores em espaçamento mais densos, refletindo em menor teor de CO₂ por planta no espaçamento 3 x 2, e consequentemente maior teor de CO₂ total da área, considerado o número de árvores por espaçamento. Logo, o maior número de plantas influencia positivamente o estoque total do sítio. Brianezi (2019) observou um aumento de 19% no estoque de carbono total do espaçamento 3 x 3 para o espaçamento 3 x 2. Assim, pensando em capturar mais carbono da atmosfera, menores espaçamentos são mais indicados. O conteúdo de CO₂ total do sítio sofre interferência direta da área de plantio, assim o sítio 1 representa o maior estoque de carbono, devido a extensão de seus plantios.

Tabela 6. Comparação entre os estoques de carbono/planta, estoque de carbono/planta/ano e estoque de carbono total estimado entre os três métodos aplicados em cada sítio.

		Sítio 1	Sítio 2	Sítio 3
Método 1	EP (tCO ₂)	0,2182	0,2552	0,2749
	ET (tCO ₂ /ha)	329	246	305
	ES (tCO ₂)	58.43	31.692	18.995
Método 2	EP (tCO ₂)	0,2490	0,2915	0,3167
	ET (tCO ₂ /ha)	374	281	350
	ES (tCO ₂)	66.666	36.192	21.876
Método 3	EP (tCO ₂)	0,2343	0,2798	0,2977
	ET (tCO ₂ /ha)	352	270	
	ES (tCO ₂)	62.736	34.744	20.563

Legenda: EP = Estoque/planta; ET = Estoque total e EF = Estoque de carbono do sítio.

As figuras 4, 5 e 6 ilustram a distribuição de frequência do estoque de carbono para as três metodologias avaliadas em cada um dos três sítios estudados.

As distribuições de frequência do estoque de CO₂ obtidos pelos métodos da equação, do fator de forma médio e do fator de forma específico, em cada sítio de estudo, estão apresentadas nas figuras 4, 5 e 6, respectivamente. O método da equação volumétrica (método 1) apresentou

diferença significativa à 5% de probabilidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov quando comparado ao método do fator de forma médio (método 2), nos três sítios, e comparado ao fator de forma específico (método 3) apenas no sítio 2 (tabela 4).

Esse resultado evidencia que a forma como os volumes das árvores é estimado influencia no estoque de CO₂ em povoamentos de Eucalipto e evidencia a maior discrepância entre as estimativas obtidas pelas equação volumétrica e o fator de forma médio de Eucalipto.

O material genético consiste em fator determinante nas estimativas obtidas por meio de fatores de forma, gerais ou específicos. Isso porque influenciam diretamente a forma da árvore, nesse caso, materiais genéticos que representem maior conicidade da árvore geram maior instabilidade nas estimativas por meio de fatores de forma. Logo, considerando a ocorrência de diferentes materiais genéticos nos três sítios estudados, tal fato pode explicar a existência de diferença significativa na distribuição dos estoques entre o método da equação e do fator de forma específico apenas no sítio 2, o que não é observado nos demais.

No sítio 1, observa-se maior simetria na distribuição dos dados ao longo do eixo horizontal do gráfico, com maior frequência observada nas duas classes entre o limite inferior de 200 kgCO₂ e superior de 300 kgCO₂. No entanto, o método da equação apresenta maior frequência observada na classe de 200-|250 kgCO₂. O sítio 2 apresenta deslocamento da curva para a direita nos métodos de estimativa por fator de forma médio e específico, o que não se observa no método da equação volumétrica, evidenciando a diferença entre as metodologias e a influência das maiores estimativas em volume observada nos métodos do fator de forma médio e específico, respectivamente.

Oliveira (2011), ao comparar a distribuição diamétrica das estimativas por fator de forma médio com os dados reais da cubagem rigorosa, observou menor desvio em relação aos dados paramétricos da cubagem nas classes mais baixas, tal fato pode ser explicado pelo aumento da conicidade da árvore a medida que se tem incremento em idade e conseqüentemente em diâmetro. Árvores mais jovens são mais cilíndricas quando comparadas as arvores mais velhas, eximida a influência de demais fatores. Logo, o fator de forma médio não apresenta estimativas confiáveis considerada a variação abrupta da forma da árvore em classes extremas, o que indica mais uma vez a importância de optar pelo método da equação volumétrica.

