



GABRIELA RODRIGUES CARLOS

**ESTRATÉGIAS DE VARIAÇÃO DO MODELO DE
DENSIDADE VARIÁVEL**

**LAVRAS – MG
2019**

GABRIELA RODRIGUES CARLOS

ESTRATÉGIAS DE VARIAÇÃO DO MODELO DE DENSIDADE VARIÁVEL

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Florestal, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Lucas Rezende Gomide
Orientador

Msc. Cássio Augusto Ussi Monti
Coorientador

**LAVRAS-MG
2019**

**Ficha catalográfica elaborada automaticamente, com os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

Carlos, Gabriela Rodrigues.
Estratégias de Variação do Modelo de Densidade Variável
/ Gabriela Rodrigues Carlos. - 2019.
37 p. : il.

Orientador(a): Lucas Rezende Gomide.
Coorientador(a): Cássio Augusto Ussi Monti.
TCC (graduação) - Universidade Federal de Lavras, 2019.
Bibliografia.

1. Modelos de Crescimento e Produção. 2. Índice de Sítio.
3. Substituição do índice de sítio por altura dominante. I.
Gomide, Lucas Rezende. II. Monti, Cássio Augusto Ussi. III.
Título.

GABRIELA RODRIGUES CARLOS

ESTRATÉGIAS DE VARIAÇÃO DO MODELO DE DENSIDADE VARIÁVEL

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Florestal, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 29 de novembro de 2019

DR. LUCAS REZENDE GOMIDE UFLA

MSC. ISÁIRA LEITE LOPES UFLA

MSC. LUCIANE NAIMEKE SCHMIDT UFLA

Prof. Dr. Lucas Rezende Gomide

Orientador

Msc. Cássio Augusto Ussi Monti

Coorientador

LAVRAS – MG

2019

*Ao meu pai Aristides por nunca me deixar faltar nada e pelo incentivo.
À minha mãe Vera, pelo carinho, paciência e suporte em todos esses anos.
Ao Tchão, minha querida chinchila que foi meu grande companheiro em toda essa aventura.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por me prover saúde e sabedoria para chegar até aqui, e por me conceder a companhia de pessoas maravilhosas para dividir comigo essa longa jornada.

Aos meus pais, Aristides e Vera por me acompanharem sempre muito de perto, me fornecendo todos os instrumentos necessários para realizar esse sonho que não é somente meu, mas deles também. Às minhas queridas irmãs Gislaine e Luciana, pelos conselhos, conversas, desabafos e principalmente por me conceder a companhia das minhas mais que adoráveis sobrinhas, Sofia minha melhor amiguinha e parceira de UNO e Mariana, nossa “saguzinha”.

Não posso deixar de agradecer aqui aos meus companheiros peludos de quatro patas que estiveram comigo, me ensinando um amor que não tem medidas, que não tem distinção, que não tem prazo de validade. Luly e Preta que nos fizeram imensamente feliz e hoje são grandes saudades e Dean, Dora, Sushi, Tchão e minha eterna querida Deca.

Sou muito grata à todos da AMATA S.A, empresa qual realizei estágio durante minha graduação e colaborou imensamente na minha formação profissional e principalmente pessoal. Levarei essa experiência eternamente comigo.

Aos meus preciosos amigos(as) que estiveram comigo nas festas e nos estudos durante esses meus longos 9 anos em Lavras. Cadu Demogorgon companheiro da Carreta do Dogão, Murillo e Pedro “parças” dos games, Giulia a amiga que a UFLA me deu em São Paulo e Poliana e Ana Luiza, que deixaram esses últimos meses de UFLA mais leves e felizes. Sou muito grata à minha primeira orientadora, professora Dulcinéia a qual me iniciou nesse mundo científico e é uma das pessoas mais fantásticas que eu tive o prazer de dividir meus dias, e ao Carlos Delano que sempre me incentivou e me ajudou nos meus primeiros passos em pesquisa acadêmica.

Ao meu orientador e professor Lucas Gomide, pela paciência e por acreditar em mim e me dar a incrível chance de trabalhar com algo o qual eu nunca havia imaginado e com certeza descobri uma nova paixão dentro das ciências florestais.

Ao pessoal do Laboratório de Planejamento e agregados, por toda ajuda e companheirismo, foi realmente muito mais leve desenvolver todo esse trabalho com a participação de vocês no meu dia a dia.

Muita gratidão à Universidade Federal de Lavras, especialmente os professores e técnicos do Departamento de Ciências Florestais, foi realmente uma experiência incrível graduar nessa universidade.

“Parte da jornada é o fim”.

(Homem de Ferro)

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo verificar a eficiência e a acuracidade na aplicação do modelo em nível de povoamento de Clutter, substituindo o uso da variável índice de sítio (S) pela altura dominante sob diferentes estratégias. A região de estudo se localiza no estado do Mato Grosso do Sul, entre os municípios de Três Lagoas e Água Clara, plantadas com eucalipto clonal. Foram utilizados dados do inventário florestal contínuo com medições compreendendo os anos de 2016 até 2018, englobando idades de 1,45 a 4,94 anos. Para gerar as curvas de índice de sítio foram ajustados os modelos de Chapman & Richards e Schumacher nas suas formas anamórficas. O método de construção das curvas empregado foi o da curva guia. Os modelos testados foram avaliados com as estatísticas: erro padrão da estimativa ($Syx\%$), erro padrão da estimativa percentual ($Syx\%$), coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajust}) e com a distribuição gráfica dos resíduos. O modelo de Schumacher se mostrou superior e, portanto, foi utilizado para a classificação produtiva local. Em seguida, a base de dados foi organizada e dividida 70% para o ajuste do modelo de Clutter (1963) S, e outras três variações (a- Hd_2 , b- Hd_{fixa} e c- Hd_1). Os outros 30% dos dados foram usados para a aplicação e validação desses modelos, e conseqüentemente, para a escolha do que melhor estimou a produção volumétrica futura. A avaliação da predição considerou a comparação do erro médio da aplicação dos modelos (Clutter S – 4,53%; Hd_2 – 7,31%; Hd_{fixa} – 1,60%; Hd_1 – 6,89%). Os resultados demonstraram que a substituição da variável índice de sítio, pela altura dominante fixada da última medição (Hd_{fixa}) produz resultados satisfatórios, sendo superior ao método tradicional. Utilizando a altura dominante presente (Hd_1), seus efeitos foram inferiores às estratégias S e Hd_{fixa} , porém superior ao método utilizando a altura dominante projetada por Schumacher (Hd_2), a qual se mostrou inferior em relação à todos os modelos. Conclui-se que o método o qual se utiliza a altura dominante fixada (Hd_{fixa}) pode substituir o modelo clássico de Clutter (S), pois além de apresentar melhores resultados de ajuste e validação, não é necessário realizar a classificação da capacidade produtiva local.

Palavras-chave: Prognose. Variações no modelo de Clutter. Capacidade de produção local.

ABSTRACT

The objective of this work was to verify the efficiency and accuracy in applying the Clutter stand model, replacing the use of the site index (S) variable by the dominant height under different strategies. The study region is located in the state of Mato Grosso do Sul, between the municipalities of Três Lagoas and Água Clara, planted with clonal eucalyptus. We used data from the continuous forest inventory with measurements from 2016 to 2018, ranging from 1.45 to 4.94 years. To generate site index curves, the Chapman & Richards and Schumacher models were adjusted to their anamorphic forms. The curve construction method employed was the guide curve. The tested models were evaluated with the statistics: standard error of estimate ($S_{yx}\%$), standard error of percentage estimate ($S_{yx}\%$), adjusted determination coefficient (R^2_{ajust}) and the graphic distribution of the residuals. Schumacher's model was superior and was therefore used for local productive classification. Then, the database was organized and divided 70% for the adjustment of Clutter's model (1963) S, and three other variations (a-Hd₂, b-Hd_{fixa} and c-Hd₁). The other 30% of the data were used for the application and validation of these models, and consequently for the choice of what best estimated the future volumetric production. The prediction evaluation considered the comparison of the mean application error of the models (Clutter S - 4.53%; Hd₂ - 7.31%; Hd_{fixa} - 1.60%; Hd₁ - 6.89%). substitution of the site index variable by the dominant dominant height of the last measurement (Hd_{fixa}) produces satisfactory results, being superior to the traditional method. Using the present dominant height (Hd₁), its effects were inferior to the S and Hd_{fixa} strategies, but superior to the method using the dominant height projected by Schumacher (Hd₂), which was inferior to all models. It is concluded that the method using the fixed dominant height (Hd_{fixa}) can replace the classic Clutter model (S), because besides presenting better adjustment and validation results, it is not necessary to classify the local productive capacity.

