

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA FLORESTAL

CÂMPUS DOIS VIZINHOS

LEONARDO GABRIEL ANGÉLICO

**COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS VOLUMÉTRICOS PARA ESTIMAR
VOLUME TOTAL COM CASCA DE *Pinus taeda* L. LOCALIZADO EM SANTA
CECÍLIA, SC**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

DOIS VIZINHOS

2018

LEONARDO GABRIEL ANGÉLICO

**COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS VOLUMÉTRICOS PARA ESTIMAR
VOLUME TOTAL COM CASCA DE *Pinus taeda* L. EM SANTA CECÍLIA, SC**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Bacharelado em Engenharia Florestal da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Dois Vizinhos – UTFPR, como requisito parcial para aprovação da disciplina.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Veridiana Padoin Weber

Coorientador: Douglas Edson Carvalho

DOIS VIZINHOS

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS VOLUMÉTRICOS PARA ESTIMAR
VOLUME TOTAL COM CASCA DE *Pinus taeda* L. EM SANTA CECÍLIA, SC

por

Leonardo Gabriel Angélico

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 20 de Junho de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal. O (a) candidato (a) foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof.^a Dr.^a Veridiana Padoin Weber
Orientador(a)

Prof. Dr. Claudio Thomas
Membro titular (UTFPR)

Prof. Msc. Ramiro Faria Franca
Membro titular (UTFPR)

Prof.^a Msc Ana Paula Martins
Membro titular (UTFPR)

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus,
pois sem ele nada eu seria, dedico também à minha família e a minha noiva,
pelo seu apoio e paciência. A todas as pessoas que direta ou indiretamente
influenciaram minha chegada até esse momento.

RESUMO

ANGÉLICO, Leonardo Gabriel. **Comparação Entre Modelos Volumétricos Para Estimar Volume Total Com Casca De *Pinus taeda* L. em Santa Cecília, SC.** 2018. 35f. Trabalho de conclusão de curso II. Curso Superior de Engenharia Florestal, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Dois Vizinhos. Dois Vizinhos, 2018.

O objetivo deste trabalho foi ajustar e comparar modelos volumétricos para se estimar o volume com casca de árvores de *Pinus taeda* L. em Santa Cecília, SC. Para esse trabalho foram cubados rigorosamente 69 indivíduos de pinus pelo método de Smalian. Os modelos foram ajustados por meio de Regressão e selecionados por menor erro de percentagem ($S_{yx}\%$) e maior coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$). Além dessa comparação foi realizada a análise gráfica dos resíduos plotados sobre o volume estimado. Com esses dados foi possível selecionar o modelo de Schumacher-Hall, pois o mesmo apresentou um baixo erro padrão de estimativa (18,25) e maior coeficiente de determinação ajustado (0,9818), também apresentou melhor dispersão dos resíduos em percentagem. A equação a ser utilizada nesse povoamento é $Inv = -8,47819 + 2,252852 \text{ Ind} + -0,02217 \text{ Inh} + \epsilon$.

Palavra-chave: Pinus, volumetria, estimativa, modelos matemáticos.

ABSTRACT

ANGÉLICO, Leonardo Gabriel. **Comparison Between Volumetric Models to Estimate Total Volume With Bark of *Pinus taeda* L. in Santa Cecília, SC.** 2018. 35p. Completion of Course Work II. Superior Course of Forestry Engineering, Federal Technology University of Paraná. Dois Vizinhos, 2018.

The objective of this work was to adjust and compare volumetric models to estimate the volume of bark of *Pinus taeda* L. trees in Santa Cecília, SC. For this work, 69 individuals of pine were strictly covered by the Smalian method. The models were adjusted by Regression and selected by lower percentage error ($Sy_x\%$) and higher adjusted coefficient of determination (R^2_{aj}). In addition to this comparison, a graphical analysis of the plotted wastes was performed on the estimated volume. With these data it was possible to select the Schumacher-Hall model, since it presented a low standard error of estimation (18.25) and a higher adjusted coefficient of determination (0.9818), also showed better dispersion of residues in percentage. The equation to be used in this settlement is $Inv = -8.47819 + 2.252852 \text{ Ind} + -0.02217 \text{ Inh} + \epsilon$.

Keywords: Pinus, volumetry, estimation, mathematical models.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico de resíduos em porcentagem, plotado sobre o volume estimado <i>Pinus taeda</i> L. em Santa Cecília, SC, para o modelo de Spurr.	27
Gráfico 2 - Gráfico de resíduos em porcentagem, plotado sobre o volume estimado de <i>Pinus taeda</i> L. em Santa Cecília, SC, para o modelo de Schumacher-hall.	27
Gráfico 3 - Gráfico de resíduos em porcentagem, plotado sobre o volume estimado de <i>Pinus taeda</i> L. em Santa Cecília, SC, para o modelo de Meyer.	28
Gráfico 4 - Gráfico de resíduos em porcentagem, plotado sobre o volume estimado de <i>Pinus taeda</i> L. em Santa Cecília, SC, para o modelo de Hohenadl-Krenn.	29
Gráfico 5 - Gráfico de resíduos em porcentagem, plotado sobre o volume estimado de <i>Pinus taeda</i> L. em Santa Cecília, SC, para o modelo de Stoate	30
Gráfico 6 - Gráfico de resíduos em porcentagem, plotado sobre o volume estimado de <i>Pinus taeda</i> L. em Santa Cecília, , para o modelo de Prodan I	30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	11
2.1. OBJETIVO GERAL	11
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1. SETOR FLORESTAL.....	12
3.2. <i>Pinus taeda</i>	13
3.3. MÉTODO DE CUBAGEM POR SMALIAN.....	14
3.4. MODELOS VOLUMÉTRICOS	14
4. METODOLOGIA	17
4.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	17
4.2. COLETA DE DADOS.....	18
4.2.1. Volume.....	18
4.2.2. Suficiência amostral.....	19
4.2.2. Fator de Forma	20
4.3. AJUSTE DOS MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME	20
4.4. ESCOLHA DA MELHOR EQUAÇÃO.....	21
4.5. VALIDAÇÃO DA MELHOR EQUAÇÃO	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
6. CONCLUSÕES	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1. INTRODUÇÃO

Os inventários florestais em sua maioria visam como objetivo principal a quantificação de volume da floresta, tarefa que pode ter um custo elevado e demandar tempo. Para amenizar este problema, em muitos inventários é realizada a coleta de dados por meio de amostragem e o volume estimado por meio de modelos matemáticos, para se chegar a resultados muito próximos da realidade, com menor tempo e custos mais baixos.

De acordo com Finger (1992), para obter o estudo detalhado de uma população é necessário a mensuração e análise de uma série de variáveis, algumas delas de fácil e outras de difícil obtenção. Apesar disso, se as variáveis forem correlatas, é possível determiná-las indiretamente utilizando as variáveis de fácil obtenção. Para Machado e Figueiredo (2005), a partir de amostragens representativas na população, pode se aferir diâmetro e altura de todas as árvores, e a partir destas variáveis, é possível estimar o volume através de técnicas indiretas, como por exemplo: fator de forma, equações de volume.

A obtenção de uma base de dados que viabilize a estimativa dos volumes é essencial para que seja possível o uso de técnicas indiretas. Esta base nada mais é do que valores obtidos com a cubagem de árvores representativas da população, para determinação com máxima precisão do volume real. (MACHADO e FIGUEIREDO, 2006).