O sítio 3 demonstrou aumento discrepante observado na classe 550 à 600 kgCO₂ nos métodos da equação volumétrica e do fator de forma médio, representando distribuição eventual dos dados nas últimas classes, que prolonga o encerramento da curva ao longo do eixo x do gráfico.

Tabela 7. Resultados dos testes de Kolmogorov-Smirnov à 5% de probabilidade na comparação da distribuição de frequência do estoque de CO₂, entre os diferentes métodos de estimativa do volume.

Sítio	D			d
	1 vs 2	1 vs 3	2 vs 3	
1	0,0650	0,0365	0,0338	0,0500
2	0,1569	0,1229	0,0429	0,0777
3	0,0899	0,0472	0,0427	0,0645

Legenda: D= valor calculado; d= valor tabelado; 1 vs 2 = método 1 comparado ao método 2; 1 vs 3 = método 1 comparado ao método 3; 2 vs 3 = método 2 comparado ao método 3.

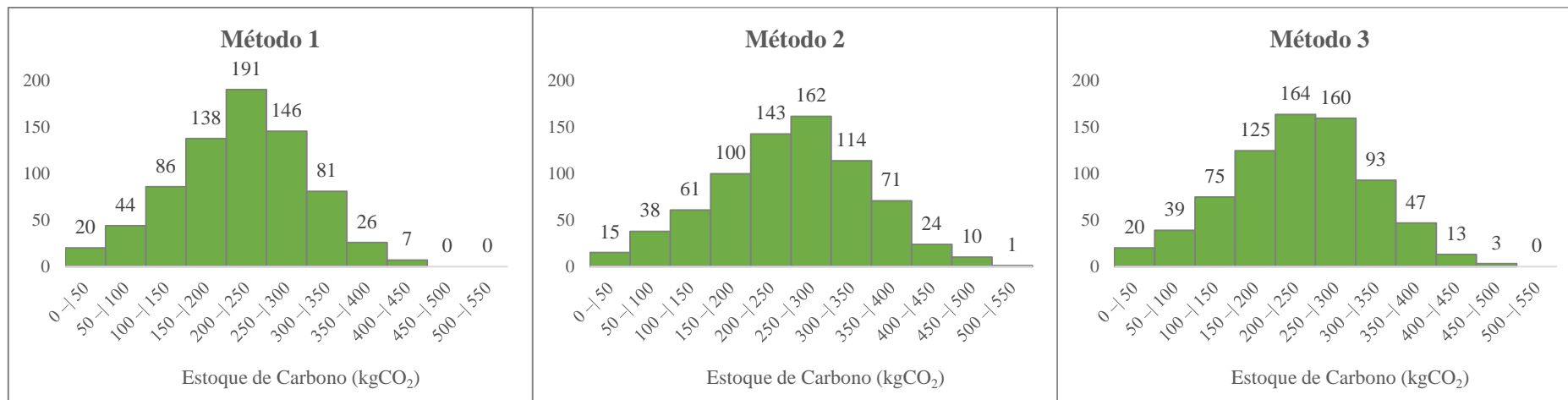


Figura 4. Distribuição de frequência do estoque de carbono no Sítio 1, para as estimativas pelo método da equação volumétrica (método 1), fator de forma médio (método 2) e fator de forma específico (método 3).

