








Custos, tempo e precisão: otimização do inventário florestal pré-corte em povoamento de eucalipto

Luiz Otávio Rodrigues Pinto¹, Daniel Dantas¹, Marcela de Castro Nunes Santos Terra¹, José Márcio de Mello¹, Christian Dias Cabacinha²

¹Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciências Florestais, Campus Universitário, CP. 3037, CEP 37200-900, Lavras, MG, Brasil

²Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Agrárias, Avenida Universitária, n. 1.000, Bairro Universitário, CEP 39404-547, Montes Claros, MG, Brasil

*Autor correspondente:
dantasdaniel12@yahoo.com.br

Termos para indexação:

Floresta plantada
Amostragem florestal
Avaliação econômica

Index terms:

Planted forest
Forest sampling
Economic evaluation

Histórico do artigo:

Recebido em 20/02/2022
Aprovado em 25/05/2023
Publicado em 29/05/2024

Resumo - O inventário florestal constitui uma prática fundamental para quantificar e qualificar o potencial de uma floresta. Intensidade de amostragem, tamanho e forma das parcelas são pontos relevantes no planejamento dessa atividade, pois afetam diretamente os custos e tempo de coleta de dados, além de influenciar na sua precisão. Este estudo teve como objetivo avaliar, em termos de precisão, custos e tempo, a utilização de diferentes tamanhos, formas e arranjos de parcelas amostrais na realização do inventário florestal pré-corte de *Eucalyptus* spp. A pesquisa foi realizada em uma fazenda no norte de Minas Gerais, onde foram realizados o censo florestal e a cubagem rigorosa. Foram considerados 16 cenários: dois processos de amostragem (amostragem sistemática e amostragem casual simples), quatro tamanhos de parcela (200, 300, 400 e 500 m²) e duas formas (circular e retangular). A intensidade amostral foi fixada em 5 parcelas para todos os cenários. Realizou-se 10.000 simulações pelo método de Monte Carlo, verificando-se a probabilidade de os valores estarem próximos à média. A análise combinada entre erro, custos e tempo de medição apontou que, para um plantio de eucalipto aos 8 anos de idade, a amostragem casual com parcelas circulares de 300 m² representa o cenário amostral ótimo.

Costs, time and accuracy: optimizing the pre-harvest forest inventory in an eucalyptus stand



Abstract - Forest inventory is a key practice for quantifying and qualifying the productive potential of a forest. Sampling intensity, size and shape of the sample plots are crucial for this activity, as they affect directly the costs and time of data collection and the accuracy. This study aimed to evaluate, in terms of precision, costs and time, the use of different sizes, shapes and arrangements of sample plots in a *Eucalyptus* spp. pre-harvest forest inventory. The research was conducted on a farm, northern of Minas Gerais State, Brazil. A forest census and volume of wood with rigorous cubing data were performed. For the analysis we considered two sampling processes (systematic and simple casual sampling), four plot sizes (200, 300, 400 and 500 m²) and two shapes (circular and rectangular). The sample intensity was set in 5 plots for all scenarios. Simulations (10,000) were carried out by the Monte Carlo method, in order to verify the probability of the values to be close to the mean. The combined analysis of error, costs and measurement time showed that for a 8-year-old stand of *Eucalyptus* spp., casual sampling with circular sample plots of 300 m² represents the optimal sampling scenario.

Introdução

Os procedimentos de mensuração florestal são elementos fundamentais e merecem atenção, por serem a base para a determinação do volume de madeira em uma determinada área (Gregoire et al., 2016). A informação do volume em um povoamento florestal é imprescindível para o manejo de florestas, levando em conta que grande parte dos processos produtivos em uma empresa é dependente dos dados de produtividade que são obtidos por meio do inventário (Dantas et al., 2020a; Terra et al., 2022). O volume para árvore individual serve como ponto de partida para decisões relacionadas a tratos silviculturais, colheita e transporte da produção volumétrica da madeira. Sendo assim, é fundamental que a obtenção do volume total ou em determinadas partes do tronco de árvores seja realizada corretamente, representando bem a população amostrada (Dantas et al., 2020b).

A obtenção de estimativas de volume pode ser feita por inventário florestal contínuo ou temporário, que consiste, basicamente, na definição de um sistema de amostragem, alocação de parcelas na área e obtenção das variáveis de interesse. A enumeração total ou censo, embora realizada sem a ocorrência de erros amostrais, só é praticável em áreas pequenas e de grande importância econômica, devido ao alto custo que esta operação apresenta (Cesaro et al., 1994). No entanto, os procedimentos de amostragem disponíveis permitem conhecer as estimativas de uma determinada população com alta precisão.

Em um inventário florestal, a alocação de parcelas e medição das árvores em campo possuem custo elevado, devido ao tempo necessário para os levantamentos, marcação das parcelas e medição de um grande número de árvores (Binoti et al., 2013; Dantas et al., 2020c). Uma dificuldade operacional verificada no inventário está relacionada à determinação do tamanho e forma das parcelas necessárias para que se tenha uma boa representatividade da população (Pascual et al., 2019). Esses fatores, além de interferirem na exatidão das medições, afetam de forma significativa o custo dos inventários florestais.

De acordo com Husch (1971), para qualquer forma e tamanho da unidade amostral, é possível calcular o volume de madeira da floresta sem erros sistemáticos; porém, dadas certas características florestais, a extensão e a forma ótima das unidades amostrais

variam. Assim, para a realização do inventário florestal, deve ser planejado o tamanho, a forma e o processo de amostragem ideais para a população, buscando identificar a combinação que proporcione um nível de precisão aceitável com o mínimo de custo.

Nota-se que, mesmo em diferentes regiões, o processo de amostragem pode ser repetido. Entretanto, os tamanhos das parcelas utilizadas nos trabalhos de inventário florestal variam substancialmente (Pascual et al., 2019). Em trabalhos encontrados na literatura existem explicações para os diferentes tipos de amostragem, mas não para os diferentes tamanhos de parcelas (Zhang et al., 2014).