A aferição de todas as árvores, individualmente, para obter o volume de um plantio, pode, em alguns casos, se tornar impraticável, como quando se necessita da obtenção dos dados em um curto prazo, ou quando se tem um número grande de indivíduos e pouca logística. Por isso, para Schneider (1998), deve-se utilizar um instrumento estatístico chamado regressão, que é capaz de permitir estimativas com boa precisão e eficiência. Silva (1979) destaca que várias equações de volume foram criadas e ajustadas, mas nem sempre o ajuste é adequado ao povoamento estudado. Por isso deve-se testar e analisar modelos que possam fornecer valores estimados de volume e que estes tenham maior proximidade ao valor real. Andrade (2017) afirma que é necessário avaliar o modelo mais adequado para cada cenário de estudo, pois o objetivo é que se obtenha a estimativa de volume sem que haja a necessidade de cubar todos os indivíduos.

Tendo em vista a realização do inventário e necessidade de estimativa do plantio na Fazenda Rio das Pedras em Santa Cecília, SC, a principal razão deste trabalho é fornecer o modelo melhor ajustado para esse caso.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Escolher o melhor modelo volumétrico para estimar os volumes individuais totais com casca de *Pinus taeda* em um plantio localizado em Santa Cecília - SC;

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular o Fator de Forma artificial para a floresta;
- Calcular o coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$), o erro padrão da estimativa em porcentagem ($Syx\%$) e realizar a análise gráfica de resíduos, para cada modelo, com finalidade de escolher o melhor modelo;
- Calcular qui-quadrado para o modelo com melhor ajuste e precisão, e comparar ao qui-quadrado tabelado para validar o modelo escolhido.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. SETOR FLORESTAL

Um dos materiais mais utilizados pelo homem é a madeira, sendo utilizada para construção de moradias como também para construção de meios de locomoção. Os primeiros meios de transportes, como a carroça, o barco, os trenós e carros, e as primeiras ferramentas e armas, como o arco, lanças e machados, foram construídos utilizando madeira como matéria prima (PONCE, 1995).

Em vários países do mundo, a atividade madeireira e a cadeia produtiva a ela associada são objeto de investimentos e transações comerciais de elevado valor. As florestas, mais do que matéria-prima, são um ativo de alta liquidez. O Brasil, além de possuir a segunda maior cobertura florestal do mundo, desenvolveu tecnologia avançada para a exploração de florestas e para a transformação industrial da madeira (JUVENAL e MATTOS, 2002).

A silvicultura é uma atividade de cultivo de árvores, mais conhecida como reflorestamento, atividade tanto de pequenos produtores, quanto de grandes empresas, que se destina a suprir diversas demandas em todo o mundo, principalmente para geração de madeira para matéria-prima (IPEF, 2016).

A maioria da biomassa florestal é retirada de florestas plantadas ou energéticas. Os plantios florestais são aqueles implantados pelo homem, com finalidade de aproveitamento de produtos madeireiros e não madeireiros. Já as florestas energéticas são aquelas implantadas com o objetivo exclusivo de produção de energia (WIONZEK, 2014).

Em 1966 foi sancionada a lei nº 5.106, que fornece aos empreendimentos florestais alguns incentivos fiscais, como a possibilidade de desconto nas declarações de rendimento de pessoas físicas ou jurídicas. Com o surgimento da lei em 1966, a silvicultura veio ganhando espaço e ajudando no desenvolver da economia brasileira (STÜPP et al., 2017). Em 2016, segundo o IBÁ – Indústria Brasileiro de Árvores, o setor florestal foi responsável por cerca de 3,8 milhões de empregos, entre diretos e indiretos. Sendo também responsável pelo faturamento de 70 bilhões, mantendo o segmento florestal como um dos cinco setores mais importantes da economia no Brasil, correspondendo a 6,2% do PIB. A área de

floresta plantada no Brasil é de 7,84 milhões de hectares, sendo esse setor responsável por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais. Segundo a Associação Catarinense de Empresas Florestais – ACR (2016) mais de um terço do plantio de pinus do Brasil se encontra no estado de Santa Catarina sendo essa área de *Pinus spp.*, correspondente a 541.162 hectares.

3.2. *Pinus taeda*

Segundo Koch (1972), o *Pinus taeda* se destaca pela sua grande distribuição geográfica, por ocorrer em povoamentos puros e abundantes. A região de origem ocorre desde o nível do mar até altitudes maiores que 600 metros, a latitude é de 29°N até 38°N e longitudes de 75°W e 95°W.

A chegada do Pinus no Brasil se deu pela vinda de imigrantes europeus, tendo como destinação a utilização ornamental e produção de madeira. Na década de 30 se iniciou o cultivo do pinus visando à silvicultura, mas somente em 1948 foram introduzidas as espécies americanas, dentre elas o *elliottii* e o *taeda*, que apresentaram reprodução intensa e rápido crescimento no Sul e Sudeste. Desde então houve um foco maior no plantio da espécie no país para fins comerciais (REVISTA DA MADEIRA, 2006 apud STÜPP et al, 2017).

O povoamento de *Pinus taeda* tem uma grande versatilidade, pois sua madeira pode ser destinada à indústria laminadora e na fabricação de compensados, podendo ser destinada a serrarias, onde é beneficiada e convertida em móveis, sendo também destinada para indústria de MDF. Além disso, seu resíduo também tem sido aproveitado como biomassa para gerar energia (CARGNIN, 2005).

De acordo com a EMBRAPA (2011), o Pinus apresenta características que lhe são valorizadas, tais como a coloração clara de sua madeira, e possuir fibra longa, sendo ideal para fabricação de papel de alta resistência, possibilidade de extração de resina, rusticidade e tolerância o que possibilita seu plantio em solos com poucos nutrientes. O plantio de Pinus tanto o *Pinus taeda* quanto o *elliottii* são largamente usados nos reflorestamentos visando a produção de madeira de fibra longa, substituindo a *Araucaria angustifolia*.

No entanto devido a algumas características da espécie, como rápido crescimento, associação com fungos, possibilitando o estabelecimento em solos pobres e ácidos, a produção de sementes de tamanho pequeno e aladas, as incluem como risco de invasão biológica, sendo encontrado na literatura o registro de áreas invadidas por árvores de *Pinus taeda*, como os campos de altitude no Paraná, pampas gaúchos e na restinga em Santa Catarina (TOMAZELLO FILHO et al., 2017).

Segundo Pederson et al. (1997) *apud* Tomazello Filho et al. (2017) a análise de crescimento dos anéis do *Pinus taeda* relatadas na literatura apresentam indivíduos de 191 a 241 anos na Carolina do Norte e Carolina do Sul, EUA, áreas de ocorrência natural da espécie.

3.3. MÉTODO DE CUBAGEM POR SMALIAN

O método de Smalian pode ser definido como o produto da média aritmética das áreas transversais dos extremos da secção e do comprimento da secção.

Este é o método de cubagem adotado pelo IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis). É vastamente utilizado no meio florestal sendo indicado para toras que apresentem forma de tronco parabolóide (OLIVEIRA e GARCIA, 2014).