Keywords: Prognosis. Variations on the Clutter model. Local production capacity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Área de árvores plantadas no Brasil por estado e por gênero em 2018.....	13
Tabela 1 - Modelos que expressam a capacidade produtiva local.....	16
Tabela 2 – Principais modelos em nível de povoamento.	18
Figura 2 – Tipos de modelos de crescimento e produção quanto a sua estrutura e aplicação..	19
Figura 3 – Localização das áreas de estudo.....	20
Tabela 3 - Estatísticas dos dados utilizados.....	21
Figura 4 – Fluxograma metodológico desenvolvida no trabalho.	21
Tabela 4 – Coeficientes e estatísticas para os modelos de altura dominante ajustados.....	24
Figura 5 – Distribuição gráfica dos resíduos para os modelos ajustados (A) Schumacher e (B) Chapman & Richards	25
Figura 6 – Curvas anamórficas de índice sítio geradas pelo modelo de Schumacher.....	26
Tabela 5 – Estatísticas e coeficientes do modelo de Clutter e suas variações.....	26
Figura 7 – Distribuição gráfica dos resíduos em termos absolutos utilizando o modelo tradicional de Clutter (A), Hd_1 (B), Hd_2 (C) e Hd_{fixa} (D).....	27
Figura 8 – Volume real x volume estimado utilizando o modelo tradicional de Clutter (A), Hd_1 (B), Hd_2 (C) e Hd_{fixa} (D).....	28
Tabela 6 – Valores médios do erro absoluto ($m^3.ha^{-1}$) e relativo (%).	29
Figura 9 - Volume em função da idade para as parcelas do sítios I (A) , II (B), III (C) e IV (D)	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	O gênero <i>Eucalyptus</i>	13
2.2	Qualidades de sítios florestais e métodos de determinação	14
2.3	Curvas de índice de sítio	15
2.4	Modelos de crescimento e produtividade	17
3	MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1	Localização da área de estudo	19
3.2	Caracterização dos dados	20
3.3	Modelagem do crescimento e produtividade	21
3.3.1	Modelagem das curvas de sítio	22
3.3.2	Modelos de densidade variável	23
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1	Modelagem das curvas de sítio	24
4.2	Análise comparativa dos modelos gerados	26
4.3	Validação dos modelos gerados	28
5	CONCLUSÕES	31
	REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

O Brasil está entre os principais produtores de celulose, papel e painéis de madeira no mundo, com exportações que trazem inegável contribuição para a balança comercial e geram muitos empregos e renda em todas as regiões do País. A área total de árvores plantadas, para fins comerciais no Brasil, totalizou 7,84 milhões de hectares em 2018, crescimento de 0,5% em relação ao ano de 2015, devido exclusivamente ao aumento das áreas com eucalipto. Os plantios de eucalipto ocupam 5,7 milhões de hectares da área de árvores plantadas do País e estão localizados, principalmente, em Minas Gerais (24%), em São Paulo (17%) e no Mato Grosso do Sul (15%) (IBÁ, 2019). Nos últimos cinco anos, o crescimento da área de eucalipto foi de 2,4% a.a, sendo o Mato Grosso do Sul liderança nesta expansão, registrando aumento de 400 mil hectares neste período, com uma taxa média de crescimento de 13% a.a. segundo o relatório anual de 2019, com base nos dados de 2018 (IBÁ,2019)

Uma das principais ferramentas para uma melhor administração das florestas de produção é o conhecimento quantitativo do potencial do sítio para uma espécie, o que irá auxiliar nas tomadas de decisões no planejamento e dos tratamentos silviculturais como: desbastes, prognoses de produção, práticas de fertilização, condução ou não da talhadia, entre outros. Tendo grande enfoque no manejo florestal, a capacidade produtiva local, que é sumarizado pela variável Sítio, é o fator de produção primário capaz de produzir madeira ou produtos florestais (SCOLFORO, 1997). Sua produtividade influencia o crescimento em diâmetro, altura, biomassa e diâmetro de copa sendo o índice de sítio o método mais utilizado para definir a sua potencialidade (CUNHA NETO et al 1996; TONINI et al. 2009).

A variável dendrométrica que melhor satisfaz os requisitos proposto por Burger (1976) para determinar a qualidade do sítio florestal é a altura dominante, por ter boa correlação com a produção volumétrica, além de indicar a qualidade do sítio para todas as idades do povoamento, independente de sua densidade. O índice de sítio baseado na altura média das árvores dominantes é uma das técnicas mais práticas e populares para avaliar a produtividade florestal. E para a definição desse índice são empregados modelos matemáticos que representam a relação altura-idade, a partir da qual, gera-se uma família de curvas, denominadas “curvas de sítio”, as quais representam à taxa de crescimento em altura em cada sítio. As curvas geradas podem ser classificadas quanto à forma em anamórficas ou harmônicas e polimórficas ou naturais (CLUTTER et al., 1983). Enquanto que nas curvas anamórficas a taxa de crescimento em altura é considerada constante para todos os sítios

analisados, para as curvas polimórficas não existe essa proporcionalidade no crescimento em altura, sendo o crescimento dependente dos fatores do sítio.

Para efeito de planejamento, outra informação extremamente relevante é conhecer o quanto de volume de madeira aquela floresta irá gerar no futuro e, para isto, os modelos de crescimento e produção podem ser empregados. No Brasil, persiste o uso de modelos em nível de povoamento (ou povoamento total), os quais são definidos como sistemas de predição explícita, pois a produção em volume pode ser calculada diretamente. O modelo mais difundido desse tipo é o modelo de Clutter (1963), que tem como entradas as variáveis de índice de sítio, idade e área basal atual, em sua forma simultânea de predição e projeção. Há também os sistemas de predição implícita, os quais necessitam de informações básicas da produção e da estrutura do povoamento, sendo conhecidos também como modelos de distribuição de diâmetros. Já modelos que utilizam mais informações da árvore como unidade básica para a predição, são conhecidos como modelos de árvores individuais.

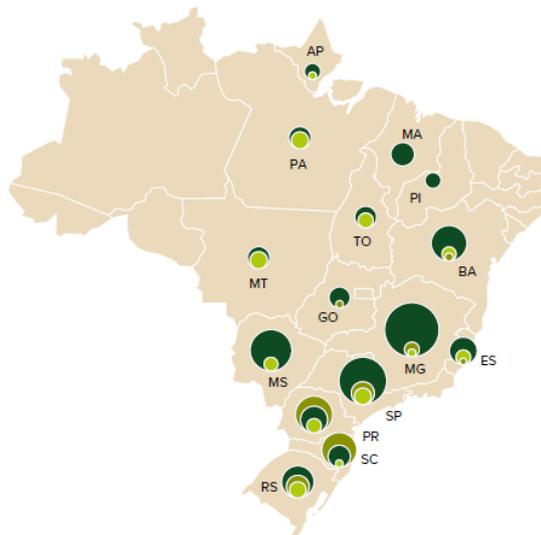
Ao analisar os materiais já publicados acerca desses temas na literatura, encontramos certa ocorrência dos que substituem variáveis do modelo clássico de Clutter, fornecendo então uma nova equação para estimar o volume futuro do povoamento florestal. Dessa maneira pode-se adotar outras estratégias, por meio de pequenas modificações em modelos de crescimento e produção que são clássicos na literatura, novas equações que representarão melhor o plantio florestal naquele momento, como é o caso dos estudos de Soares (2004) e Cunha (2016). Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o comportamento de dois modelos de regressão para a classificação da capacidade produtiva via método da curva guia e testar a substituição da variável índice de sítio (S) no modelo de densidade variável de Clutter, pela altura dominante em 3 diferentes estratégias. Além disso, avaliar o comportamento preditivo dos modelos gerados via validação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O gênero *Eucalyptus*

O gênero *Eucalyptus* pertence à família Myrtaceae e tem sua origem na Austrália, Tasmânia e outras ilhas da Oceania. Existem cerca de 730 espécies reconhecidas botanicamente além de subespécies, porém apenas uma pequena porção, não mais do que vinte delas, é utilizada com fins comerciais (PENTEADO, 2017). É o gênero mais plantado do mundo, pois apresentam diferentes potencialidades graças às suas características físico-químicas e mecânicas, tornando-o viável para diversas finalidades (SANTAROSA et al, 2014). Existiam apenas cerca de 700.000 hectares de plantações de *Eucalyptus* no Brasil até 1966, alocadas principalmente nas regiões Sul e Sudeste, porém em meados da década de 1970 foi dado início ao programa de Incentivos Fiscais ao Reflorestamento, criada pelo Governo Federal, o que fez expandir os plantios para outras regiões do Brasil. Segundo o relatório de 2019 da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), a área total de árvores plantadas no Brasil totalizou 7,83 milhões de hectares em 2018, sendo 5,7 milhões ocupados por eucalipto, representando um crescimento de quase 90% frente ao indicador de 1966. (IBÁ, 2019; SANTAROSA et al, 2014). Os estados que apresentam maior concentração de área plantada de eucalipto são Minas Gerais, São Paulo e Mato Grosso do Sul respectivamente como pode-se observar na Figura 1.