Destaca-se, portanto, a existência da demanda por um tamanho e forma de unidade amostral, associados a um tipo de amostragem, capaz de proporcionar uma boa representatividade da população ao mesmo tempo em que permite uma redução do número de árvores a serem medidas por parcelas, sem que isso interfira de forma expressiva na qualidade dos resultados, e possibilite a redução do tempo e do custo das medições. São necessários estudos que forneçam subsídios para a tomada de decisões, por parte do manejador, na condução do inventário florestal. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar, em termos de precisão, custos e tempo, a utilização de diferentes tamanhos, formas e arranjos de unidades amostrais no inventário florestal pré-corte em plantio de *Eucalyptus* spp.

Material e métodos

Área de estudo

O povoamento de eucalipto está localizado no norte de Minas Gerais (16°40'59,66" S e 42°37'45,80" W), sendo considerado um talhão com área de 15,77 ha, espaçamento de 3,6 x 2,6 m e 8 anos e 7 meses. A altitude média é de 950 m e o clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwb (clima subtropical com inverno seco e verão quente), com temperatura média de 21 °C (Alvares et al., 2013). A precipitação média anual histórica dos últimos dez anos é de 817 mm, com chuvas concentradas no período de outubro a março (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021). O município pertence a sub-bacia do córrego Itacambiruçu, na Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha no Nordeste de Minas.

De acordo com Santos et al. (2011), os solos no município são do tipo: afloramento rochoso, cambissolo, latossolo vermelho-amarelo, latossolo vermelho-escuro, litossolo, podzólico vermelho-escuro. De forma geral, são solos muito pobres e pouco produtivos, apresentando maior dificuldade de mecanização devido às características do relevo.

Censo florestal

O censo florestal foi realizado com a medição de diâmetros de todos os indivíduos do talhão, com medidas de circunferência a 1,30 do solo (CAP), convertidas, posteriormente, em diâmetro a 1,30 m do solo (DAP). A altura dos indivíduos foi mensurada durante a realização da cubagem rigorosa. A partir dos dados de diâmetro e altura coletados na etapa da cubagem, foi ajustado o modelo hipsométrico de Curtis (1967), amplamente

utilizado no setor florestal para estimar a altura de cada indivíduo da população (Tabela 1).

Cubagem rigorosa

Os indivíduos foram divididos em seis classes diamétricas, com intervalos fixos de 4 cm, iniciando na classe de 0 a 4 cm, sendo o último intervalo aberto. Foram abatidas e cubadas 110 árvores, sendo 20 árvores em cada classe diamétrica, exceto para a última classe, onde foram cubadas 10 árvores.

A cubagem rigorosa seguiu a metodologia de Smalian, com medições dos diâmetros nas posições 0,10, 0,30, 0,50, 0,70, 0,90, 1,10, 1,30, 2,0 m, sendo a partir desse ponto mensurados diâmetros em intervalos de 1 m, até atingir diâmetro mínimo de 4 cm. Após a determinação dos volumes, ajustou-se o modelo volumétrico de Schumacher e Hall para realizar as estimativas dos volumes das demais árvores do censo florestal (Tabela 1).

Tabela 1. Equações hipsométrica e volumétrica e suas respectivas estatísticas.

Table 1. Hypsometric and volumetric equations and their respective statistics.

Equação	R ²	Syx	Erro (%)	Autor
$\ln(H) = 3.55507 - 5.91299 * (1/D)$	0,70	2,24 m	9,1	Curtis (1967)
$\ln(V) = -10,64725 - 1,75955 * \ln(D) + [1,32156 * \ln(H)]$	0,99	0,0077 m ³	2,5	Schumacher & Hall (1933)

Em que: H = altura total; D = diâmetro a 1,3 m do solo; Ln = logaritmo neperiano; e = erro de estimativa; V = volume da árvore.

Cenários de amostragem

Para trabalhar os cenários de diferentes tamanhos e formas de parcelas, todas as árvores foram georreferenciadas. Foi realizado um caminhamento nas linhas de plantio, para obtenção dos pontos de controle, com auxílio de um GPS para georeferenciamento das árvores. Esse foi realizado com o uso de imagens de satélite e Google Earth Pro, com pontos de controle obtidos com GPS geodésico e com controle do espaçamento das linhas de plantio e do número de árvores por linha. Com o uso das imagens de satélite, foi possível definir um centroide para cada árvore, possibilitando o georeferenciamento da mesma.

A partir do georeferenciamento, foi possível realizar os cenários de amostragem (Tabela 2). Tais cenários foram gerados a partir da combinação entre dois processos de amostragem da população -

amostragem sistemática (AS) e amostragem casual simples (ACS), quatro tamanhos de parcela e duas formas de parcela – circular e retangular (Figura 1). A intensidade amostral foi fixada em 5 parcelas em todos os cenários, por ser o número suficiente para demonstrar representatividade da área.

A descrição do tamanho das unidades amostrais para as duas formas de parcelas avaliadas está apresentada na Tabela 3.

Foram utilizados nesse estudo os tamanhos de parcelas mais comumente utilizados em inventários florestais de plantios comerciais na região (200, 300, 400 e 500 m²). Outros tamanhos comumente utilizados na região, e encontrados na literatura, correspondem a valores intermediários a estes, como 348 m² (Andrade et al., 2018) e, em algumas situações, valores um pouco maiores, como 600 m² (Binoti et al., 2013).

Tabela 2. Descrição dos cenários avaliados, de acordo com o sistema de amostragem, tamanho e forma das parcelas.

Table 2. Description of the evaluated scenarios, according to the sample system and plots size and form.

Cenário	Amostragem	Parcela		Cenário	Amostragem	Parcela	
		Forma	Área (m ²)			Forma	Área (m ²)
1	Aleatória	Circular	200	9	Sistemática	Circular	200
2			300	10			300
3			400	11			400
4			500	12			500
5		Retangular	200	13		Retangular	200
6			300	14			300
7			400	15			400
8			500	16			500

Tabela 3. Características das unidades amostrais utilizadas para a amostragem de uma floresta de *Eucalyptus* spp.

Table 3. Characteristics of the sample plots used for a *Eucalyptus* spp. stand.