3.4. MODELOS VOLUMÉTRICOS

De acordo com Sanquetta et al. (2014), as árvores podem assumir várias formas, como por exemplo as coníferas que têm uma forma similar com uma figura geométrica, ou como outras árvores que tem seus fustes irregulares, não podendo ser comparadas a nenhuma forma geométrica devido a essa irregularidade. Por isso existe a necessidade de outras formas de obter-se o volume dessas árvores.

O procedimento de maior uso na estimativa do volume individual é o emprego de equações em que o volume é a variável dependente, associado a variáveis independentes de fácil mensuração na floresta, como o diâmetro à altura do peito e a altura (MACHADO et al., 2002 *apud* THOMAS et al., 2006).

Segundo Veiga (1984), as equações que determinam o volume de essências florestais são indispensáveis para a silvicultura. É necessário que seja realizado o ajuste das equações para adaptá-las a diferentes regiões, espécies, espaçamento e idades. Machado *et al* (2002) recomenda o ajuste dos modelos e que sejam realizados testes para analisar o modelo mais adequado para espécie e condições.

“Existem vários modelos alométricos (lineares, não lineares, simples e múltiplos) para estimar o volume” (BRIANEZI *et al.*, 2013). Segundo Scolforo (1988), equações de simples entrada, onde a única variável independente é o diâmetro, são utilizadas em plantios que a altura e o diâmetro são mais homogêneos, e equações de dupla entrada são utilizadas quando se tem uma maior heterogeneidade entre altura e diâmetro, ou seja, que existem variações de altura com diâmetros parecidos, tendo, portanto a necessidade de utilizar duas variáveis independentes.

Para Hoffmann e Vieira (1983) é muito importante conhecer os efeitos que algumas variáveis exercem, ou parecem exercer, sobre outras. Podendo essa relação se tornar útil na hora de estimar uma variável quando se conhece o valor de outras variáveis que são correlacionadas a ela.

Andrade (2017) afirma que nos últimos 25 anos dos estudos realizados sobre modelos volumétricos no Brasil, 41% mostraram superioridade do modelo de Schumacher-Hall, 17% o modelo de Meyer, 14% o de Spurr e 28% os demais modelos. Ele também afirma que devido aos 41% de superioridade pode se ter 60% de incertezas quanto ao seu uso como o mais adequado para povoamentos florestais no Brasil, portanto é necessário que se avalie o modelo mais apropriado para o cenário de estudo.

Môra *et al* (2014) considerou o modelo de Schumacher-Hall, como o mais preciso para um talhão de *Pinus taeda* no município de Piraí do Sul – PR. Thomas *et al.* (2006), testaram nove modelos para um plantio de *Pinus taeda* com idade de 8 a 28 anos no município de Ponte Alta do Norte – SC, e concluíram que o modelo Schumacher-Hall teve uma melhor desempenho nas estimativas de volume total com e sem casca. O modelo de Schumacher-Hall apresentou valores de coeficiente de determinação ajustado de 0,99 e para o erro padrão da estimativa de 0,0970 para o ajuste utilizando volume com casca.

Já Silvestre *et al* (2014) concluiu que, para um plantio de *Pinus taeda* com nove anos localizado no município de Lages – SC, os modelos com melhores

desempenhos foram o de Prodan I, Stoate (Deusen 1981), Meyer (compreensiva), Näslund (Spruce) e Takata. Esses modelos apresentaram coeficiente de determinação ajustado variando de 0,98 a 0,99 e erro padrão de estimativa de 0,0118 a 0,0139, demonstrando que os modelos e suas estimativas são aceitáveis para o plantio estudado.

4. METODOLOGIA

4.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Os dados utilizados no presente trabalho foram adquiridos durante um inventário florestal, em um plantio de *Pinus taeda* com 9 anos de idade, sem desbaste, com a finalidade de obter informações quantitativas do plantio. O talhão se localiza em Santa Cecília - SC (Figura 1), na Fazenda Rio das Pedras. O clima da região segundo classificação de Köppen e Geiger é o Cfb, clima temperado propriamente dito, com temperatura média de 16,6°C e pluviosidade média anual de 1441mm (CLIMATE DATA, s/d). A área que foi inventariada é de 11 hectares com plantio inicial de 1111 indivíduos por hectare, tendo como espaçamento 3,0 x 3,0 metros. Do talhão foram cubadas 69 árvores inteiras com casca, para auxiliar na precisão e ajuste dos modelos que foram utilizados para estimar o volume das árvores inteiras.



Figura 1 – Mapa de localização do município de Santa Cecília no estado de Santa Catarina e a localização do plantio na região de Santa Cecília - SC, pertencendo a Fazenda Rio das Pedras.

Fonte: Google Earth (modificado), 2018.

4.2. COLETA DE DADOS

A coleta de dados se deu no mês de Janeiro de 2018, seguindo conforme a realização do inventário para o proprietário. Foram cubados 69 indivíduos e também coletadas as variáveis de diâmetro à altura do peito (d), altura total (h) e altura comercial (hc). Os volumes individuais do fuste com casca foram calculados pelo método de Smalian e o volume para as pontas foi utilizado a fórmula do volume do cone. Os 69 indivíduos tiveram um volume total com casca de 8,2568 m³, pela cubagem rigorosa, com média de 0,1196 m³/indivíduo; diâmetro à altura do peito médio de 15,7 centímetros e altura total média de 10,32 metros. O diâmetro mínimo e máximo do povoamento variou de 5,2 cm a 29,8 cm respectivamente, a classe diamétrica está demonstrada na tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Classe diamétrica dos 69 indivíduos cubados de *Pinus taeda* em um plantio em Santa Cecília - SC.

Classe Diamétrica	Nº de árvores
5,2- 9,2	9
9,25-13,2	19
13,25-17,2	9
17,25-21,2	10
21,25-25,23	6
25,25-29,2	3
29,25-29,9	3

Fonte: O autor (2018)

4.2.1. Volume

Para a cubagem foi utilizado o método de mensuração do volume por Smalian, onde foram mensurados os diâmetros ao longo do tronco nas seguintes alturas (hi): 0,10 m; 0,50 m; 1,3 m e 2 m, sendo que a partir de 2 metros foram mensuradas de 1 metro em 1 metro até a altura total de cada um dos 69 indivíduos cubados. A fórmula do volume de Smalian para cada secção pode ser observada abaixo:

$$v_s = \frac{(g_1 + g_2)}{2} * l \quad (1)$$

Em que: v_s = Volume secção (m^3); g_1 = Área transversal da base da secção (m^2); g_2 = Área transversal da outra extremidade da secção (m^2); l = Comprimento da secção (m);

A expressão de Smalian fornece estimativas do volume de secções individuais do fuste da árvore. O volume total com casca de um fuste foi obtido pelo somatório dos volumes (v_s) de cada secção do fuste mais a ponta, sendo essa calculada pela fórmula do cone:

$$v_{cone} = g_{cone} * h_{cone} * \frac{1}{3} \quad (2)$$

(m) Em que: v_{cone} = volume da ponta (m^3); g_{cone} = área basal do cone (m^2); h_{cone} = altura do cone

4.2.2. Suficiência amostral

O cálculo de suficiência amostral tem como objetivo a determinação do número de amostras necessárias para a realização de uma pesquisa ou levantamento de dados. Para o cálculo do número de árvores cubadas (n), de acordo com a variância do volume, utilizou-se um limite de 10% de erro e um nível de probabilidade de confiança de 95%, utilizando-se o seguinte método estatístico:

$$E^2 = (Y_m * L.E.)^2 \quad (3)$$

Em que: E^2 = erro; Y_m = volume médio observado (m^3); L.E = limite de erro de 10%.