Figura 1 - Área de árvores plantadas no Brasil por estado e por gênero em 2018



Fonte: Relatório anual IBÁ (2019)

As espécies de eucalipto, de maneira geral, têm sido preferencialmente utilizadas, pois apresenta boa capacidade de adaptação às mais diversas regiões ecológicas, rápido crescimento e potencial econômico tendo em vista a vasta utilização de sua madeira, e vem aumentando de forma significativa por meio do desenvolvimento de técnicas silviculturais mais aperfeiçoadas, reduzindo assim a pressão sobre matas nativas (SANTAROSA, 2014)

2.2 Qualidades de sítios florestais e métodos de determinação

A determinação da qualidade dos sítios florestais é um fator básico no planejamento e na condução de povoamentos para produção madeireira de uma empresa florestal não devendo ser negligenciada, pois representa o potencial que determinada área tem em produzir boas árvores, ou seja, com boas características dendrométricas. Segundo Miguel et al. (2011) as condições de crescimento são boas em sítios bons e vice-versa.

Schneider (1993) definiu os principais objetivos da avaliação da qualidade de sítio: I- as estimativas do rendimento geral dos povoamentos; II- organização e execução de trabalhos de pesquisa; III- a programação e realização dos trabalhos de limpeza das plantas existentes; IV- categorização da qualidade de sítio em áreas que serão plantadas para melhor seleção das espécies. Clutter et al. (1983) afirmaram que os meios para antever o crescimento de florestas são baseados no conceito de que o crescimento e a produção de povoamentos de uma determinada espécie, ou composição de espécies, são influenciados pela idade do povoamento ou a distribuição da idade em povoamentos inequiâneos; pela capacidade inata de produção da área envolvida; pela suposição de que a capacidade inata de produção do sítio tem sido e é plenamente utilizada pelos tratamentos silviculturais aplicados.

Existem vários métodos para realizar a classificação de sítios e segundo Clutter et al. (1983), esses podem ser diretos ou indiretos. Os métodos diretos se utilizam de indicadores na própria vegetação (altura, volume, diâmetro, etc), que refletem as interações de todos os fatores do ambiente no próprio sítio. Já os indiretos por sua vez avaliam a qualidade de sítio a partir de atributos do ambiente, levando em consideração o clima, solo e vegetação e podem ser divididos em quantitativos (análise fator-sítio ou solo) e qualitativos, que envolve a divisão das terras em unidades com características, potencial de produção e de uso uniforme (SCHÖNAU, 1987). Para Spurr (1952) a qualidade do sítio não consiste em apenas um fator, mas sim a soma total dos fatores edáficos, biológicos e climáticos entre os quais um ou mais são dominantes que afetam a vegetação. Pritchett (1979) relatou os efeitos da topografia na

vegetação como fatores de variação de solos e outras características acabam por configurar os sítios. Segundo Carmean (1975), a classificação da qualidade de sítio baseada em características edáficas e topográfica é útil apenas quando as condições de solo variam bastante, permitindo classificar a paisagem em diferentes unidades representativas das classes de sítio, assim como quando não se dispõe de povoamentos para sua mensuração direta.

Spurr e Barnes (1973) afirmaram que a classificação topográfica de sítios pode ser realizada rapidamente por fotografias aéreas e mapas, sem a necessidade de levantamento de fatores edáficos. Para Burger (1976) os requisitos desejáveis em uma variável dendrométrica para determinar a qualidade do sítio florestal são: facilidade de determinação em campo, boa correlação com a produção volumétrica, indicação da qualidade de sítio para todas as idades do povoamento e que seja independente da densidade do povoamento. Sendo assim a variável que melhor se enquadra nesses requisitos é a altura dominante.

De acordo com Russel (1917), a altura dominante é uma sensível medida de qualidade de sítio, além de ser facilmente obtida. Sami (1970) o volume e a altura são características da vegetação que podem ser medidas para expressar a qualidade de sítio. Para Carmean (1970) a determinação da qualidade de sítio através da altura dominante é o método mais estável e de fácil aplicação, porém o de maior aproximação seria obtido medindo-se a madeira produzida num determinado período. No entanto é uma prática pouco aplicável uma vez que o volume não pode ser determinado tão facilmente. Por meio do uso da altura dominante, aplica-se o método do índice de sítio (CUNHA NETO et al., 1996) o qual é o mais conhecido e aplicado devido ao seu baixo risco graças à sua simplicidade, rapidez e facilidade de entendimento por se tratar de uma expressão numérica da qualidade do sítio a qual se relaciona com a produção, crescimento e gestão ao longo da vida de um povoamento florestal pois está associado com a idade (ALEMDAG, 1991).

2.3 Curvas de índice de sítio

Relacionando a idade índice (idade escolhida para a rotação do plantio) e o crescimento em altura das árvores dominantes, através de equações matemáticas, são geradas as curvas de índice de sítio (CLUTTER et al., 1983). Na elaboração das curvas de sítio, dependendo da base de dados utilizada e o método de ajuste, podem-se utilizar curvas anamórficas ou polimórficas (PRODAN et al., 1997). Curvas anamórficas são aquelas caracterizadas por possuírem a mesma relação de distância entre as curvas da mesma família,

ou seja, os coeficientes que configuram a inclinação da curva são invariantes para todas as curvas geradas.

Quando analisamos a forma de crescimento por meio de funções matemáticas, é importante observar se árvores de localidades diferentes resulta ou não no mesma equação. Cenários que apresentam diferentes crescimentos em altura em diferentes sítios para espécies iguais tem a imprescindibilidade de ajuste de funções individuais, denominadas polimorfismo, obtendo assim maior acerto na descrição dos sítios (SELLE et al., 1994). Segundo Dolph (1991) as curvas polimórficas são usualmente consideradas mais comportáveis com os hábitos de crescimento das árvores e com isso representam a forma natural da curva para os diferentes sítios.

Para a elaboração de curvas de índice de sítio segundo Clutter et al. (1983) são necessários alguns dados, os quais são obtidos substancialmente de três fontes: medições em parcelas permanentes, medições em parcelas temporárias e reconstrução da relação altura/idade para árvores individuais por meio de análise de tronco. Os dados advindos das parcelas permanentes são os melhores e mais confiáveis para a elaboração das curvas de índice de sítio, porém é mais dispendioso conseguir essas informações e elas só poderão ser utilizadas após várias remedições periódicas. A fim de expressar graficamente as curvas de sítio são utilizados modelos de regressão lineares ou não lineares, os quais através de técnicas estatísticas modelam as relações entre uma ou mais variáveis dependentes (de resposta) a partir de um conjunto de variáveis independentes, as predictoras. Podemos observar na Tabela 1 alguns modelos que podem ser utilizados para expressar a capacidade produtiva local.

Tabela 1 - Modelos que expressam a capacidade produtiva local.

Nº	Modelos	Autor
1	$\ln(Hdom) = \beta_0 + \beta_1 * \ln(Id) + \beta_2 * \ln(Id)^2$	Beckman
2	$Hdom = \beta_0 * (1 - e^{-\beta_1 Id})^{\beta_2}$	Chapman & Richards
3	$\ln(Hdom) = \frac{Id^2}{\beta_0 + \beta_1 * Id + \beta_2 * Id^2}$	Prodan
4	$\ln(Hdom) = \beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{Id}$	Schumacher

Onde: $\ln()$ = logaritmo natural; Hdom = altura das árvores dominantes (m); Id = Idade da medição; β_0 , β_1 e β_2 = coeficientes a serem estimados. Fonte: Adaptado SILVA et al. (2016).

2.4 Modelos de crescimento e produtividade

Campos e Leite (2017) definem crescimento como a mudança ocorrida na forma e no tamanho do tronco da árvore devido à disposição de camadas no lenho ao longo do material lenhoso, enquanto a produção é a quantidade total acumulada de alguma variável, como por exemplo, o volume, em um determinado tempo, portanto os modelos de crescimento e produção florestal são de fundamental importância para permitir a realização de várias tarefas dentro de empresas florestais. Conseguir estimar produção futura com base em dados atuais de maneira mais segura é essencial para o planejamento da colheita, análise econômica, dentre outros. É também de grande relevância nos estudos realizados em Ciências Florestais, pois por meio da simulação da dinâmica natural do povoamento uma série de outros estudos podem ser realizados (FRAGA FILHO, 2016). Segundo Leite (1990), os modelos de crescimento descrevem quantitativamente os povoamentos florestais através de relações matemáticas e tabelas, permitindo através dessas análises inferir sobre condições futuras das florestas sendo, portanto, um dos principais elementos de um sistema de modelagem de povoamentos florestais. Segundo Trevizol Júnior (1985) os primeiros modelos que estimavam a produção e crescimento florestal eram baseados na idade e qualidade do local e também em tabelas de produção, sendo desenvolvidos por meio de recursos gráficos. Porém esses processos raramente permitiam atingir respostas confiáveis, além de muito limitado, grande subjetividade e tempo demandado em sua elaboração.

Mackinney et al (1937) elaboraram a técnica dos mínimos quadrados em substituição aos processos gráficos no estudo de crescimento e produção, a qual Schumacher (1939) confirmou sua superioridade, apresentando para isso um modelo de regressão no qual as variáveis independentes eram a densidade do povoamento, idade e qualidade do local. As prognoses utilizavam, até os primeiros anos da década de sessenta, equações separadas para conseguir explicar cada constituinte do modelo, o que casualmente poderia direcionar a resultados incoerentes (GUIMARÃES, 1994). Então, com o objetivo de solucionar esse problema e criar modelos coesos em termos de crescimento e produção a relação derivada/integral foi reconhecida entre esses modelos (BUCKMAN, 1962; CLUTTER, 1963), pois obtém-se a produção integrando a equação de crescimento e obtém-se o crescimento ao derivar a equação de produção, resultando assim a concepção de modelos compatíveis (FRAGA FILHO, 2016).