Área da parcela (m ²)	Raio (parcela circular)	Dimensões (parcela retangular)
200	8,0 m	13 x 15,4 m
300	9,8 m	15 x 20 m
400	11,3 m	16 x 25 m
500	12,6 m	20 x 25 m

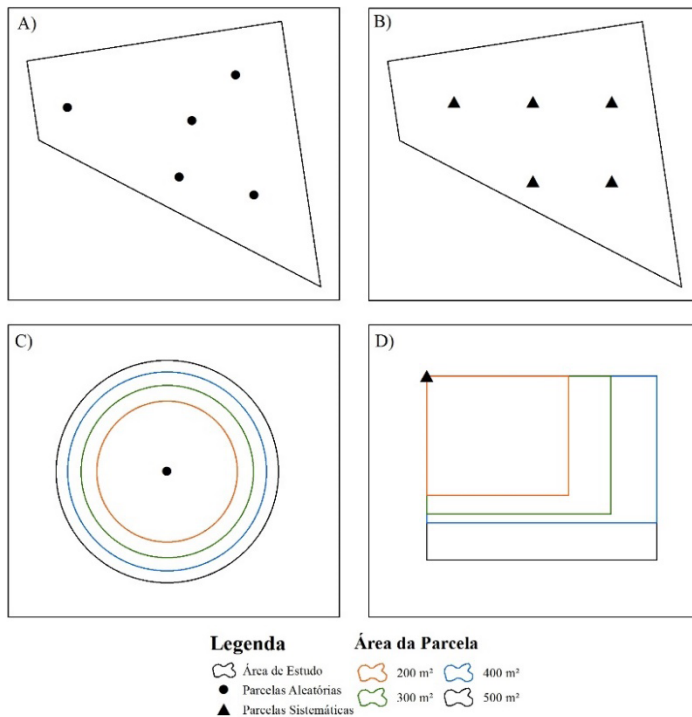


Figura 1. Distribuição das unidades amostrais (A) aleatória, (B) sistemática; e modelo esquemático dos diferentes tamanhos de unidades amostrais utilizados nas suas formas (C) circular e (D) retangular.

Figure 1. Distribution of sample plots (A) random, (B) systematic; and a schematic model of the different sizes of sample units used in their (C) circular and (D) rectangular shapes.

Análises estatísticas

O processamento dos dados obtidos em cada um dos 16 cenários de amostragem (simulações) foi realizado através dos estimadores de ACS e AS propostos por Cochran (1977). O erro do processamento foi estimado utilizando-se a distribuição *t-student* com nível de probabilidade de 0,05 (t tabelado: 2,7764).

A avaliação dos cenários baseou-se na comparação entre os erros dos inventários florestais. A comparação dos resultados (estimativas) obtidos para cada cenário foi feita por meio da análise da proximidade entre os valores das estimativas e do parâmetro encontrado no censo, por meio de desvio padrão, coeficiente de variância e erros relativos.

Além disso, como critério de avaliação dos cenários, foi utilizado o método de Monte Carlo, como apresentado em alguns trabalhos como Jarochinski et al. (2014) e Martins et al. (2015). O método de Monte Carlo é amplamente utilizado para estimar a distribuição de resultados baseados em variáveis de entrada e a distribuição associada. A simulação desse método baseia-se na frequência relativa de ocorrência da variável que se aproxima da probabilidade matemática de ocorrência do mesmo fenômeno, quando a simulação é repetida diversas vezes. Foram realizadas as seguintes etapas:

- Foram geradas estatísticas descritivas, de posição e dispersão, para cada um dos cenários estudados;
- Identificaram-se as variáveis de entrada que apresentavam correlação com o resultado final, selecionando-se a média volumétrica e o desvio padrão;
- Para a simulação do modelo, foram gerados números aleatórios, com 10.000 simulações, considerando uma distribuição normal, obtendo-se uma série de valores para a variável em estudo;
- Analisou-se a probabilidade de ocorrência do valor observado de cada cenário em seu respectivo histograma de frequência. Tal probabilidade corresponde ao ponto em que a curva de frequência se cruza com o limite inferior da curva da frequência cumulativa. Portanto, quanto maior a probabilidade de ocorrência do valor observado, mais eficiente é a amostragem.

Análise econômica

A análise econômica consistiu no cálculo e comparação dos custos de medição envolvidos em cada um dos 16 cenários de inventário florestal. Para a geração dos valores em cada cenário, utilizou-se como base o

estudo de Binoti et al. (2013). Para a composição de custos, esses autores consideraram todos os serviços envolvidos no inventário florestal, como planejamento, coleta de dados, hospedagem, transporte e alimentação da equipe. Neste estudo, optou-se por considerar os custos de coleta de dados nas parcelas, possibilitando assim a comparação direta dos custos entre cenários, sem a necessidade de considerar custos que são comuns a todos os cenários.

Portanto, a partir dos custos de coleta de dados por parcela apresentado por Binoti et al. (2013), foram feitas as correções dos custos para valores atuais, de acordo com o índice nacional de preços ao consumidor amplo (IPCA) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021) com data de referência de abril de 2021 e calculado, então, um valor de custo de coleta de dados em parcelas amostrais por m² (Tabela 4). A partir do valor por m², foram calculados os custos de cada cenário.

Para a avaliação econômica, também foram estimados o tempo de coleta de dados e o tempo de deslocamento em função da área da parcela, conforme proposto por Péllico Netto et al. (2014). As equações para estimação do tempo são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 4. Valores de custo de coleta de dados e custo total da parcela (Binoti et al., 2013), corrigidos para valores atuais.

Table 4. Data collection cost values and total plot cost (Binoti et al., 2013), corrected to current values.

	Binoti et al. (2013)	Valores atuais*
Coleta de dados	R\$ 56,27	R\$ 81,69
Parcela**	R\$ 107,90	R\$ 156,65

* O preço atual foi corrigido de acordo com o IPCA (IBGE, 2021) com data referência de abril de 2021. (Índice de correção no período 1,45; valor percentual correspondente 45,2%). O custo apresentado por Binoti et al. (2013) foi proposto com base em parcelas de 600 m². Para cada parcela, foram considerados os custos de hospedagem, alimentação e transporte.

Tabela 5. Equações para estimativa de tempo de coleta de dados e deslocamento.

Table 5. Equations for estimating data collection and travel time.

Variável	Equação ajustada	R ² aj. (%)	Syx (%)
Locomoção	$\hat{T} = 1,6656 \cdot A^{0,307681}$	93,72	1,92
Coleta de dados	$\hat{T} = 0,0805 \cdot A^{0,966095}$	92,43	4,60

Em que: \hat{T} = tempo estimado; A = área da parcela; R² aj. = coeficiente de determinação ajustado, em porcentagem; Syx = desvio padrão, em porcentagem.