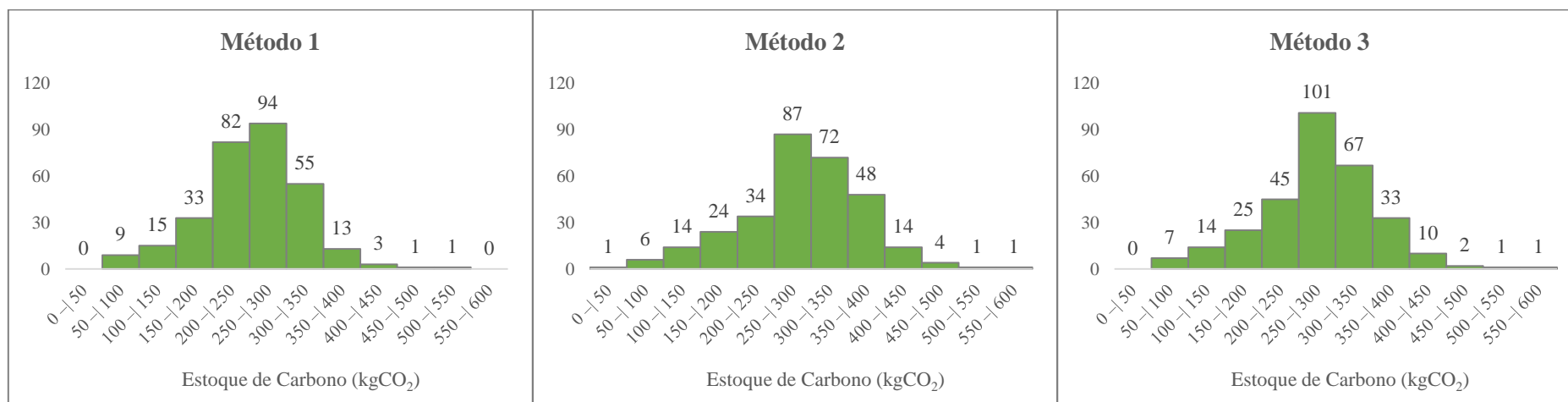


Figura 5. Distribuição de frequência do estoque de carbono no Sítio 2, para as estimativas pelo método da equação volumétrica (método 1), fator de forma médio (método 2) e fator de forma específico (método 3).

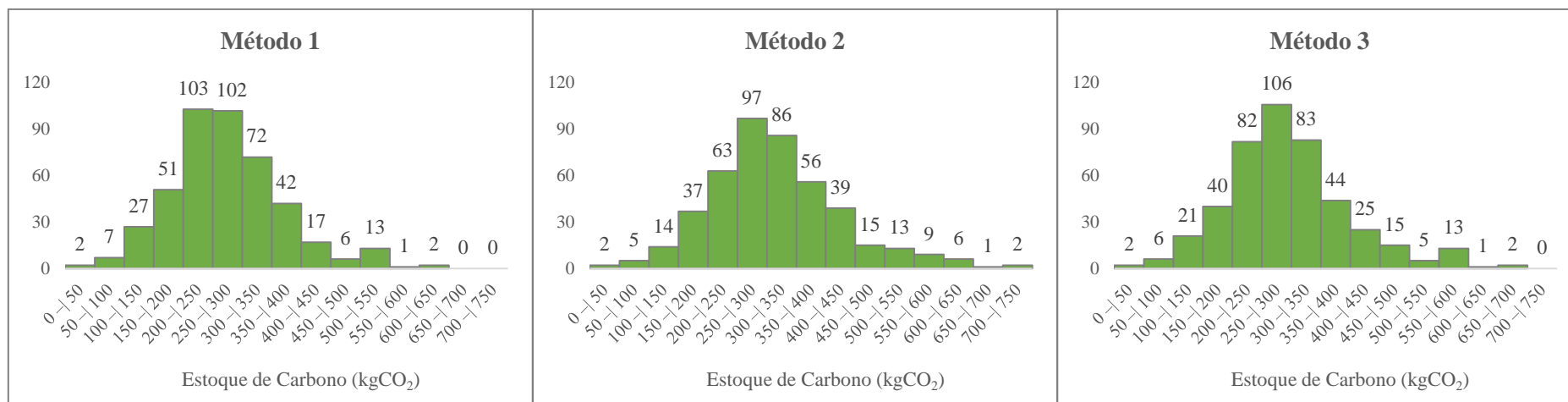


Figura 6. Distribuição de frequência do estoque de carbono no Sítio 3, para as estimativas pelo método da equação volumétrica (método 1), fator de forma médio (método 2) e fator de forma específico (método 3).