Segundo Vanclay (1994) os modelos de crescimento e produção são classificados em: os modelos de árvores individuais (MAI), modelos de distribuição de diâmetro (MDD) e os

modelos em nível de povoamento (MNP). Os modelos de densidade variável considera a área basal (diâmetro médio ou frequência) como parte integrante da dinâmica do sistema de equações (SALLES, 2012). O modelo de Clutter, o qual foi utilizado nesse trabalho, é o mais conhecido e aplicado nacionalmente dentre os MNP (CAMPOS & LEITE, 2017), apesar de ter sido empregado originalmente em povoamentos de *Pinus taeda*, nos Estados Unidos. O modelo de Clutter permite estimar a variável volume por unidade de área independente da classe de tamanho da árvore, sendo assim considerado um modelo em nível de povoamento. Por utilizar diretamente a área basal de um ano para qualquer outro sem a necessidade de intervalos regulares ou então sua projeção ano a ano, a produção em volume é obtida de modo direto e demonstra consistência (MAGALHÃES, 2014). Os principais modelos em nível de povoamento são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Principais modelos em nível de povoamento.

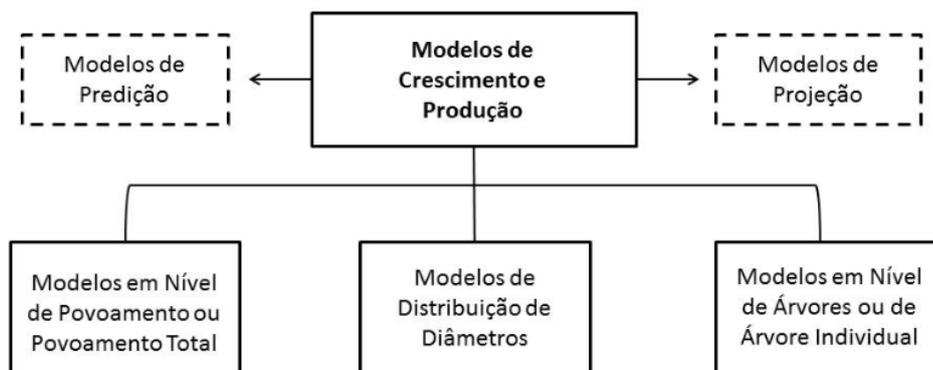
Relação Funcional	Modelo
$V = e^{\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{I}\right)} + \varepsilon$	Schumacher
$V = \frac{\beta_0}{1 + \beta_1 e^{-\beta_2 I}} + \varepsilon$	Logístico
$V = \beta_0 + e^{-e\beta_1 - \beta_2 I} + \varepsilon$	Gompertz
$V = \frac{\beta_0}{(1 + \beta_1 e^{-\beta_2 I})^{1/\beta_3}} + \varepsilon$	Richards
$LnB_2 = LnB_1 \frac{I_1}{I_2} + \alpha \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) + \alpha_1 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) S + \varepsilon$	Clutter (1963)
$LnV_2 = \beta_0 + \frac{\beta_1}{I_2} + \beta_2 S + \beta_3 + \beta_3 LnB_2 + \varepsilon$	

Onde: β_2 = área basal do povoamento na idade futura (m²/ha); β_1 = área basal do povoamento na idade atual; I_1 = idade atual em meses; I_2 = idade futura; S = índice de qualidade local; V_2 = volume total de madeira sem casca do povoamento, na idade futura (m³/ha); com α_1 e α_2 , = coeficientes do modelo de área basal; β_1 ... β_4 = coeficientes do modelo volumétrico; ε = erro. Fonte: Fraga Filho (2016).

Os modelos de árvores individuais usados de maneira alternativa aos de povoamento total, possuem a indispensabilidade de caracterizar o tamanho de cada árvore dentro do povoamento, em relação ao seu desenvolvimento em altura, diâmetro e ocasionalmente do tamanho da copa e sua posição no dossel, elevando a dificuldade para o estabelecimento dos dados, ajuste e aplicação (VANCLAY, 1994). Todos esses fatores fazem esse tipo de modelo

ser mais oneroso e de difícil aplicação. Mais simplificado que os modelos de árvores individuais, os modelos de distribuição diamétrica são uma opção relevante. Através da sua aplicação obtemos a aferição da produção por classe de diâmetro, fornecendo assim informações acerca da estrutura do povoamento. Segundo Leite (1990) com tais dados, a estimativa dos multiprodutos madeireiros assim como o planejamento dos tratamentos silviculturais, cortes e desbastes se tornam mais simples de se realizar. De acordo com sua estrutura e aplicação, uma classificação dos modelos de crescimento e produção é apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Tipos de modelos de crescimento e produção quanto a sua estrutura e aplicação.



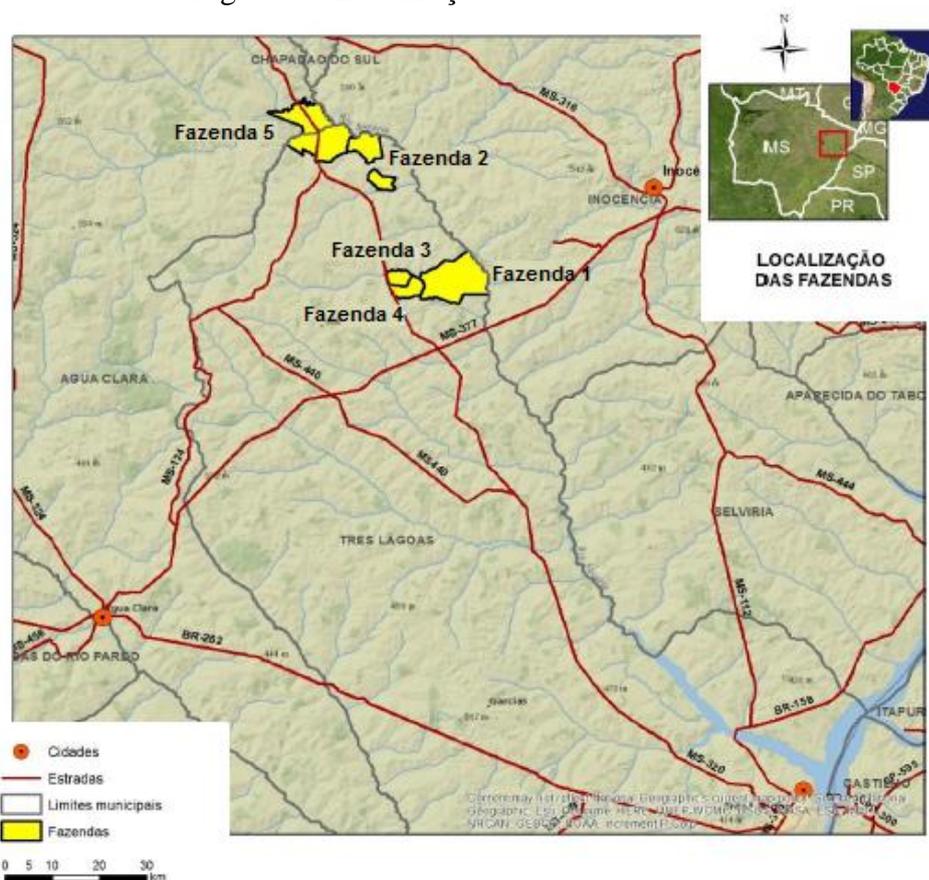
Fonte: Fraga Filho (2016)

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização da área de estudo

A região selecionada para a realização deste trabalho situa-se no estado do Mato Grosso do Sul, entre os municípios de Água Clara e Três Lagoas. É composto por cinco fazendas (Figura 3), sendo pertencentes a uma empresa do setor florestal. De acordo com a classificação de Köppen apresenta o tipo de clima “*Awa*”, característico de cerrado (savana), com verão quente e úmido e inverno seco, podendo ocorrer geadas esporádicas nos meses mais frios do ano. A altitude da região é aproximadamente 350m.

Figura 3 – Localização das áreas de estudo.



Fonte: Adaptado do Relatório do Plano de Manejo da Empresa (2018).

3.2 Caracterização dos dados

A realização desse estudo foram utilizados dados de 1.010 parcelas provenientes de inventário florestal contínuo (IFC) distribuídas entre cinco fazendas totalizando uma área de 9.567,15 ha plantados e conduzidos com Eucalipto clonal em primeira rotação com idades entre 1,45 a 4,94 anos. As parcelas permanentes foram medidas anualmente, apresentando área variável em torno de 680 m². Essa variação é gerada em função do espaçamento, sendo a área mínima observada de 481,3 m² e a máxima de 964,8 m² com formato levemente retangular. Os dados em nível de árvore geraram estimativas por parcela e ano de medição das seguintes variáveis: altura dominante (Hdom), seguindo o princípio de Assman; número de árvores por hectare (Arv/ha); diâmetro médio quadrático (dg); área basal (G/ha); volume total sem casca (V_{sc} m³/ha) e idade (anos). Após a consolidação dos dados, este passou por um processo de validação e identificação de erros, gerando as estatísticas observadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Estatísticas dos dados utilizados.