Resultados

As estatísticas descritivas dos dados obtidos por meio do censo florestal estão apresentadas na Tabela 6.

Processamento do inventário florestal

Na Tabela 7 estão apresentados os resultados do processamento do inventário florestal nos diferentes cenários analisados. É possível observar que todos os cenários apresentaram erros considerados aceitáveis (< 10%), com exceção de amostragem casual simples (ACS) retangular-200 m² (14,5%). Os menores erros foram obtidos para ACS-circular-400 m², ACS-

circular-300 m² e ACS-retangular 500 m². De maneira geral, há redução do erro conforme a área da parcela aumenta, sendo essa redução ainda mais notória na ACS. Também é possível observar certa superioridade das parcelas circulares, em relação às retangulares, em termos de erro médio.

A comparação do volume médio por hectare, determinado pelos diferentes cenários testados, está apresentada na Tabela 8. A exatidão do volume por hectare para os diferentes cenários realizados apresentou baixos valores de variação em relação ao censo florestal, sendo inferiores a 5%, exceto para o cenário de amostragem sistemática, parcela circular e área de 300 m².

Tabela 6. Resultados do censo florestal realizado em um plantio de *Eucalyptus* spp. aos 8 anos e 7 meses.

Table 6. Results of the forest census carried out in a plantation of *Eucalyptus* spp. at 8 years and 7 months.

DAP	HT	Volume árv ⁻¹	Sx	S ² x	CV%	Volume total	Volume
16,81 cm	24,56 m	0,2373 m ³	0,0548 m ³	0,0030 m ⁶	22,85%	4.071,13 m ³	266,9135 m ³ ha ⁻¹

Em que: DAP = diâmetro a 1,3 m do solo; HT = altura total; S²x = variância; CV = coeficiente de variação.

Tabela 7. Resultados do processamento do inventário florestal em uma floresta de *Eucalyptus* spp. para todos os cenários de amostragem testados.

Table 7. Forest inventory processing results for all sampling scenarios tested in a *Eucalyptus* spp. stand.

Cenário	D	H	Vol. árv ⁻¹	Vol. ha ⁻¹	Sx	CV%	Erro (m ³)	Erro (%)	LI	LS
1	16,7	24,5	0,2324	264,7630	18,05	6,82	22,41	8,46	242,4	287,2
2	16,7	24,5	0,2325	260,1804	8,43	3,24	10,47	4,02	249,7	270,7
3	16,7	24,5	0,2324	268,2143	7,75	2,89	9,62	3,59	258,6	277,8
4	16,6	24,5	0,2301	264,9827	9,60	3,62	11,92	4,50	253,1	276,9
5	16,6	24,5	0,2305	263,1591	30,69	11,66	38,11	14,48	225,0	301,3
6	16,5	24,4	0,2274	263,5611	17,01	6,46	21,13	8,02	242,	284,7
7	16,4	24,4	0,2244	263,2385	10,19	3,87	12,66	4,81	250,6	275,9
8	16,4	24,4	0,2241	256,8906	9,13	3,55	11,34	4,41	245,6	268,2
9	16,5	24,4	0,2271	266,5986	21,44	8,04	26,62	9,98	240,0	293,2
10	16,5	24,4	0,2259	243,1576	12,60	5,18	15,65	6,43	227,5	258,8
11	16,4	24,4	0,2244	257,3681	15,07	5,86	18,71	7,27	238,7	276,1
12	16,4	24,3	0,2236	259,2121	12,19	4,70	15,13	5,84	244,1	274,3
13	16,5	24,4	0,2279	266,5403	19,12	7,17	23,74	8,91	242,8	290,3
14	16,4	24,4	0,2248	265,3071	16,90	6,37	20,98	7,91	244,3	286,3
15	16,4	24,4	0,2244	260,1507	14,12	5,43	17,54	6,74	242,6	277,7
16	16,4	24,4	0,2233	256,1685	11,94	4,66	14,82	5,79	241,3	271,0

Em que: D = diâmetro a 1,3 m do solo; H = altura total; Vol. = volume por árvore (Vol. árv⁻¹) e por hectare (Vol ha⁻¹); CV = coeficiente de variação; LI e LS = limite inferior e superior do intervalo de confiança, respectivamente.

Tabela 8. Comparação do volume médio por hectare, determinado pelo censo florestal, com os valores estimados pelos diferentes cenários.

Table 8. Comparison of the average volume per hectare determined by the forest census with the different scenarios.