5. CONCLUSÃO

As metodologias analisadas apresentaram diferença significativa entre si, demonstrando que o método de estimativa do volume apresenta influência significativa nas estimativas dos estoques de biomassa e de carbono em povoamentos de Eucalipto. Dentre os métodos avaliados, recomenda-se o uso de equações volumétricas para obtenção de estimativas mais acuradas da variável volume em povoamentos de Eucalipto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHARD, F. *et al.* Estimativas melhoradas das emissões líquidas de carbono da mudança da cobertura da terra nos trópicos para a década de 1990. **Ciclos Biogeoquímicos Globais**, v. 18 p. 1-11, 2008. DOI: 10.1029/2003GB002142. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2003GB002142>. Acesso em: 15 mar. 2022.

ALVARES, C. A. *et al.* Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

ALVES, A. M. C.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C. Quantificação da Produção de Massa seca em Clones de Eucaliptos com 4,5 anos, no Pólo Gesseiro do Araripe-PE. **Rev Ciênc Agrár**, Belém, n. 48, p. 161-173, jul./dez. 2007.

AZEVEDO, G. B. *et al.* Estimativas volumétricas em povoamentos de Eucalipto sob regime de alto fuste e talhadia no sudoeste da Bahia. **Pes Flor Bras**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 309-318, out./dez. 2011.

BALBINOT, R. *et al.* Estoque de carbono em plantações de *pinus* spp. em diferentes idades no sul do estado do paraná. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 317- 324, abr./jun. 2008.

BALBINOT, R. *et al.* Inventário do carbon orgânico em um plantio de *pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. **RECEN**, Paraná, v. 5, p. 59-68, 2003.

BONAZZA, M. *et al.* Métodos para estimativas volumétricas de *Pinus patula*. **Adv For Sci**, Cuiabá, v. 6, n. 2, p. 673-679, 2019.

BRIANEZI, D. *et al.* Balanço de carbono em monocultivo de Eucalipto com diferentes arranjos espaciais. **RBAS**, Viçosa, v. 9, n. 1, p. 27-33, mar., 2019.

CABACINHA, C. D. **Um método para a realização do inventario florestal suprimindo a cubagem rigorosa**. 2003. 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

CALDEIRA, M. V. W. *et al.* Quantificação da biomassa acima do solo de *Acacia mearnsii* De Wild., procedencia Batemans Bay – Austrália. **Ci FI**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 79-91, 2001.

CARVALHO, J. L. N. *et al.* Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **R Bras Ci Solo**, Viçosa, v. 34, p. 277-289, 2010.

CERRI, C. E. P. Tropical agriculture and global warming: Impacts and mitigation options. **Sci Agric**, Piracicaba, v. 64, n. 1, p. 83-99, jan./fev. 2007.

COSTA, J. A. **Qualidade da madeira de *Eucalyptus urograndis*, plantados no Distrito Federal, para produção de celulose kraft.** 2011. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

CATALUNHA, M. J. *et al.* Aplicação de cinco funções densidade de probabilidade a séries de precipitação pluvial no Estado de Minas Gerais. **Rev Bras Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 153-162, 2002.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **GEOINFO**. Brasil, 2020. Disponível em: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Abrasil_solos_5m_20201104. Acesso em: 10 abr. 2022.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Assessment of the status of the development of the Standards for the Terrestrial Essential Climate Variables: biomass.** Roma: FAO, 2009. 18 p.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FRA2015 Brazil, Country Report.** Rome: FAO, 2014. 23 p.

FEUCHARD, L. D. **Influência do espaçamento de plantio e idade de colheita na qualidade da madeira de Eucalipto para celulose.** 2015. 46 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2015.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos de Biometria Florestal.** Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 1992. 269 p.

FIGUEROA, P. T.; SOUTHER, L. F. P. Estudo de um modelo matemático para o corte sustentável e quantificação do estoque de carbono em uma floresta de Eucalipto. In: Safety Health and Environment World Congress. 12., 2012, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo, 2012.

FRONDIZI, I. M. R. L. **O mecanismo de desenvolvimento limpo: guia de orientação 2009.** Rio de Janeiro: Imperial Novo Milênio, 2009. 131p.