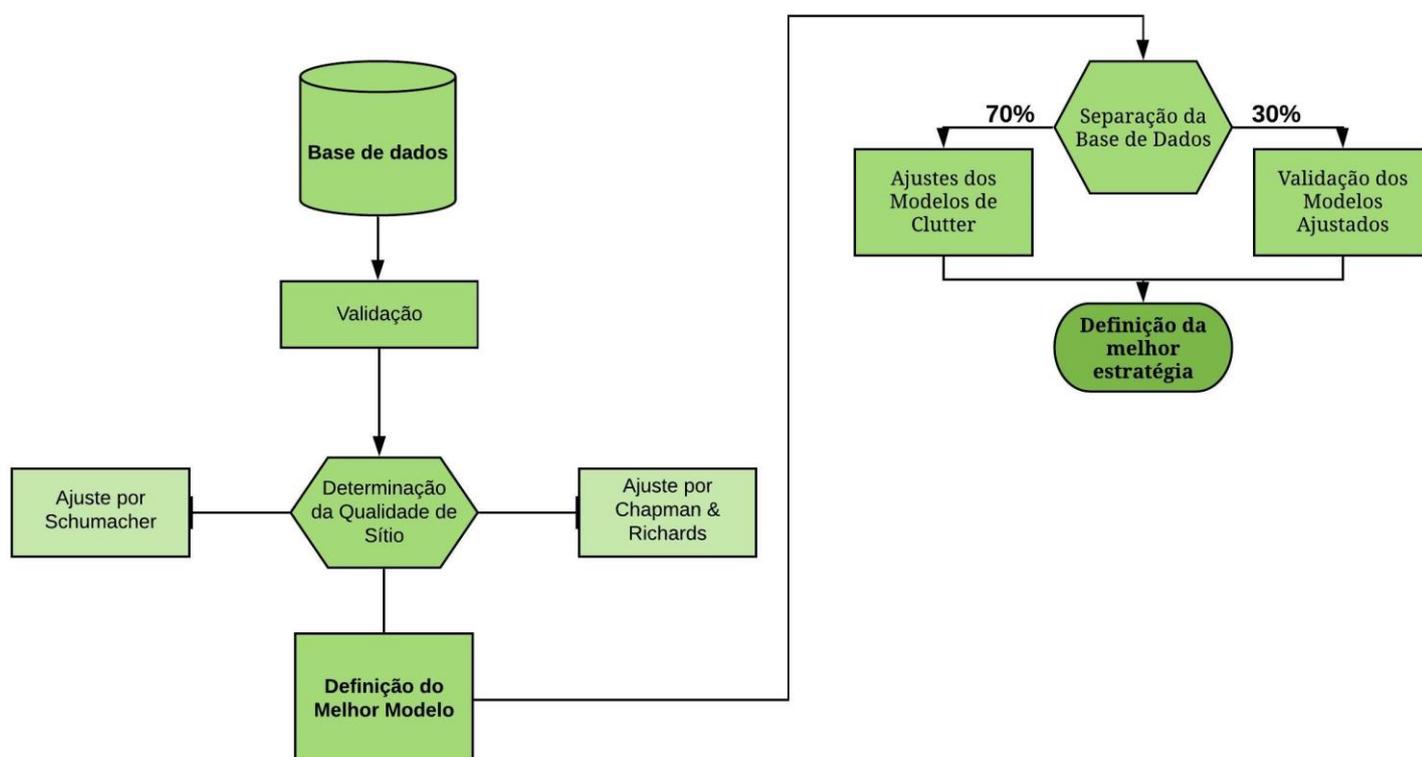
Variável	Mínimo	Média	Máximo	CV (%)
Hdom (m)	10,24	20,52	31,34	19,0
N (Arv.ha ⁻¹)	400,00	910	1.325,00	21,0
dg (cm)	8,25	14,36	19,69	15,0
G (m ² .ha ⁻¹)	4,65	14,86	27,38	27,0
V _{sc} (m ³ .ha ⁻¹)	20,04	118,06	268,34	39,0
I (anos)	1,45	3,09	4,94	29,0

Onde: Hdom = Altura dominante, Arv/ha = número de árvores por hectare, dg = , G = área basal, V_{sc} m³/ha = Volume sem casca por hectare, I = Idade, CV% = coeficiente de variação. Fonte: Do Autor (2019).

3.3 Modelagem do crescimento e produtividade

Estudos envolvendo a modelagem do crescimento e produtividade exigem uma série de métodos e modelos de regressão, para ao final permitir a predição do comportamento volumétrico. Nesse sentido, para melhor compreensão dos processos realizados na metodologia deste trabalho, foi desenvolvido um fluxograma metodológico, Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma metodológico desenvolvida no trabalho.



Fonte: do Autor (2019)

3.3.1 Modelagem das curvas de sítio

A classificação da produtividade local utilizou os modelos de Schumacher (Eq.1) e Chapman & Richards (Eq.2), sendo $\ln()$ o logaritmo natural; $Hdom$ a altura das árvores dominantes em metros pela definição de Assmann; Id a idade da medição em anos e; β_0 e β_1 são os coeficientes a serem estimados. No ajuste considerou o método dos mínimos quadrados ordinais.

$$\ln(Hdom) = \beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{Id} \quad (1)$$

$$Hdom = \beta_0 * (1 - e^{-\beta_1 Id})^{\beta_2} \quad (2)$$

A seleção do melhor modelo levou em consideração as seguintes estatísticas: a) Análise gráfica dos resíduos (%) b) estabilidade das curvas, que é uma característica de extrema importância a ser usada quando se trata de classificação de sítios, pois esta analisa a estabilidade que as parcelas têm no decorrer do tempo de permanecerem no mesmo sítio; c) Erro padrão da estimativa (Syx) em termos absolutos e percentuais ($Syx\%$) obtidos pela (Eq. 3 e 4), sendo que quanto mais próximo de zero melhor, pois indica o quão próximo os valores estimados estão dos valores observados; d) Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajus}), pois quanto mais próximo de 1 melhor será, já que mostra o quanto as variáveis dependentes estão sendo explicadas pelas independentes. O R^2_{ajus} foi obtido pela Eq.5, sendo: Y = valor observado; \hat{Y} = valor estimado; n = número de observações; p = número de parâmetros do modelo; $SQRes$ = soma de quadrados do resíduo; $SQTotal$ = Soma de quadrados total.

$$Syx = \sqrt{\frac{(Y-\hat{Y})^2}{n-p}} ; \quad Syx\% = \frac{Syx}{\bar{Y}} * 100 \quad (3) \text{ e } (4)$$

$$R^2_{ajus} = 1 - \frac{n-1}{n-p} * \frac{SQRes}{SQTotal} \quad (5)$$

Na classificação da capacidade produtiva adotou-se o método da curva guia, conforme metodologia descrita por Schneider (1993), gerando curvas anamórficas. Este estudo empregou uma base de 2.199 pares de altura dominante e idade, envolvendo até 3 medições distintas. Optou-se por uma idade de referência de 5 anos, por ser esta aproximadamente a idade verificada na última medição, que foi de 4,94 anos. As curvas geradas devem abranger

toda a amplitude de crescimento da variável em estudo. Assim, definiu-se 5 classes de sítios com um intervalo de 5m, realizando na sequencia comparativa entre modelos o teste de estabilidade. Ao final selecionou-se o modelo que melhor contribuiu para explicar sitio.

3.3.2 Modelos de densidade variável

As relações funcionais do tipo $V = f(I, S, B)$ resultam em informações mais aprofundadas na dinâmica do crescimento volumétrico. A produção, crescimento e a idade técnica de colheita são diferenciados por índices locais e densidade inicial. Logo, o modelo de Clutter foi adotado por ser um dos mais empregados no Brasil, apresentando as seguintes características: a) nível de povoamento, b) densidade variável, c) explícito, d) compatível e consistente (TREVIZOL,1985). A sua forma simultânea é descrita na Eq.6, sendo: I_1 é a idade presente, em anos; I_2 é a idade futura em anos; G_1 é a área basal na idade I_1 , em $m^2 ha^{-1}$; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ e β_5 são os coeficientes do modelo.

$$\ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{S} + \beta_2 \frac{1}{I_2} + \beta_3 \frac{I_1}{I_2} \ln(G_1) + \beta_4 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) + \beta_5 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) S + \varepsilon \quad (6)$$

Devido à dificuldade na classificação de sítio, somada a escassez de tempo para tal operação, adotou-se uma substituição da variável sítio (S), pela altura dominante já que estes apresentam uma relação direta. As três estratégias seguidas foram:

- a) Adotar a altura dominante atual, ou seja, a obtida juntamente com a base de dados vinda do inventário (Hd_1), gerando a Eq. 7.

$$\ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{Hd_1} + \beta_2 \frac{1}{I_2} + \beta_3 \frac{I_1}{I_2} \ln(G_1) + \beta_4 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) + \beta_5 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) Hd_1 + \varepsilon \quad (7)$$