E,

$$n = \frac{s^2 * t^2}{E^2} \quad (4)$$

Em que: n = tamanho da amostra necessário para atender o limite de erro de 10%; t = valor tabelado de t (95% de probabilidade de confiança); s^2 = variância dos volumes observados.

4.2.2. Fator de Forma

Devido às variações na forma do tronco e a diminuição sucessiva dos diâmetros da base ao topo da árvore, tornam incorreto a obtenção do volume somente pelo produto da área basal com a altura, portanto para isso se usa um fator de correção também conhecido por fator de forma, esse fator varia de acordo com a forma da árvore. Quanto mais próximo o fator for de 1 (um), mais cilíndrica é a árvore (CUNHA 2004).

O fator de forma artificial tem por definição ser um módulo de redução, que deve ser multiplicado pelo produto da área basal com a altura para se ter o volume de uma árvore (CUNHA, 2004), sendo calculado pela seguinte equação:

$$f_{1,3} = \frac{v_{real}}{v_{cilindro}} \quad (5)$$

Em que: $f_{1,3}$ =Fator de Forma Artificial; v_{real} = volume real (m³); $v_{cilindro}$ = volume do cilindro (m³).

O fator de forma foi calculado individualmente e realizado a média dos valores encontrados para se obter o Fator de Forma Artificial do plantio.

4.3. AJUSTE DOS MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME

Para a validação da melhor equação foi realizado o ajuste pelo Método dos Mínimos Quadrados Ordinários, através do Microsoft Office Excel 2010, dos modelos matemáticos de Meyer, Hohenadl-Krenn, Spurr, Schumacher-Hall, Prodan I e Storate descritos na Tabela 2. Esses modelos foram retirados da literatura, sendo eles utilizados em outros trabalhos com cenários cujas características são próximas ao plantio da Fazenda Rio das Pedras. As características são: mesma espécie de pinus, idades próximas, localização geográfica próxima.

Tabela 2: Modelos volumétricos testados para estimativa de volume total com casca para *Pinus taeda* em Santa Cecília - SC.

Autores	Modelo matemático
MEYER	$v = b_0 + b_1d + b_2d^2 + b_3dh + b_4d^2h + \varepsilon$
SPURR	$v = b_0 + b_1d^2h + \varepsilon$
SCHUMACHER- HALL (Linear)	$lnv = b_0 + b_1 lnd + b_2 ln h + \varepsilon$
HOHENADL- KRENN	$v = b_0 + b_1d + b_2d^2 + \varepsilon$
STOATE	$v = b_0 + b_1d^2 + b_2d^2h + b_3h + \varepsilon$
PRODAN I	$\sqrt[3]{v} = b_0 + b_1d^*h + b_2d^2h^2 + b_3d^3/h^3 + b_4d^4/h^4 + b_5d^5h^5 + b_6d^6h^6 + \varepsilon$

Fonte: Aragão et al (2016); Silvestre et al (2014). Thomas et al (2006).

Em que: v = volume total da árvore (m^3); d = diâmetro à altura do peito (cm); h = altura total a árvore (m); b_0 ; b_1 ; b_2 ; b_3 , b_4 , b_5 e b_6 = coeficientes; ln = logaritmo natural; ε = erro aleatório;

4.4. ESCOLHA DA MELHOR EQUAÇÃO

A seleção da melhor equação foi realizada baseando-se nos critérios utilizados por Oliveira et al. (2005): a) erro padrão da estimativa percentual ($S_{yx}\%$); b) distribuição de resíduos, c) maior coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}).

O coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) indica a relação da variabilidade do volume associado as outras variáveis, sendo que quanto mais próximo de 1 for o valor, melhor terá sido o ajuste. O coeficiente de determinação ajustado é calculado pela seguinte equação:

$$R^2_{aj} = 1 - \left\{ \frac{(1 - R^2) * (n - 1)}{(n - p)} \right\} \quad (6)$$

Em que: n = número de árvores que foram cubadas; $n - 1$ = grau de liberdade; p = número de parâmetro da equação; R^2_{aj} = coeficiente de determinação múltiplo

O erro padrão de estimativa percentual ($S_{yx}\%$) é responsável por indicar a proximidade da média dos valores estimados, neste caso o volume, dos respectivos

valores observados. Quanto menor o valor do erro percentual ($Syx\%$), melhor terá sido o ajuste.

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum(v-v_{est})^2}{n-p}} \quad (7)$$

$$S_{yx}\% = \frac{S_{yx}}{y_m} * 100 \quad (8)$$

Em que: S_{yx} = erro padrão da estimativa; $S_{yx}\%$ = erro padrão da estimativa em porcentagem; v = volume observado; v_{est} = volume estimado; y_m = volume médio observado; n = número de observações; p = número de coeficientes do modelo.

Os modelos matemáticos em escala logarítmica fornecem o logaritmo do volume, portanto é necessário calcular o antilogaritmo para obter o volume. Quando tal operação matemática é realizada, existe um erro chamado de discrepância logarítmica que é devido a formula apresentar valores em unidades geométricas ao invés de aritméticas, e para corrigir este erro pode-se utilizar o Fator de Correção de Meyer (FM), tanto para modelos que utilizam o logaritmo na base 10 quanto para logaritmo natural, multiplicando o valor estimado pelo Fator de correção obtido. No caso do trabalho em questão o modelo de Schumacher-Hall, utiliza o logaritmo natural, portanto para esse modelo se utilizou de correção, sendo o fator de correção de Meyer obtido por:

$$FM = e^{0,5*QM.res} \quad (9)$$

Onde: e = base do logaritmo natural 2,718281828.; $QM.res$ = quadrado médio dos resíduos

A interpretação dos resíduos foi feita por meio de visualização gráfica. Os resíduos em porcentagem foram plotados sobre os volumes estimados e foram calculados pela seguinte equação:

$$Residuo(\%) = \left(\frac{y - \hat{y}}{y} \right) * 100 \quad (10)$$

Onde: y = volume calculado (m^3); \hat{y} = volume estimado (m^3)

Foi observada a existência de Homocedasticidade, que é o termo designado para a variância constante de erro entre observações distintas. A sua ausência é identificada pela distribuição não homogênea dos dados de Resíduo (%). Portanto, se identificado a ausência da homocedasticidade, pode ser interpretado que os erros padrões dos estimadores, obtidos pelo MMQ (método dos mínimos quadrados), estão incorretos e, portanto, a inferência estatística sobre esses valores não é válida.

4.5. VALIDAÇÃO DA MELHOR EQUAÇÃO

Para a validação da equação selecionada foi realizado o teste de qui-quadrado (χ^2), que compara os valores de χ^2 calculado com o valor de χ^2 tabelado. Se o valor calculado for menor que o valor tabelado, a equação utilizada para a estimativa é adequado. O qui-quadrado calculado é dado pela seguinte equação:

$$\chi^2 = \sum \frac{(y - \hat{y})^2}{y} \quad (11)$$

Onde: χ^2 = qui-quadrado calculado; y = volume real; \hat{y} = volume estimado pela equação selecionada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após ter ajustado as equações, foi aplicado as estatísticas de ajuste e precisão, como descritos na metodologia, para verificação de quais modelos melhor se ajustaram às características do povoamento pra estimativas volumétricas. O cálculo do número de árvores cubadas necessárias (n) com 10% de limite de erro e 95% de probabilidade de confiança foi de 46,69 árvores, 0,0054102 de variância (s^2), 1,6675722 para o valor tabelado de t e 0,000322191 de erro (E^2), sendo portando o número cubado de sessenta e nove indivíduos suficiente.