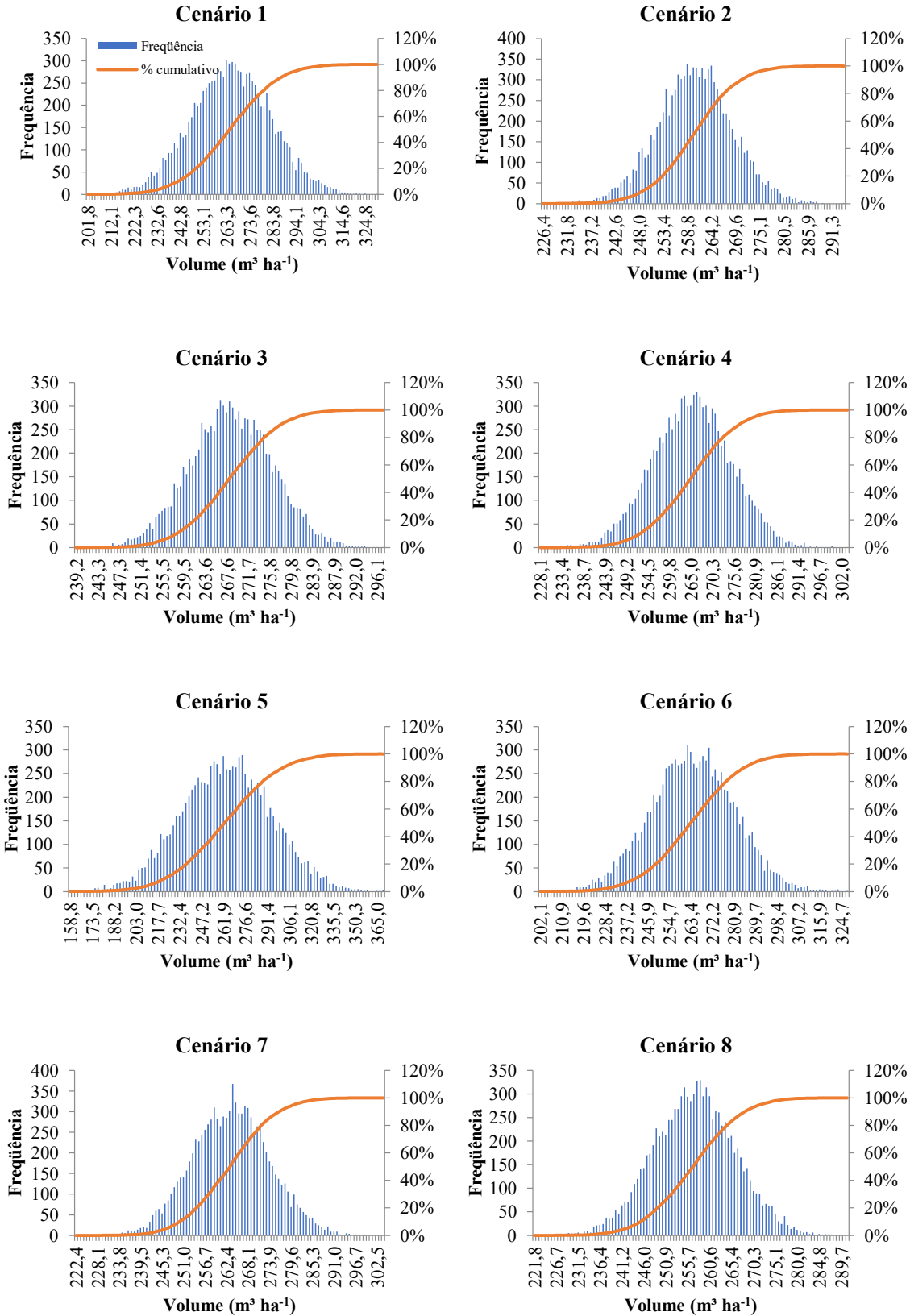
Cenário	Vol. ha ⁻¹ (m ³)	ΔV (%)	Probabilidade de Monte Carlo (%)
1	264,7630	0,8	52,6
2	260,1804	2,5	50,4
3	268,2143	0,5	50,3
4	264,9827	0,7	53,3
5	263,1591	1,4	51,4
6	263,5611	1,3	52,6
7	263,2385	1,4	55,0
8	256,8906	3,8	59,5
9	266,5986	0,1	55,2
10	243,1576	8,9	54,0
11	257,3681	3,6	51,9
12	259,2121	2,9	52,6
13	266,5403	0,1	54,3
14	265,3071	0,6	52,8
15	260,1507	2,5	52,6
16	256,1685	4,0	51,5

Em que: Vol. = volume; ΔV = variação do volume (cenários – censo), em porcentagem.

Nas 10.000 simulações realizadas, foram utilizadas como variáveis de entrada (premissas) a média e o desvio padrão da variável volume (m³ ha⁻¹) para cada cenário, conforme apresentados na Tabela 7, onde foram apresentados os valores médios e a probabilidade destes valores acontecerem, gerados na simulação de Monte Carlo. Para determinar a probabilidade de ocorrência do volume, foi encontrada a frequência da classe em que estava contida a média amostral para cada cenário. Observou-se que os valores de probabilidade foram próximos entre si para todos os cenários (variando de 50,4% a 59,5%) sem padrões relacionados a tamanho, forma das parcelas ou processo de amostragem, o que indica, segundo esse critério, desempenho similar dos cenários de amostragem. Na Figura 2 está apresentada a distribuição de frequência do volume nos 16 cenários estudados.

Análise de erros, tempo e custos

Considerando a análise conjunta de custos e erros (Tabela 9 e Figura 3), é possível inferir que em parcelas circulares o tamanho ótimo, considerando custo e erro, é em torno de 300 m², independente se é uma ACS ou amostragem sistemática (AS). Em parcelas retangulares, onde o erro foi mais sensível ao tipo de amostragem e às variações no tamanho da parcela, o tamanho ótimo aproxima-se de 300 m² para ACS e 400 m² para AS. O tempo de medição possui relação linear com a área das parcelas, sendo menor quanto menor for o tamanho da unidade amostral. Assim, considerando-se conjuntamente custo, tempo e erro, parcelas de 300 m² apresentaram melhor desempenho, especialmente na forma circular e na ACS.