- b) Utilizar a altura dominante projetada gerada pelo modelo de Schumacher na classificação de sítio (Hd_2), gerando a Eq. 8.

$$\ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{Hd_2} + \beta_2 \frac{1}{I_2} + \beta_3 \frac{I_1}{I_2} \ln(G_1) + \beta_4 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) + \beta_5 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) Hd_2 + \varepsilon \quad (8)$$

- c) Empregar a altura dominante obtida do último ano de medição do inventário da parcela substituindo a altura dominante das suas idades anteriores. (Hd_{Fixa}) gerando a Eq. 9.

$$\ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{Hd_{Fixa}} + \beta_2 \frac{1}{I_2} + \beta_3 \frac{I_1}{I_2} \ln(G_1) + \beta_4 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) + \beta_5 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) Hd_{Fixa} + \varepsilon \quad (9)$$

O modelo de Clutter foi ajustado tanto na sua forma clássica, como nas variações propostas utilizando o software R. A base de dados foi dividida sendo 70% dos dados utilizados no ajuste, e 30% na validação. Segundo Cabacinha (2003), existem dois tipos de validação de modelos: validação estatística e validação preditiva. Ambas têm como objetivo selecionar o melhor modelo a ser utilizado na estimativa volumétrica. A validação preditiva ocorre no contexto de novos dados, do mesmo povoamento, que gerou os dados do ajuste. Neste trabalho utilizou-se a validação preditiva, discriminando o erro por classe de sítio e a média geral para cada um dos modelos testados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Modelagem das curvas de sítio

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados para os modelos ajustados na estimativa da altura dominante. Analisando as estatísticas, observa-se que o modelo de Schumacher foi superior, apresentando maior coeficiente de determinação, menor erro padrão da estimativa e melhor distribuição dos resíduos de acordo com a Figura 5.

Tabela 4 – Coeficientes e estatísticas para os modelos de altura dominante ajustados.

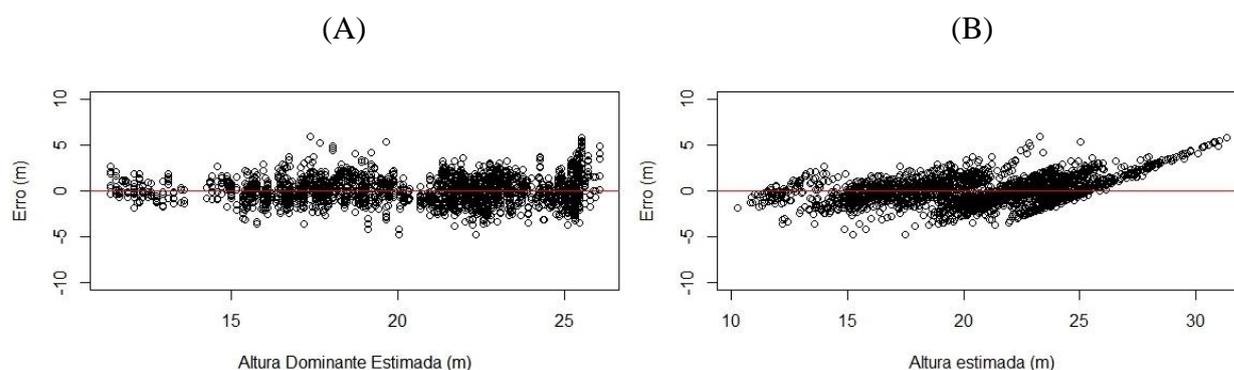
Modelos	Coeficientes			R ² ajustado (%)	Syx (%)
	β_0	β_1	β_2		
Schumacher	3,605391	-1,70547	-	87,43	5,25
Chapman & Richards	30,65257	0,43527	1,23081	85,76	7,18

Fonte: Do Autor (2019)

O resultado encontrado foi similar ao alcançado por Martins et al. (2007) para a espécie *Leucaena sp.* Os autores consideraram 544 árvores cultivadas sem e com composto orgânico, com 19 mensurações ao longo do tempo. De acordo com De Abreu Demolinari

(2007) também obteve ajustes favoráveis utilizando o modelo de Schumacher, para plantios de Eucalipto.

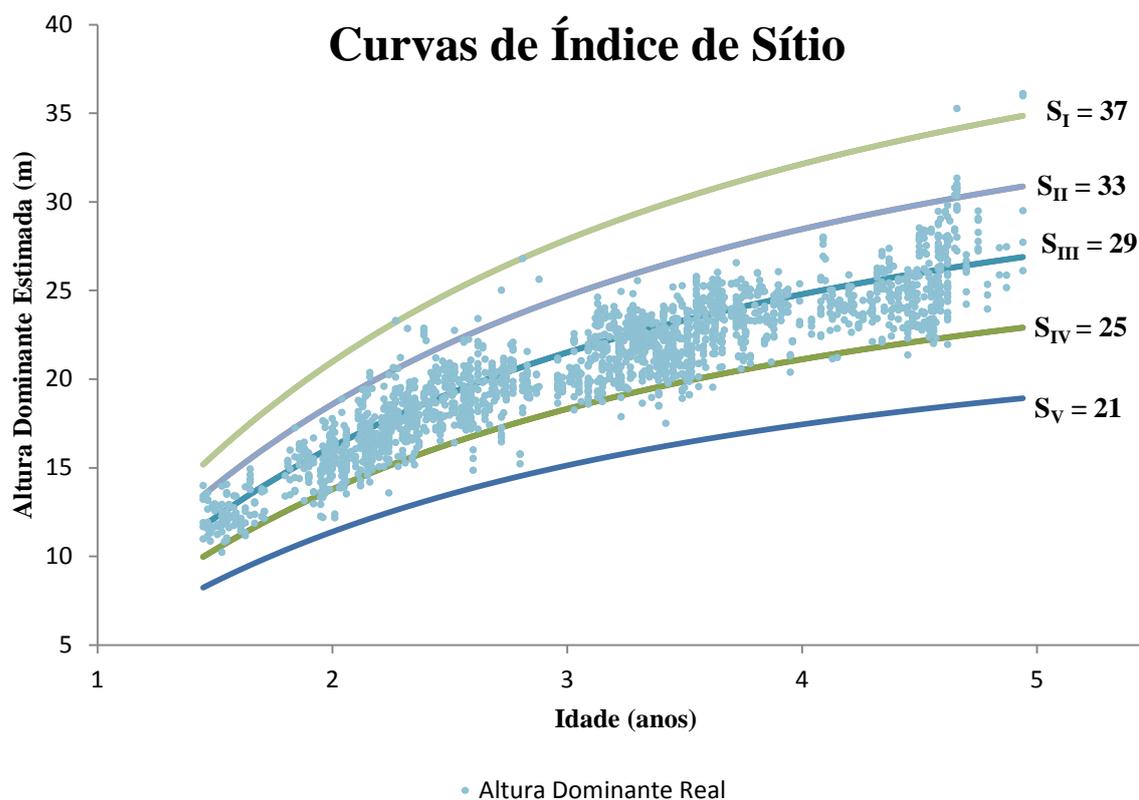
Figura 5 – Distribuição gráfica dos resíduos para os modelos ajustados (A) Schumacher e (B) Chapman & Richards.



Fonte: Do Autor (2019)

Diversos pesquisadores utilizaram o método da curva guia a partir do modelo de Schumacher, obtendo curvas anamórficas (NUNIFU e MURCHINSON 1999; HENAO 1982; KEOGH 1982; BERMEJO et al. 2004, VAIDES et al. 2004; JEREZ-RICO et al. 2011). Miguel et al. (2011) estudando a classificação de sítio para plantios de *Eucalyptus urophylla*, em Niquelândia localizada no estado de Goiás, concluiu que os resultados obtidos pelo método da curva guia para classificação de local mostraram-se adequadas para a base de dados estudada. A Figura 6 apresenta as curvas de sitio geradas pelo modelo de Schumacher, sendo que os melhores sítios possuem as maiores alturas dominantes estimadas em função do tempo.

Figura 6 – Curvas anamórficas de índice sítio geradas pelo modelo de Schumacher



Fonte: Do autor (2019)

4.2 Análise comparativa dos modelos gerados

As estatísticas geradas dos ajustes dos modelos se encontram na Tabela 5. Como se pode observar as estratégias B (Hd_1) e D (Hd_{fixa}) foram melhores que o ajuste do modelo clássico de Clutter (S). O mesmo não pode ser observado para a estratégia C. Porém, quando comparamos de forma absoluta os valores das métricas, os resultados são muito semelhantes.