O fator de correção de Meyer (FM), calculado para o Modelo de Schumacher, foi de 1,005690184, sendo utilizado para corrigir a tendência do modelo linear.

O fator de forma é influenciado pelo espaçamento do plantio e densidade de copa, normalmente quanto maior o espaçamento, maior a copa e, portanto menor o fator de forma devido uma maior conicidade dos indivíduos.

O fator de forma artificial médio calculado foi de 0,4904, variando de 0,3814 a 0,7676, valores que, para o presente estudo, conforme o DAP aumentava o fator decrescia, podendo ser interpretado como um aumento da conicidade para indivíduos com DAP maior. Essa grande variação do fator de forma reforça que o plantio é heterogêneo. Os valores de fator de forma baixos podem afetar o rendimento em serrarias se encontrados em indivíduos de menor diâmetro, pois em diâmetros maiores a porcentagem das costaneiras e aparas em relação ao volume total é menor.

As estatísticas de ajuste e precisão calculados (R^2 ajustado e $Syx(\%)$) estão presentes na Tabela 2. Lembrando que no caso do modelo logarítmico de Schumacher-Hall, fez-se a correção por Meyer, caso contrário o volume estimado sempre seria tendencioso para menos.

Tabela 2: Estatística de ajuste e precisão das equações matemáticas para estimativa de volume total com casca de *Pinus taeda*, em Santa Cecília, SC.

Modelo Volumétrico	R²aj	Syx%	b₀	b₁	b₂	b₃	b₄	b₅	b₆	
Spurr	0,8702	28,81	0,012361	0,0003274	-	-	-	-	-	
Schumacher-Hall (linearizado)	0,9818	18,25	-8,3256	1,902199	0,383719	-	-	-	-	
Meyer	0,9696	54,46	-0,0257	0,004794	-0,000144	0,0001824	0,000034	-	-	
Hohenald e Krenn	0,9695	14,31	-0,0323	0,0036094	0,0003324	-	-	-	-	
Stoate (não linear)	0,9672	14,72	-0,01159	0,0000786	0,0000287	0,005054	-	-	-	
Prodan I	0,9901	292,48	0,024978	-	0,0000034	0,002527	0,009233	-0,00235	3,71 E ⁻¹⁴	-5 E ⁻¹⁷

Fonte: O autor (2018).

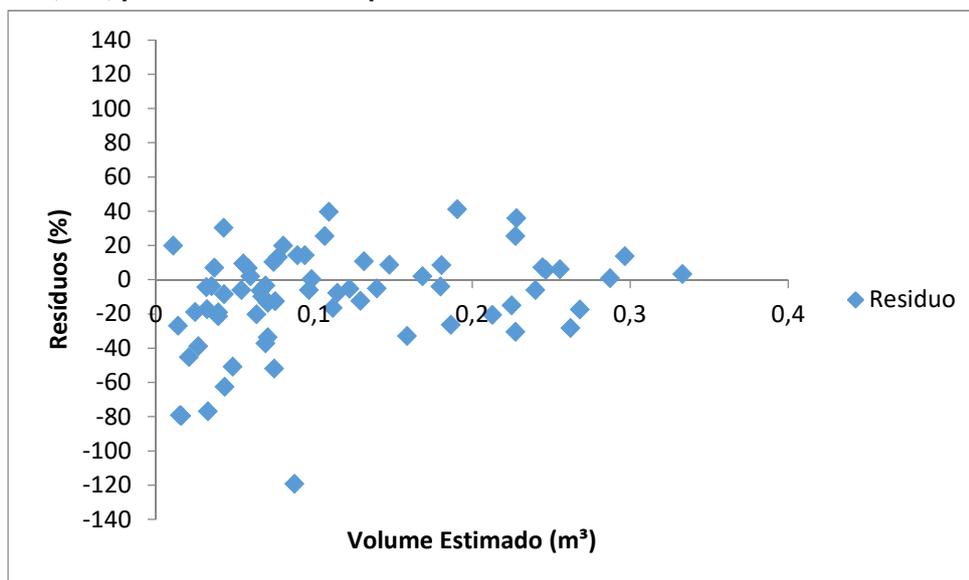
No que diz respeito a floresta de *Pinus taeda* nota-se que as estatísticas de ajuste do modelo de Prodan I e Schumacher-Hall com o valores do R² ajustado de 0,9901, 0,9818 respectivamente, apresentam uma leve, mas superior, proximidade do valor 1 (um) sendo considerado o mais ajustado aos dados, seguido pelo modelo de Meyer (0,9696), Hohenadl-Krenn (0,9695), Stoate (0,9672) e Spurr (R²ajustado 0,8702).

Para as estatísticas de precisão, erro padrão da estimativa ($Syx\%$), o modelo que teve menor valor e, portanto, menor erro em porcentagem foi o modelo de Hohenadl-Krenn, com $Syx\%$ de 14,31, sendo seguido pelo modelo de Stoate (14,72), Schumacher-Hall (18,25), Spurr (28,81), Meyer (54,46) e Prodan I (292, 48) com um maior valor o sendo o maior erro de porcentagem. Portanto, as variáveis independentes dos modelos de Hohenadl-Krenn (d e d^2), Stoate (d^2 , d^2h e h) e Schumacher-Hall (Ind e Inh) explicam melhor do que as dos modelos de Prodan (d^*h , d^2h^2 , d^3/h^3 , d^4/h^4 , d^5/h^5 e d^6/h^6), Spurr (d^2h) e Meyer (d , d^2 , dh) e d^2h .

Levando-se em consideração o coeficiente de determinação ajustado (R^2aj) e o erro padrão da estimativa ($Syx\%$) para a base de dados utilizada, a escolha entre os modelos de Schumacher-Hall linearizado, Hohenadl-Krenn e Stoate não linear fica a critério de quem irá realizar a estimativa para um talhão com características próximas a deste estudo, já que estes apresentam valores muito aproximados e considerados bons estatisticamente. Para Machado (2008), a análise gráfica de resíduos é uma ferramenta complementar indispensável na hora da escolha da melhor equação, portanto foi utilizada para auxiliar a escolha do modelo.

Os resíduos entre os volumes estimados e volumes observados, estão representados nos Gráficos 1, 2, 3 4, 5, e 6 comprovando para este trabalho o que Machado (2006) afirmou, pois com o auxílio da análise gráfica dos resíduos foi possível observar as tendências e dispersões dos dados estudados, sendo que para o presente trabalho o modelo de Schumacher-Hall apresenta uma menor tendência e menor dispersão dos dados.