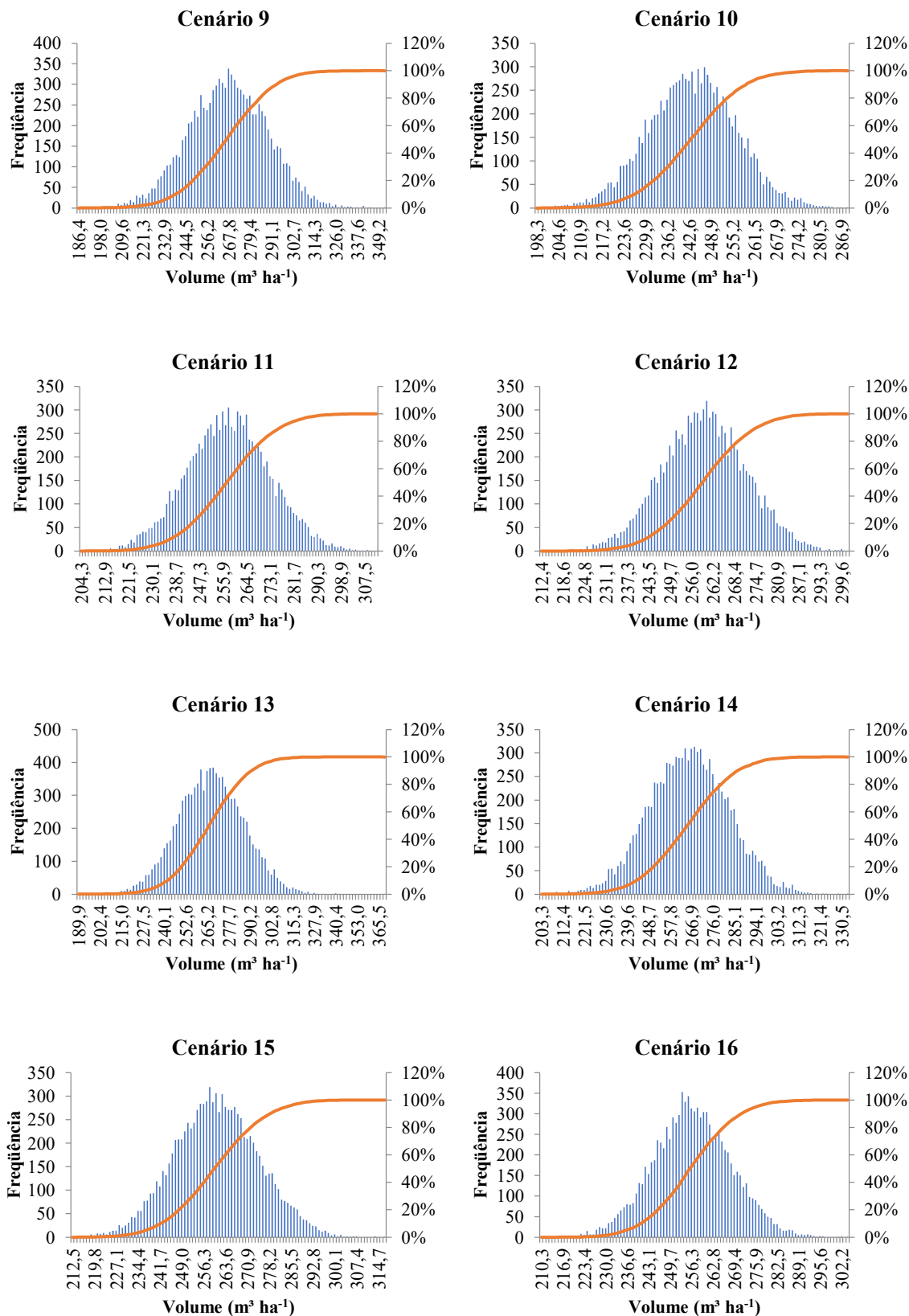


Figura 2. Histogramas de frequência e curva de frequência acumulada para os diferentes cenários avaliados.

Figure 2. Histograms frequency and cumulative frequency curve for the different scenarios evaluated.

Tabela 9. Relação do erro, custo e tempo com as diferentes combinações de unidades amostrais.

Table 9. Relation of error, cost and time with the different combinations of sampling units.

Cenário	Abordagem	Forma	Área (m ²)	Erro (m ³)	Custo (R\$)		Tempo (min)		Total
					Coleta	Parcela	Coleta	Locomoção	
1	ACS	Circ.	200	22,4118	27,23	52,22	14	9	23
2			300	10,4714	40,85	78,33	20	10	30
3			400	9,6182	54,46	104,43	27	11	38
4			500	11,9245	68,08	130,54	33	12	45
5		Retan.	200	38,1127	27,23	52,22	14	9	23
6			300	21,1268	40,85	78,33	20	10	30
7			400	12,6577	54,46	104,43	27	11	38
8			500	11,3374	68,08	130,54	33	12	45
9	AS	Circ.	200	26,6156	27,23	52,22	14	9	23
10			300	15,6468	40,85	78,33	20	10	30
11			400	18,7123	54,46	104,43	27	11	38
12			500	15,1319	68,08	130,54	33	12	45
13		Retan.	200	23,7439	27,23	52,22	14	9	23
14			300	20,9799	40,85	78,33	20	10	30
15			400	17,5354	54,46	104,43	27	11	38
16			500	14,8239	68,08	130,54	33	12	45

Em que: ACS = amostragem casual simples; AS = amostragem sistemática; Circ. = circular; Retan. = retangular.

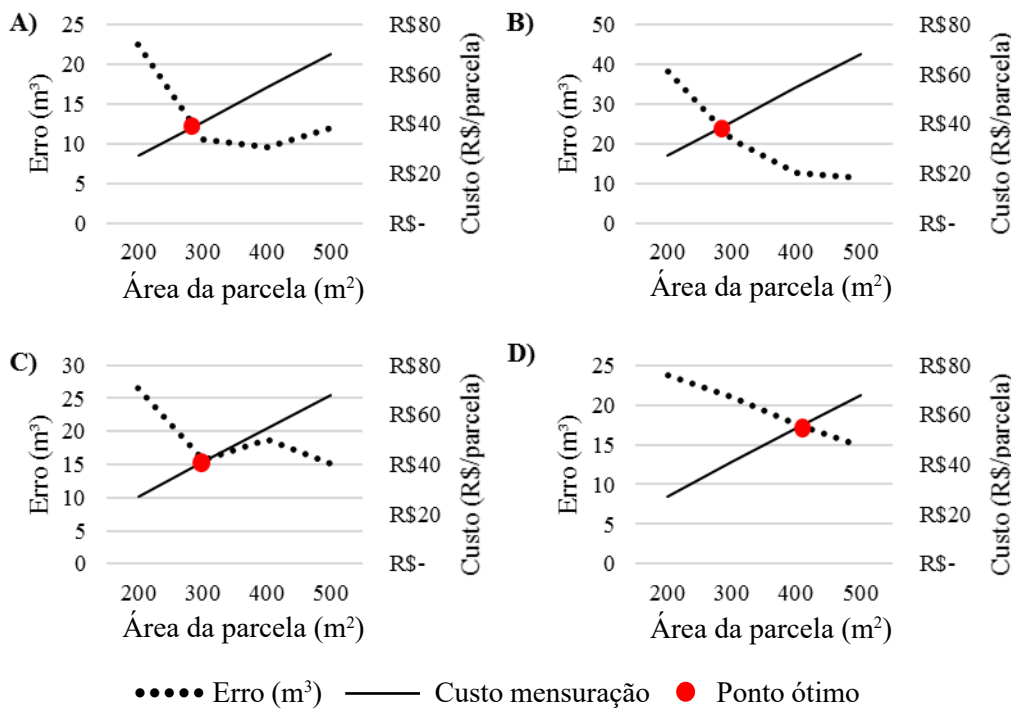


Figura 3. Relação entre o erro do inventário florestal (m³), custo por parcela e a área da parcela (m²) para os dois processos de amostragem de população avaliadas. A) amostragem casual simples com parcelas circulares; B) amostragem casual simples com parcelas retangulares; C) amostragem sistemática com parcelas circulares; D) amostragem sistemática com parcelas retangulares.