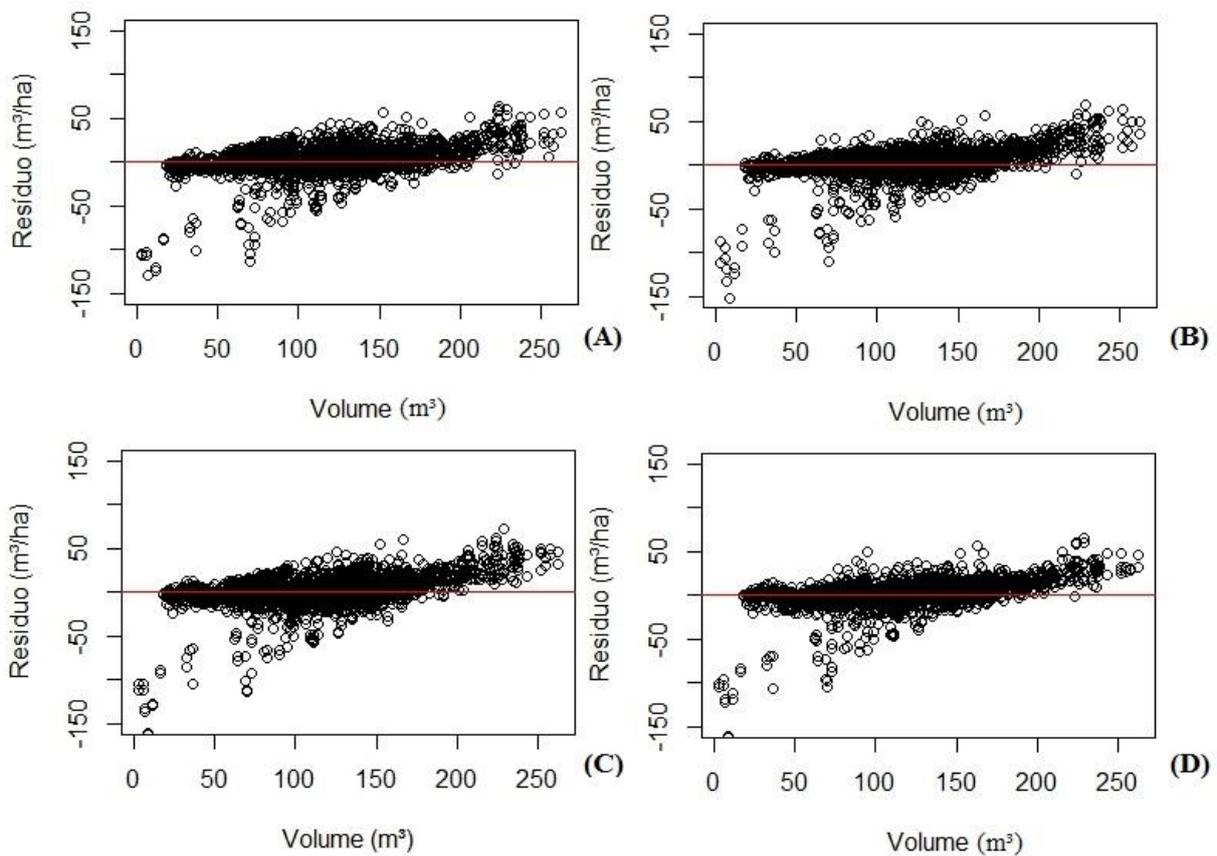
Tabela 5 – Estatísticas e coeficientes do modelo de Clutter e suas variações.

Modelos	Coeficientes						R ² ajustado	Syx (%)
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5		
A - S	3,45500	-18,90000	-1,66000	0,93130	3,15100	-0,00014	74,70	18,0
B - Hd_1	3,29055	-21,95803	0,30670	0,87765	4,60215	-0,04442	76,36	17,5
C- Hd_2	2,84247	-23,54507	0,77421	1,01283	5,24312	-0,05078	73,96	19,2
D- Hd_{fixa}	2,87679	-9,91006	-0,97544	0,95063	2,21813	0,04541	76,39	17,0

Fonte: Do Autor (2019)

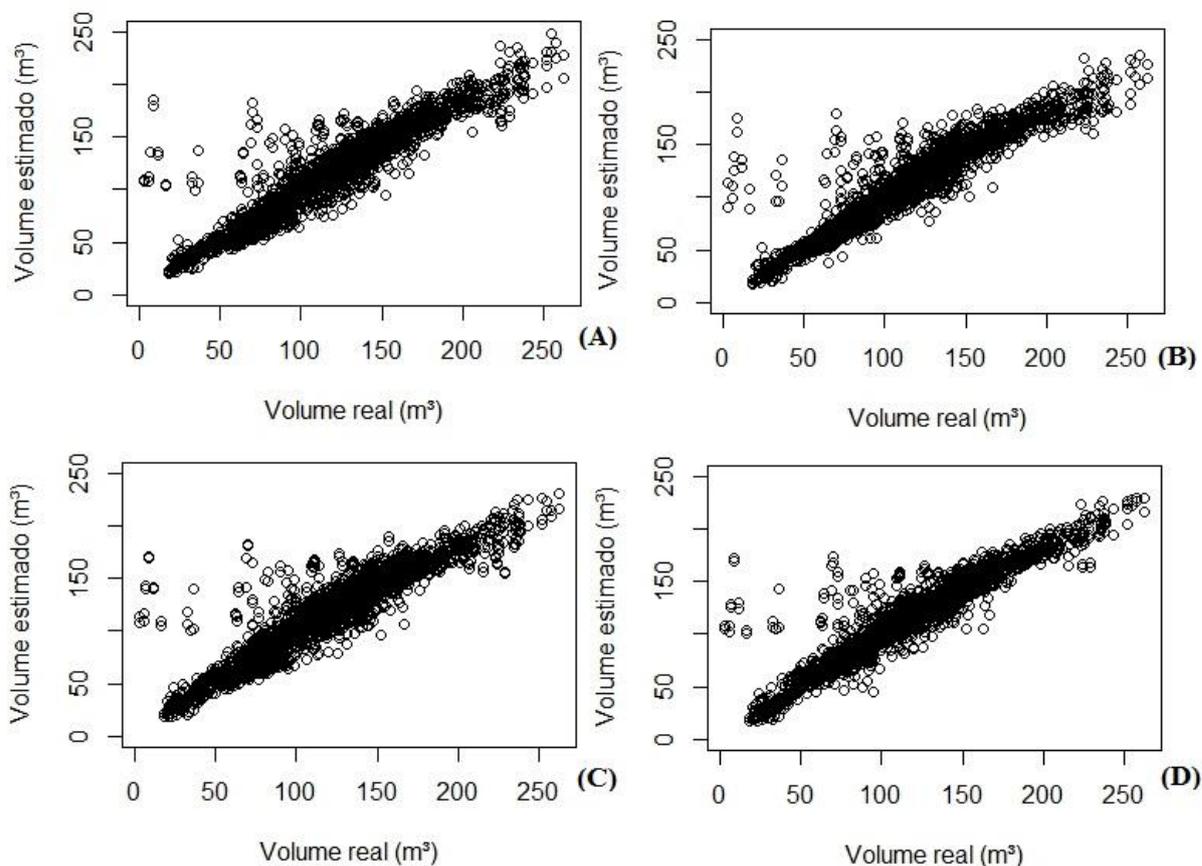
Ao analisarmos a distribuição de resíduos gerados por esses modelos (Figura 7), verificamos que todos apresentam uma pequena tendência em superestimar volumes presentes em classes menores, que vão aproximadamente de 0 a 80 m³ e subestimar volumes que estão nas maiores classes, aproximadamente de 210 a 250 m³. Contudo, pode-se assegurar que de maneira geral, os resíduos se encontram bem distribuídos ao longo do eixo para todos os modelos testados. O volume real em função do volume estimado para todos os modelos ajustados encontram-se na figura 8. Apesar de todos os gráficos apresentarem um comportamento semelhante, o D (Hd_{fixa}) é sutilmente superior na representação dos dados.

Figura 7 – Distribuição gráfica dos resíduos em termos absolutos utilizando o modelo tradicional de Clutter (A), Hd₁ (B), Hd₂ (C) e Hd_{fixa} (D).



Fonte : Do Autor (2019)

Figura 8 – Volume real x volume estimado utilizando o modelo tradicional de Clutter (A), Hd_1 (B), Hd_2 (C) e Hd_{fixa} (D).



Fonte: Do autor (2019)

4.3 Validação dos modelos gerados

A validação das equações obtidas encontra-se na Tabela 6, sendo os erros percentuais médios destoantes entre si. O modelo que utiliza a altura dominante fixada da última medição (Hd_{fixa}) obteve os menores valores (1,60%), seguido do modelo ajustado com o S (4,54%). Já as estratégias utilizando a Hd_1 e Hd_2 tiveram uma precisão consideravelmente reduzida. Percebe-se uma superioridade do método (Hd_{fixa}) para as parcelas do sítio IV, e uma aproximação relevante do método clássico (S) para as parcelas dos sítios II e III. O uso da altura dominante projetada, substituindo o uso da variável sítio, mostrou-se inviável para a estimativa de volume futuro, pois apresentou um erro elevado quando comparado aos outros métodos. Scavinsk (2014) realizou um estudo no qual concluiu que o modelo de produção em nível de povoamento de Clutter (1963) utilizando o índice de sítio, apresentou os valores

projetados comparados com os observados no inventário, com menor erro médio em porcentagem.