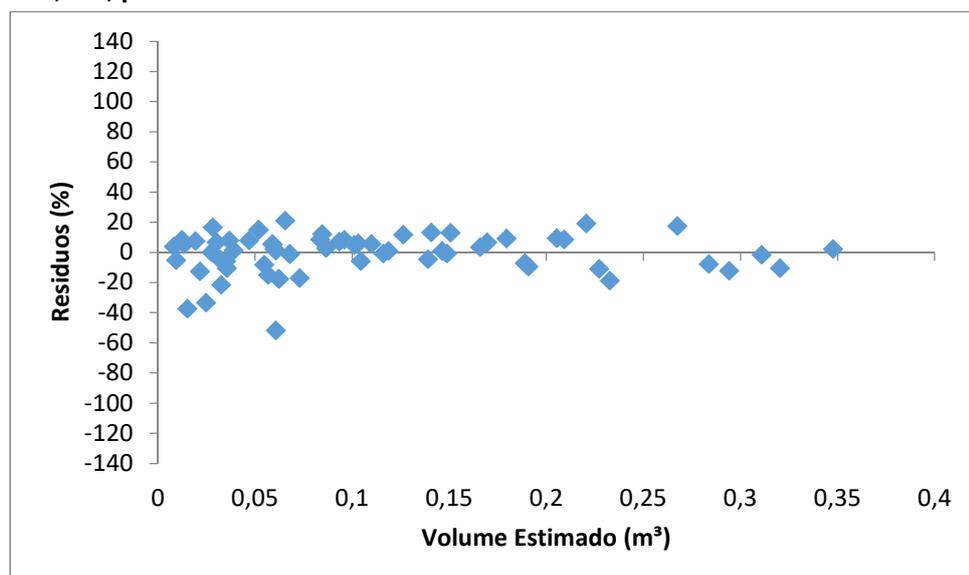
Gráfico 1 - Gráfico de resíduos em porcentagem, plotado sobre o volume estimado pinus taeda em Santa Cecília, SC, para o modelo de Spurr.



Fonte: O autor (2018).

Na análise gráfica do modelo de Spurr (Gráfico 1) é possível ver que a nuvem de pontos tem tendência para superestimar – resíduos (%) negativos – sendo portanto não indicado seu uso.

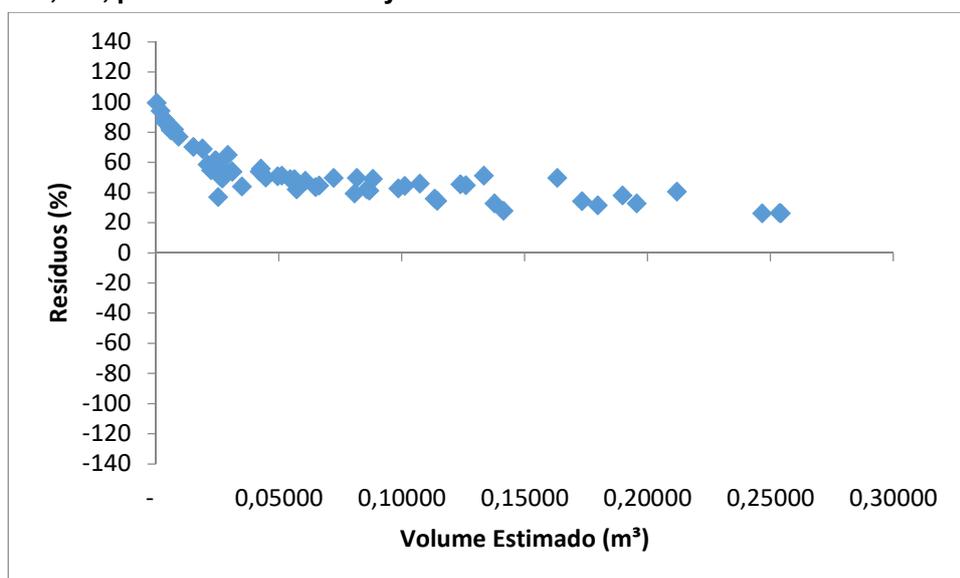
Gráfico 2 - Gráfico de resíduos em porcentagem, plotado sobre o volume estimado pinus taeda em Santa Cecília, SC, para o modelo de Schumacher-Hall



Fonte: O autor (2018).

A nuvem de pontos (Gráfico 2) do modelo de Schumacher Hall apresentou menor tendência e melhor distribuição comparado com os outros modelos, sendo os valores mais distantes do resíduo (%) igual a zero, os de -51 e 21.

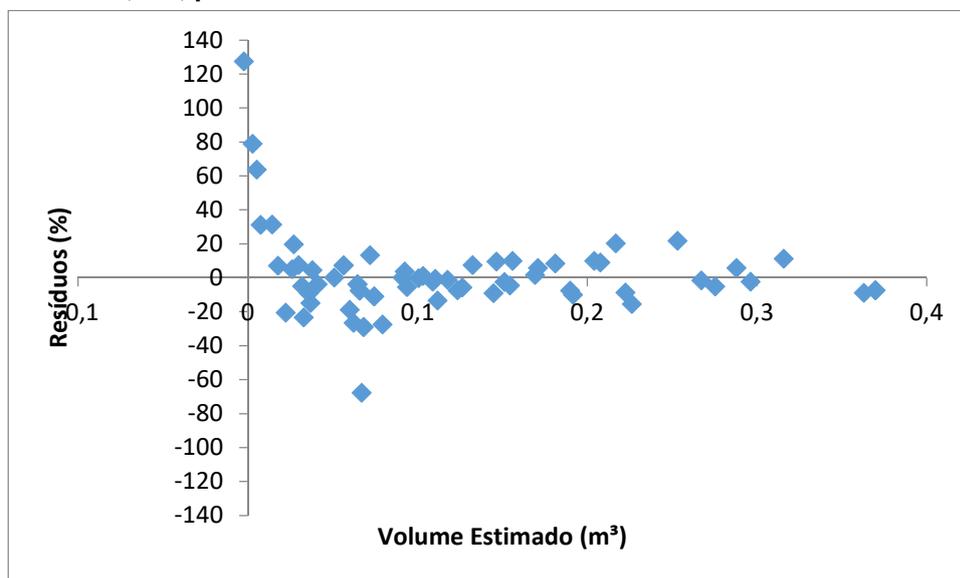
Gráfico 3 - Gráfico de resíduos em porcentagem, plotado sobre o volume estimado pinus taeda em Santa Cecília, SC, para o modelo de Meyer.



Fonte: O autor (2018).

Os resíduos (%) do modelo de Meyer (Gráfico 3) apresentaram tendência, subestimando os volumes, tendo uma maior tendência nos menores volumes estimados.