Figure 3. Relationship between forest inventory error (m³), cost per plot and plot area (m²) for the two population approaches evaluated. A) simple sampling with circular plots; B) simple sampling with rectangular plots; C) systematic sampling with circular plots; D) systematic sampling with rectangular plots.

Discussão

O volume de madeira ($266,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) encontrado para a floresta na área de estudo está compatível com outros plantios comerciais em condições similares. Por exemplo, Carrijo et al. (2019) encontraram volume médio de $242,45 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para *E. urophylla* aos 6 anos de idade em plantio em Goiás e Fernandes et al. (2012) encontraram para *E. grandis* aos 5 anos no Triângulo Mineiro volumes entre $271,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (plantios não irrigados) e $376,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (plantios irrigados).

Uma vez que a utilização do método de Monte Carlo indicou desempenho similar entre os cenários, sem padrões relacionados à forma, tamanho ou processo de amostragem, a indicação do melhor cenário se apoiou nos demais critérios. Assim, corroborando outros trabalhos da literatura florestal, constatou-se que parcelas menores estão associadas a maiores erros (Husch, 1971; Higuchi et al., 1982) em todos os cenários. As parcelas de amostragem de menor dimensão conduzem, normalmente, à maior variabilidade relativa (maior coeficiente de variação entre as unidades), para uma mesma intensidade amostral, acarretando maiores erros. Parcelas maiores concentram maior variabilidade dentro da amostra e reduzem assim a variabilidade entre amostras. No presente caso, a maior redução do erro, em todos os cenários, ocorreu em parcelas de 200 m^2 e 300 m^2 , sendo que a partir de 300 m^2 houve certa estabilização do erro. Em inventários florestais em plantios comerciais no Brasil, contínuos ou pré-corte, tamanhos usuais de parcela incluem 348 m^2 (Andrade et al., 2018), 400 m^2 (Reis et al., 2016), 500 m^2 (Carrijo et al., 2019) e 600 m^2 (Binoti et al., 2013).

Parcelas circulares atingiram menores erros em menores tamanhos em todos os casos, com melhor desempenho na amostragem casual simples (ACS). Segundo Yandle & Wiant (1981), há um problema conceitual envolvendo parcelas circulares não superpostas (que ocorre na sistematização), que chega a excluir 21% da população-alvo devido à forma da parcela. Ainda assim, a forma circular apresenta diversas vantagens, como praticidade de locação e medição, além de possuir apenas uma dimensão, o raio (Husch, 1971), estando assim menos sujeita a erros de demarcação.

Para um mesmo tamanho de parcela, especialmente no caso de parcelas retangulares, a ACS teve um desempenho superior (menores erros) em relação à amostragem sistemática (AS). A casualização das

amostras assegura que todas as unidades amostrais cabíveis na área apresentem a mesma probabilidade de serem sorteadas e, na seleção de uma amostra composta de n unidades amostrais, todas as possíveis combinações das n unidades teriam as mesmas chances de serem selecionadas (Soares et al., 2012). Na amostragem sistemática existe a vantagem da distribuição mais uniforme das amostras na população. Porém sabe-se que a variação nos valores observados de uma amostra sistemática não é totalmente atribuída ao acaso (Sanquetta et al., 2014). Nesse caso, uma desvantagem é o risco de a amostragem refletir homogeneidade numa condição sabidamente heterogênea, para o caso de o intervalo entre as unidades coincidir com o padrão da variação cíclica da própria população (Queiroz, 2012).

No contexto de florestas equiâneas, em que há uma maior chance de estacionariedade das características dendrométricas, a distribuição das parcelas de forma casual é capaz de proporcionar uma boa representatividade da área. Isso pode ser observado pela simulação do método de Monte Carlo, que representa bem o teorema central do limite. De acordo com Coelho Júnior et al. (2008), quando se obtém probabilidade superior a 50%, o uso do método de Monte Carlo pode fornecer informações superiores àquelas baseadas apenas em métodos tradicionais, destacando-se assim que todas as diferentes combinações de parcelas utilizadas foram bem representativas para o povoamento.

Se por um lado o erro é maior para parcelas menores, os custos de medição são menores. A medição de parcelas menores ocorre em tempo menor e, com isso, há economia de recursos e possibilidade de se medir mais parcelas em menos tempo. Nesse sentido, a análise de erros e custos (Figura 3), leva a uma combinação de tamanho-forma-distribuição ótima para amostragem na área de estudo. Assim, como há certa estabilização do erro a partir de 300 m^2 , aparentemente, parcelas circulares de 300 m^2 , distribuídas ao acaso representam maiores vantagens em termos de precisão e custos.

Com relação à exatidão, os cenários apresentaram valores próximos entre si, com destaque para a amostragem casual simples com utilização das parcelas circulares. A exatidão do inventário florestal está majoritariamente relacionada ao tipo de amostragem e à intensidade amostral, sendo que quanto maior a intensidade, maior a exatidão. No presente caso, como a floresta é equiânea e a intensidade amostral foi fixada, os valores de exatidão foram próximos entre si, com ligeira vantagem para a ACS.

É importante ressaltar que uma análise econômica mais aprofundada é interessante para que se considerem outros custos envolvidos no inventário florestal. Por exemplo, o custo de transporte, que aqui não foi levado em consideração, pode representar cerca de 15,5% dos custos operacionais do inventário florestal (Binoti et al., 2013). Esse tipo de custo pode ser decisivo em situações em que há variação na intensidade amostral. No mais, o planejamento adequado das atividades, com bom treinamento operacional da equipe de medição, garante a qualidade dos dados do inventário florestal e o fazem mais informativo para a gestão do empreendimento florestal.

Conclusões

Este estudo fornece importantes subsídios para a tomada de decisões relacionadas à definição de tamanhos, formas e arranjos de unidades amostrais no inventário florestal pré-corte em plantio de *Eucalyptus* spp.

A análise combinada entre erro, custos e tempo de medição apontou que, para um plantio de *Eucalyptus* spp. aos 8 anos de idade, a amostragem casual simples, com parcelas circulares de 300 m² representa o cenário amostral ótimo.