GATTO, A. **Estoques de carbono no solo e na biomassa de plantações de Eucalipto na região centro-leste do estado de Minas Gerais.** 2005. 73 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

GONÇALEZ, J. C. *et al.* Relações entre dimensões de fibras e de densidade da madeira ao longo do tronco de *Eucalyptus urograndis*. **Sci For.**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 81-89, mar. 2014.

HOEN, H.; SOLBERG, B. Potential and economics efficiency of carbon sequestration in Forest biomass through silvicultural management. **Forest Sci**, Bethesda, v. 40, n. 3, p. 429-451, 1994.

HOUGHTON, R. A. As florestas e o ciclo de carbono global: armazenamento e emissões atuais. In: Seminário emissão x seqüestro de CO₂ – uma nova oportunidade de negócios para o Brasil, 1994, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, 1994. p. 38–76.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual IBÁ 2021**. 2021. 176 p.

IBARR, M.A. **Estoque de carbono e fluxos de óxido nitroso e metano do solo em plantios de pinus e floresta nativa**. 2016. 82 p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2007. Fourth Assessment Report on climate change impacts, adaptation and vulnerability of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, Cambridge University, 2007. 939 p.

IPCC – Intergovernmental panel on climate change. **Climate change 2014: synthesis report**. Geneva, Switzerland, 2014. p. 1-151.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Report on Climate Change**. Cambridge, Cambridge University, 2011. 615 p.

JACOVINE, L. A. G. *et al.* Estocagem e geração de créditos de carbono. In: VALE, A. B. *et al.* **Eucaliptocultura no Brasil - Silvicultura, Manejo e Ambiência**. Viçosa: Editora Suprema, 2013. 551 p.

JUNIOR, W. V. G.; MATIAS, R. A. M.; SOARES, T. S. Desenvolvimento inicial de eucalipto clonal em diferentes espaçamentos. **Agrotec**, Ipameri, v. 7, n. 2, p. 40-46, 2016. DOI: 10.12971/2179-5959. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.12971/2179-5959/agrotecnologia.v7n2p40-46>. Acesso em: 10 abr. 2022.

KIRCHNER, F. F. Análise dos mínimos quadrados. **Floresta**, Curitiba, v. 18, n. 1 e 2, p. 12-35, 1988.

LAL R. **Forest soils and carbon sequestration** 3. ed. EUA: The Ohio State University. 2004. 258 p.

MACHADO, L.S. **Ponderações sobre o efeito estufa e o aquecimento global**. 2012. 31 p. Monografia (Licenciado em Química) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012.

MARTINS, A. P. M. **Comparação de métodos para estimativa de volume individual em povoamentos florestais**. 2013. 61 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2013.

MIGUEL, E.P. *et al.* Ajuste de modelo volumétrico e desenvolvimento de fator de forma para plantios de *Eucalyptus grandis* localizados no município de Rio Verde – GO. **Enc Bio**, Goiânia, vol. 6, n. 11 p. 1-13, 2010.

MIRANDA, D. L. C.; JUNIOR, V. B.; GOUVEIA, D. M. Fator de forma e equações de volume para estimativa volumétrica de árvores em plantio de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Plena**, v. 11. n. 3, fev. 2015.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1986. 434 p.

OLIVEIRA, C.P. **Método da altura relativa na estimativa do volume individual para seleção de materiais genéticos de Eucalipto**. 2011. 36 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2011.

PAIXÃO, F. A. *et al.* Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de Eucalipto. **R Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 411-420, 2006.

PÉLLICO NETTO, S. Equivalência volumétrica: uma nova metodologia para estimativa do volume de árvores. **Ci Ag Amb**, Curitiba, v. 2, n.1, p. 17-30, jan./mar. 2004.

PERTILLE, C. T. *et al.* Volume prediction through form factor and regression models by age class for *Pinus taeda* L. **Adv For Sci**, Cuiabá, v. 5, n. 3, p. 431-436, 2018.

PÉREZ-CRUZADO, C.; MERINO, A.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. A management tool for estimating bioenergy production and carbon sequestration in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* grown as short rotation woody crops in north-west Spain. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 35, n. 7, p. 2839-2851, 2011.