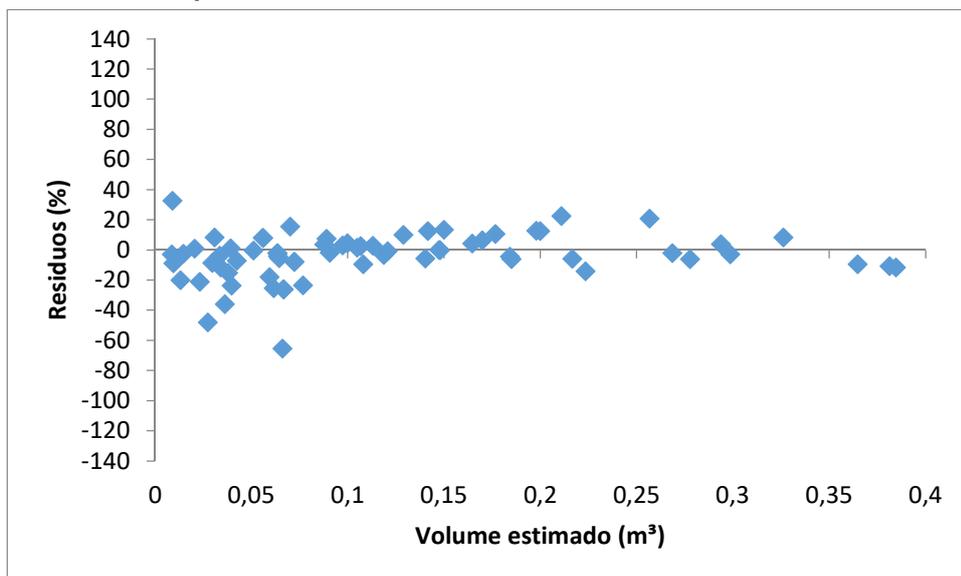
Gráfico 4 - Gráfico de resíduos em porcentagem, plotado sobre o volume estimado de pinus taeda em Santa Cecília, SC, para o modelo de Hohenadl-Kreenn.



Fonte: O autor (2018).

O modelo de Hohenadl-Kreenn (Gráfico 4) apresentou boa nuvem de pontos, mas o mesmo apresenta valores com grande variação de resíduo (%) sendo eles de -67 e 127. O modelo também apresenta tendência a subestimar os menores volumes estimados, não sendo adequado para o objeto de estudo já que o mesmo apresenta grande quantidade de indivíduos de menores dimensões.

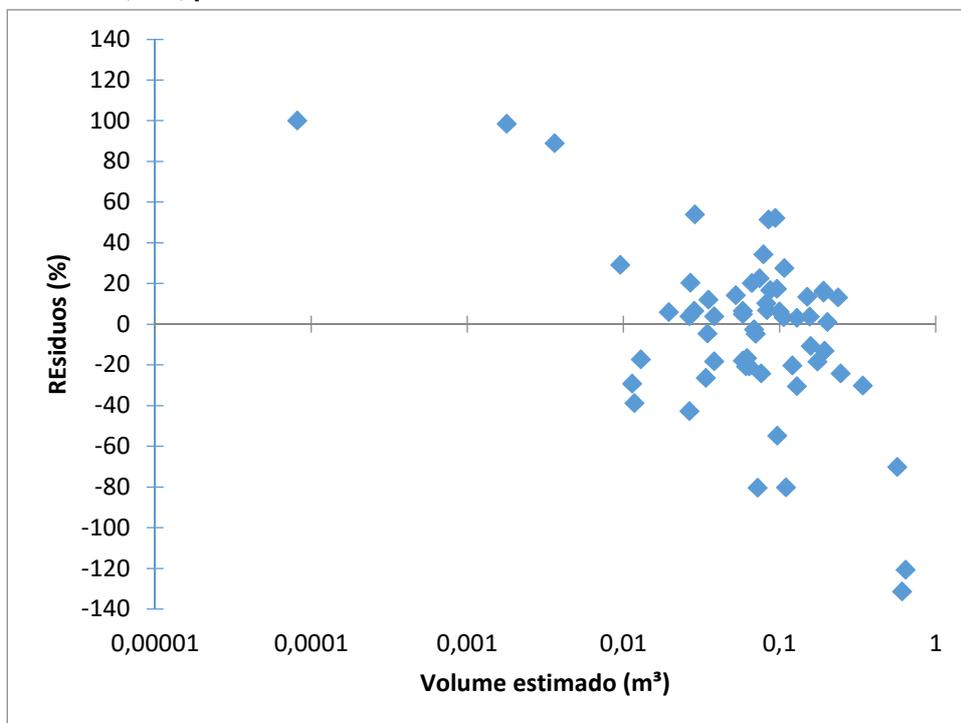
Gráfico 5 - Gráfico de resíduos em porcentagem, plotado sobre o volume estimado de pinus taeda em Santa Cecília, SC, para o modelo de Stoaate.



Fonte: O autor (2018).

O modelo de Stoaate (Gráfico 5) apresentou uma tendência a superestimar valores de volume estimado até 0,088 (m^3) e resíduos (%) com grande variação, sendo -67 e 32 os de maior amplitude.

Gráfico 6 - Gráfico de resíduos em porcentagem, plotado sobre o volume estimado de pinus taeda em Santa Cecília, SC, para o modelo de Prodan I.



Fonte: O autor (2018).

No Gráfico 6 é possível observar que o modelo de Prodan I apresenta uma má distribuição da nuvem de pontos tendo uma grande amplitude de resíduos (%).

Draper e Smith (1966) afirmam que nenhuma equação de estimativa deve ser selecionada para o uso sem antes ser analisado graficamente seus resíduos. Portanto quando se analisa a distribuição gráfica dos resíduos das soluções das equações de volume de, Spurr, Schumacher-Hall, Meyer, Hohenadl-Krenn, Stoate não linear e Prodan I, nos Gráficos 1, 2, 3,4 e 5, 6, e consecutivamente, que apresentam os resíduos plotados sobre o volume estimado, nota-se que o modelo de Schumacher-Hall (Gráfico 2) apresenta uma menor tendência tanto em superestimar quanto subestimar os valores estimados e com resíduos melhor distribuídos, apresentando uma nuvem de pontos bem distribuída próxima ao valor 0 (zero) do eixo y.

Os modelos de Spurr (Gráfico 1), Prodan (Gráfico 6), Stoate (Gráfico 5) e o Meyer (Gráfico 3) apresentaram tendência, sendo, por essa razão, descartado o seu uso, devido a não confiabilidade da aferição estatística e suas estimativas com menor precisão.

Com o auxílio do Gráfico 2, em que o modelo de Schumacher-Hall apresenta valores mais próximos de 0 (eixo y - Resíduos (%)), tendo menor porcentagem de resíduos, é possível evidenciar seu melhor ajuste perante aos outros modelos, pois o mesmo apresenta um maior coeficiente de determinação múltiplo, baixo erro padrão de estimativa e menor tendência por apresentar uma nuvem de pontos bem distribuída e próxima ao valor 0 do eixo y, sendo estes indicativos de que este modelo é mais apropriado entre os estudados.

O teste de qui-quadrado (χ^2), que consiste em comparar os valores de χ^2 calculado com o valor de χ^2 tabelado, foi utilizado com o objetivo de comparar os volumes reais dos volumes estimados pela equação selecionada, sendo o valor tabelado, para 95% de precisão e com grau de liberdade 68, de 88,25016 e o valor calculado para a equação volumétrica de Schumacher foi de 0,08805. Sendo o valor calculado menor que o valor tabelado a equação volumétrica de Schumacher-Hall é válida.

6. CONCLUSÕES

Com os dados e análises estudadas, é possível concluir que a escolha da melhor equação baseou-se em todos os quesitos avaliados, sendo a análise gráfica muito útil no processo de escolha, com base nela é possível observar e selecionar um modelo mais adequado ao cenário de estudo, pois mesmo alguns modelos demonstrando um melhor ajuste, por apresentar um menor valor de erro padrão de estimativa ($Syx\%$) e também um maior valor de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$), apresentaram tendência em superestimar e subestimar os valores calculados.