Agradecimentos e fonte de financiamento

Os autores receberam apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Esse apoio financeiro foi por meio de bolsas de estudos concedidas aos autores alunos de doutorado e pós-doutorado da Universidade Federal de Lavras.

Conflito de interesses

Os autores não têm conflito de interesses a declarar.

Contribuição de autoria

Luiz Otávio Rodrigues Pinto: conceituação, análise formal, investigação, metodologia, supervisão, escrita – primeira redação, escrita – segunda redação.

Daniel Dantas: conceituação, análise formal, investigação, metodologia, supervisão, escrita – primeira redação, escrita – segunda redação.

Marcela de Castro Nunes Santos Terra: conceituação, metodologia, supervisão, escrita – segunda redação.

José Márcio de Mello: conceituação, metodologia, supervisão, escrita – segunda redação.

Christian Dias Cabacinha: conceituação, metodologia, supervisão, escrita – segunda redação.

Referências

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.** 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br>. Acesso em: 12 ago. 2021.

Alvares, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

Andrade, V. C. L. et al. Modelos de altura-diâmetro para um plantio clonal de eucalipto no Sul do Tocantins. **Advances in Forestry Science**, v. 5, n. 4, p. 467-471, 2018. <http://dx.doi.org/10.34062/afs.v5i4.6618>.

Binoti, D. H. B. et al. Redução dos custos em inventário de povoamentos equiâneos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 1, p. 125-129, 2013. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v8i1a2209>.

Carrizo, J. V. N. et al. The growth and production modeling of individual trees of *Eucalyptus urophylla* plantations. **Journal Forestry Research**, v. 31, n. 6, p. 1-10, 2019. <http://dx.doi.org/10.1007/s11676-019-00920-1>.

Cesaro, A. et al. Comparação dos métodos de amostragem de área fixa, relascopia, e de seis árvores, quanto a eficiência, no inventário florestal de um povoamento de *Pinus* sp. **Ciência Florestal**, v. 4, n. 1, p. 97-108, 1994. <http://dx.doi.org/10.5902/19805098300>.

Cochran, W. G. **Sampling techniques**. 3th. ed. New York: John Wiley & Sons, 1977. 428 p.

Coelho Júnior, L. M. et al. Análise de investimento de um sistema agroflorestal sob condição de risco. **Cerne**, v. 14, p. 368-378, 2008.

Curtis, R. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. **Forest Science**, v. 13, n. 4, p. 365-375, 1967. <http://dx.doi.org/10.1093/forestscience/13.4.365>.

Dantas, D. et al. Reduction of sampling intensity in forest inventories to estimate the total height of eucalyptus trees. **Bosque**, v. 41, n. 3, p. 353-364, 2020a. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002020000300353>.

Dantas, D. et al. Multilevel nonlinear mixed-effects model and machine learning for predicting the volume of *Eucalyptus* spp. trees. **Cerne**, v. 26, p. 48-57, 2020b. <https://doi.org/10.1590/01047760202026012668>.

Dantas, D. et al. Predição volumétrica por meio da krigagem pontual reduz o esforço de amostragem em inventários florestais pré-corte. **Caderno de Ciências Agrárias**, v. 12, p. 1-9, 2020c. <https://doi.org/10.35699/2447-6218.2020.15927>.

- Fernandes, A. L. T. et al. Análise biométrica de florestas irrigadas de eucalipto nos cinco anos iniciais de desenvolvimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 505-513, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000500006>.
- Gregoire, T. G. et al. Statistical rigor in LiDAR-assisted estimation of aboveground forest biomass. **Remote Sensing Environment**, v. 173, p. 98-108, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.012>.
- Higuchi, N. Tamanho de parcela amostral para inventários florestais. **Acta Amazônica**, v. 12, n. 1, p. 91-103, 1982. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-43921982121091>.
- Husch, B. **Planning a forest inventory**. Rome: FAO, 1971. 120 p.
- IBGE. **IPCA: Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo.html>. Acesso em: 12 ago. 2021.
- Jarochinski, C. S. S. et al. Viabilidade econômica e rotação florestal de plantios de candeia (*Eremanthus erythropappus*), em condições de risco. **Cerne**, v. 20, n. 1, p. 113-122, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602014000100015>.
- Martins, E. F. et al. Estudo estocástico de projeto: uma análise de sensibilidade com aplicação da simulação de Monte Carlo. **Revista Espacios**, v. 26, p. 1-11, 2015.
- Pascual, A. et al. Influence of size and shape of forest inventory units on the layout of harvest blocks in numerical forest planning. **European Journal of Forest Research**, v. 138, n. 1, p. 111-123, 2019. <http://dx.doi.org/10.1007/s10342-018-1157-5>.
- Péllico Netto, S. et al. Size and shape of sample units in native forests and plantations. **Open Journal of Forestry**, v. 4, n. 4, p. 379-389, 2014. <http://dx.doi.org/10.4236/ojf.2014.44043>.
- Queiroz W. T. **Amostragem em inventário florestal**. Belém: EdUfra, 2012. 411 p .
- Reis, A. A. et al. Estratificação de um povoamento de eucalipto por interpoladores geoestatísticos e sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 10, p. 1751-1761, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2016001000007>.
- Santos, H. G. dos et al. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p .
- Sanquetta, C. R. **Inventário: planejamento florestais e execução**. 3th. ed. Curitiba: Multigraphcs, 2014. 316 p.
- Schumacher, F. X. & Hall, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933.
- Soares, C. P. B. et al. **Dendrometria e inventário florestal**. 2nd. ed. Viçosa, MG: Editora da UFV, 2012. 272 p.
- Terra, M. de C. N. S. et al. Modelos de crescimento não linear para espécies de árvores usadas na restauração florestal no Arco do Desmatamento da Amazônia brasileira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 42, 2022. <http://dx.doi.org/10.4336/2022.pfb.42e202102180>.
- Yandle, D. O. & Wiant, H. V. Comparison of fixed radius circular plot sampling with simple random sampling. **Forest Science**, v. 27, n. 2, p. 245-252, 1981. <http://dx.doi.org/10.1093/forestscience/27.2.245>.
- Zhang, J. et al. Estimating spatial variation in Alberta Forest biomass from a combination of forest inventory and remote sensing data. **Biogeosciences**, v. 11, n. 10, p. 2793-2808, 2014. <http://dx.doi.org/10.5194/bg-11-2793-2014>.