REIS, M. G. F. *et al.* “Seqüestro” e armazenamento de carbono em florestas nativas e plantadas nos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo. In: Seminário Emissão x Sequestro de CO₂: Uma oportunidade de negócios para o Brasil. 1994, Rio de Janeiro. **Anais [...]** Rio de Janeiro: CVRD, 1994. p. 155-195.

RIBEIRO, F. A.; ZANI FILHO, J. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de Eucalipto. **IPEF**. n. 46, p. 76-85, jan./dez. 1993.

RIO DE JANEIRO. Governo do estado do Rio de Janeiro. **Fórum para o desenvolvimento da Região Centro-Sul Fluminense – subsídios para debates e informações gerais**. Rio de Janeiro: Banerj / Jornal do Brasil, 1992, 80 p.

SANQUETTA, C. R. *et al.* Estimativa de carbono individual para *Araucaria angustifolia*. **Pesq Agropec Trop**, Goiânia, v. 44, n. 1, p. 1-8, jan./mar. 2014.

SCARPINELLA, G.A. **Reflorestamento no Brasil e o Protocolo de Kyoto**. 2002. 182 p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SCHRÖDER, T. *et al.* Métodos de estimativa de volume comercial para *Eucalyptus grandis*: especificidades e recomendações. **Pesq Flor Bras**, v. 33, n. 73, p. 01-07, 2013.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria Florestal**. 1. ed. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. 352 p.

SEREGHETTI, G. C. *et al.* Efeito do espaçamento no crescimento e na densidade básica da madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em florestas de ciclo curto. **Energ Agric**, Botucatu, vol. 30, n. 3, p. 257-262, jul./set. 2015.

SETTE, Jr. *et al.* Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Rev Árv.**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1183-1190, 2012.

SILVA, C. A. **Carbono na parte aérea de plantios de *Eucalyptus* spp. em nível de árvore por amostragem destrutiva e para talhões inteiros após o ajuste de métricas LiDAR**. 2013. 152 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

SILVA, J. A. A.; PAULA NETO, F. **Princípios básicos de dendrometria**. Recife: Imprensa universitária da UFRPE, 1979, 191 p.

SOMOGYI, Z. *et al.* Indirect methods of large forest biomass estimation. **Europe Journal Forest Research**, 2006.

SOUZA, F.M.L. **Estudo comparativo da madeira e polpação de *Eucalyptus urophylla* e do híbrido *E.urophylla* x *E.grandis* em dois modelos silviculturais**. 2012. 83 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2012.

TRUGILHO, P. F. Densidade básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. **Ciênc Agrotec**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1228-1239, set./out. 2009.

VIDAURRE, G. B. **Caracterização anatômica, física e físico-mecânica da madeira de Paricá (*Schizolobium amazonicum*) para produção de energia e polpa celulósica**. 2010. 74 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

VIEIRA, M.; SCHUMACHER, M.V.; TRÜBY, P. *et al.* Nutritional implications based in different intensities of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* biomass harvesting. **Ciênc Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 3, p. 432- 439, mar. 2015.

VILAS BÔAS, O.; MAX, J. C. M.; MELO, A. C. G. Crescimento comparativo de espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* no município de Marília, SP. **Rev Inst Flor**, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 63-72, jun. 2009.

WINK, C. A idade das plantações de *Eucalyptus* sp. influenciando os estoques de carbono. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 333-343, abr.-jun., 2013.

ANEXO A – ÁREA DOS TALHÕES

Tabela 1. Área dos talhões na fazenda A, município de Rio das Flores, RJ.

Talhão	Espaçamento (m)	Área (ha)
1	3x3	9,65
2	3x3	32,81
3	3x3	56,54
4	3x3	10,04
5	3x3	0,76
6	3x3	2,46
7	3x3	12,3
8	3x3	6,25
9	3x2	30,7
10	3x2	4,82
11	3x2	44,44
12	3x2	63,67
13	3x2	12,99
14	3x2	8,3
15	3x2	9,12

Tabela 2. Área dos talhões na fazenda B, Paty do Alferes, RJ.

Talhões	Área (ha)
1	6,41
2	9,96
3	12,62
4	8,82
5	8,32
6	4,92
7	2,85
8	2,47
9 (desbastado)	3,33
10 (desbastado)	3,03