A equação de Schumacher-Hall (linear), $Inv = -8,47819 + 2,252852 \text{ Ind} + -0,02217 \text{ Inh} + \epsilon$, apresentou $R^2_{aj.}$ 0,9818 e $Syx\%$ 18,25. Na análise gráfica o modelo de Schumacher-Hall (linear) apresentou uma dispersão mais uniforme da nuvem de pontos, menor tendência, diferindo dos outros modelos.

O Fator de Forma Artificial médio obtido, para o plantio de *Pinus taeda* em Santa Cecília, SC, foi o de 0,4904, variando de 0,3814 a 0,7676. Sendo os menores valores encontrados para maiores diâmetros, não influenciando, portanto um futuro rendimento caso o plantio seja destinado a serraria.

O teste de qui-quadrado demonstrou que a equação ajustada do modelo de Schumacher-Hall (linear) é válida, pois a mesma apresentou valor de qui-quadrado calculado menor que tabelado, reafirmando assim a possibilidade de uso dessa equação para estimar volume.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, V. C. L.; Modelos Volumétricos de Dupla Entrada para Aplicar em Povoamentos Florestais Brasileiros. **Floresta e Ambiente**. 2017.

ARAGÃO, M. de A.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; LEITE, M. V. S.; CARVALHO, F. F. de; VIRGENS, A. P. das; Teste De Identidade De Modelos Volumétricos Para *Pinus oocarpa* E *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* Em Povoamento Misto No Sudoeste Da Bahia. **Rev. Bras. Biom.**, Lavras, v.34, n.4, p.621-632, 2016

CARGNIN, O. **Alternativas das florestas de pinus**. 2005.

Disponível em: <http://noticias.ambientebrasil.com.br/artigos/2005/09/27/21014-alternativas-das-florestas-de-pinus>

Acesso em: 11 de Abril de 2018

CLIMATE DATA. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/location/3383/>

Acessado em: 09 de Abril de 2018

CUNHA, U. S. da. **Dendometria e Inventário Florestal**. Manaus, 2004

DRAPER, N.; SMITH, H. Applied regression analysis., **Biometrical Journal**, Nova Iorque, 427p. 1966.

Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/bimj.19690110613>

Acessado em: 19 de Abril de 2018

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2011.

Disponível em: <https://www.spo.cnptia.embrapa.br/>

Acessado em: 10 de Abril de 2018

FINGER, C. A. G. **Fundamentos da Biometria Florestal**. Santa Maria: Ed. da UFSM, 269 p. 1992.

GEORGIN, J.; ZANON, M.; LAZZARI, L.; ELOY, J. B.; Inventário florestal quantitativo em plantio de *Pinus elliottii* no município de Ronda Alta, RS. **Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM Santa Maria**, v. 19, n. 1, jan.- abr. p. 228-236, 2015.

GOMES, A. M. A. **Medição dos arboredos**. Lisboa: Livraria Sá da Costa, 413p. 1957.

HOFFMANN E. e VIEIRA, **Análise de Regressão: uma introdução a Econometria**. São Paulo. Hucitec, 1983.

JUVENAL, T. L.; MATTOS, R. L. G. **O setor de celulose e papel**. BNDES, 2002. Disponível em: www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Publicacoes/Consulta_Expressa/Tipo/Livro/200212_17.html.

Acessado em: 20 de set. 2016

KOCH, P. Utilization of the Southern pines. Washington: **USDA Forest Service**, 1972.

MACHADO, S do A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria** - 2º edição – Guarapuava. UNICENTRO, 316 p. 2006.

MÔRA, R.; FIGUEIREDO FILHO, A.; KOHLER, S. V.; MIRANDA, R. O. V. de; Modelos Para Estimativas Volumétricas De Fustes De *Pinus taeda* L. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, Centro Científico Conhecer - v.10, n.19; p. 1321. 2014.

OLIVEIRA, M. L.R. de; SOARES, C. B.P.; SOUZA, A. L. de; LEITE, H. G.; Equações de volume de povoamento para fragmentos florestais naturais do município de Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa. v.29, n.2 2005.

OLIVEIRA, R. Z. G. de; GARCIA, C.; Sobre métodos de obtenção do volume de toras de madeira. **Revista do professor de matemática** nº 83, 2014.

PONCE, R.H. Madeira serrada de eucalipto: desafios e perspectivas. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, Piracicaba, 1995. **Anais**. Piracicaba: IPEF/IPT/IUFRO/LCF-ESALQ-USP, 1995.

SANQUETTA, C. R. et al., **Inventários florestais: planejamento e execução** – 3ª Edição – revista e ampliada. Curitiba, 215p. 2014.

SCHNEIDER, P. R. **Análise de Regressão a aplicada a Engenharia Florestal**. 2ª Ed. Santa Maria: UFSM, 1998.

SCOLFORO, J. R. S.; MACHADO, S.A. Curvas de índice de sítio, para plantações de *Pinus elliottii* nos Estados do Paraná e Santa Catarina. Curitiba, **Revista Floresta**, v. 18, no. 112, 140p, 1988.

SILVA, J. A. A. da; NETO, F. de P.; Princípios Básicos da Dendrometria. **Imprensa Universitária**. UFRPE, 1979.

SILVESTRE, R.; BONAZZA, M.; STANG, M. LIMA, G. C. P.; KOEPEL, D. A.; MARCO, F. T. de.; CIARNOSCHI, L. D.; SCARIOT, R.; MORÊS, D. F.; Equações Volumétricas Em Povoamentos De *Pinus Taeda* L. No Município De Lages-SC. **Revista Nativa**, Sinop, v. 02, n. 01, p 01-05. 2014

SFB – Serviço Florestal Brasileiro – **Guia de Medição de Produtos e Subprodutos Florestais Madeireiros das Concessões Florestais**. Brasília, 2012.

SFB – Serviço Florestal Brasileiro – **As Florestas Plantadas**.

Disponível em: www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/as-florestas-plantadas.

Acessado: 15 de Fevereiro de 2018.

STÜPP, D. R.; HECK, O. L. J.; EYERKAUFER, M. L. – **Análise de Viabilidade Econômico-financeira de Cultivo de *Pinus taeda* em Propriedades Rurais do Alto Vale do Itajaí - SC**. Florianópolis, XXIV Congresso Brasileiro de Custos, 2017

THOMAS, C.; ANDRADE, M.C.; SCHNEIDER, R.P; FINGER, G. A. C. Comparação De Equações Volumétricas Ajustadas Com Dados De Cubagem E Análise De Tronco. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 3, 319-327p. 2006.

TOMAZELLO FILHO, M.; LATORRACA, J. V. F. de; FISCHER, F. M.; MUÑIZ, G. I. B. de; MELANDRI, J. L.; STASIAK, P. M.; TORRES, M. A. PICCION, W. J.; HOFFMANN, H. A.; SILVA, L. D.; Avaliação da Dispersão de Sementes de *Pinus taeda* L. pela Análise dos Anéis de Crescimento de Árvores de Regeneração Natural Mario. **Floresta e Ambiente**. 11p. 2017.

VEIGA, R.A. de A. O uso de equações de volume em levantamentos florestais. In: **Simpósio Sobre Inventário Florestal, 2**, Anais. ESALQ/IPEF, Piracicaba, 93-102p. 1984.