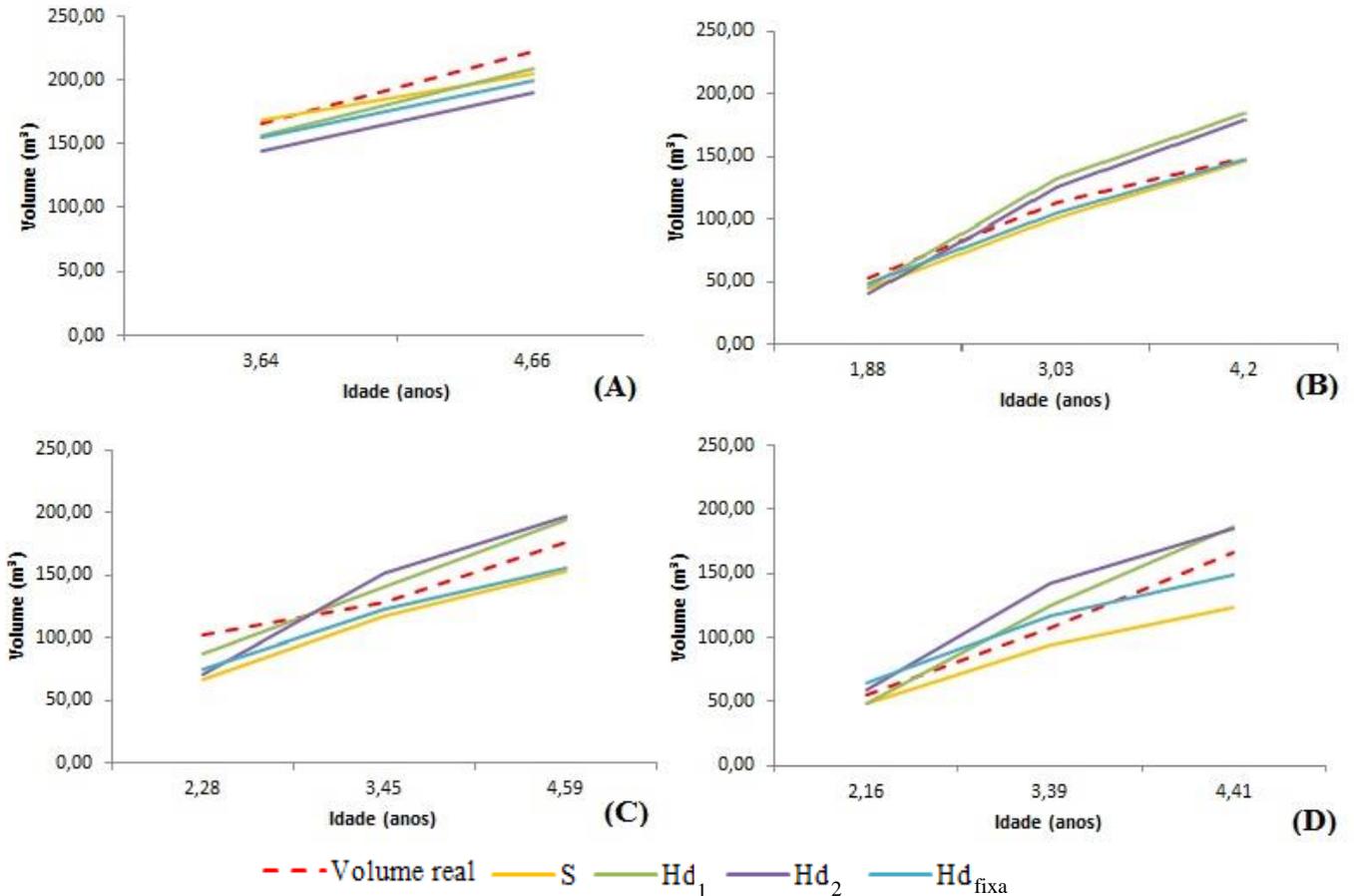
Tabela 6 – Valores médios do erro absoluto ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) e realtivo (%).

S	$(\text{m}^3.\text{ha}^{-1})$				(%)			
	Clutter	Hd ₁	Hd ₂	Hd _{fixa}	Clutter	Hd ₁	Hd ₂	Hd _{fixa}
I	8,78	12,85	28,90	19,59	3,80	6,43	14,66	9,68
II	5,37	-9,63	4,81	5,24	2,97	-7,09	-2,45	2,95
III	6,32	-15,53	17,98	1,22	2,20	-14,58	-17,28	-2,48
IV	9,54	-14,10	23,46	0,69	9,17	-12,31	-24,18	-3,73
Média geral	7,50	6,60	18,79	6,69	4,54	6,89	7,31	1,61

Onde: S = classe de sítio. Erro leva em consideração o volume real – volume estimado. Fonte: Do Autor (2019)

Nos gráficos da Figura 9 estão presentes as curvas de volume real (m^3) ao longo do tempo (idade) por classe de sítio. Também estão presentes as curvas com as estimativas volumétricas geradas pelos modelos S, Hd₁, Hd₂ e Hd_{fixa}. Os gráficos nos mostram que, independente do sítio, a curva gerada pelo modelo que utiliza a altura dominante projetada (Hd₂) a qual também se assemelha muito ao uso da altura dominante presente (Hd₁), são as que mais se distanciam da curva do volume real, sendo, portanto as variáveis menos indicadas para estimativa volumétrica. Castro et al (2016) concluiu que o sistema de equações de Clutter com a inclusão da variável índice de local (S) foi altamente preciso para a modelagem da distribuição diamétrica de povoamentos de *Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis*. Nota-se que para as parcelas do sítio I, há uma leve superioridade do método clássico de Clutter (S) em relação ao método da altura dominante fixada da última medição (Hd_{fixa}), porém para as parcelas dos sítio II, III e IV a utilização da Hd_{fixa} mostrou-se superior ao método clássico, se aproximando mais da curva de volume real em relação ao modelo S.

Figura 9 - Volume em função da idade para as parcelas do sítios I (A) , II (B), III (C) e IV (D)



Onde S = Volume estimado utilizando a variável sítio (S); Hd₁ = volume estimado utilizando a altura dominante vinda da base de dados (Hd₁); Hd₂ = volume estimado utilizando a altura dominante estimada por Schumacher (Hd₂); Hd_{fixa} = volume estimado utilizando a altura dominante do último ano de medição da parcela fixada para todas as suas idade (Hd_{fixa}). Fonte: Do Autor (2019)

Concluiu-se que o modeo de Clutter, o qual não utiliza a variável sítio (Hd fixada última medição), estima com eficiência, no geral, a produtividade florestal independente da capacidade produtiva local. Concluiu-se também que o modelo de Clutter que utilizou a variável S, estimou com pequena superioridade apenas a classe de sítio de maior produtividade, mas que não apresenta diferença significativa em relação à estimativa utilizando a Hd_{fixa}.

Soares et al. (2004) com o objetivo de especificar um modelo de crescimento e produtividade, no qual a produção volumétrica é em função da área basal por hectare e da altura média em plantios de eucalipto, aplicou o modelo de Clutter tanto em sua forma original como também modificado, adequando-o ao uso da variável altura média das árvores do povoamento. O modelo proposto apresentou-se mais preciso do que o de Clutter (1963) em idades menores do que as idades técnicas de colheita (ITC), independente da classe de produtividade

5 CONCLUSÕES

- Para classificar a capacidade de produtividade local o modelo de Schumacher apresentou resultados superiores ao modelo de Chapman & Richards;
- A substituição da variável sítio (S) pela altura dominante fixa da última medição (Hd_{fixa}) se mostrou viável para a estimativa da produção volumétrica, pois além de apresentar os menores erros de ajuste e validação, não se faz necessário realizar a classificação de produtividade local, sendo portanto um método mais rápido e simples para a estimar produção e crescimento florestal;
- O uso da altura dominante estimada por Schumacher (Hd_2), substituindo a variável sítio no modelo de Clutter, não é viável pois apresentou os maiores erros de estimativas;
- Apesar de ter apresentado um bom ajuste, a aplicação da Hd_1 para estimar a produção volumétrica não se mostrou viável.
- O modelo de Clutter pode ser substituído pelo modelo que utiliza a Hd_{fixa} , o que ressalta a necessidade de sempre estar em busca de modelos mais simples e que estimem com mais assertividade a produção volumétrica.

REFERÊNCIAS

- ALEMDAG, I. S. **National site-index and height-growth curves for white spruce growing in natural stands in Canada**. Canadian Journal of Forest Research, 21: 1466-1474. 1991.
- BERMEJO, I.; CANELLAS, I.; SAN MIGUEL, A. **Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica**. Forest ecology and management, v. 189, n. 1-3, p. 97-110, 2004.
- BUCKMAN, R. E. **Growth and yield of red pine in Minnesota**. US Dept. of Agriculture, 1962.
- BURGER, D. **Ordenamento Florestal I**. Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 152p. 1976.
- CABACINHA, C.D. **Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a cubagem rigorosa**. 2003. 116f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2003.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 3.ed. Viçosa: UFV, 2017. 548p.

CARMEAN, W. H. **Forest site quality evaluation in the United States**. In: **Advances in agronomy**. Academic Press, 1975. p. 209-269.

CASTRO, R. V. O. et al. **Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de eucalyptus em nível de distribuição diamétrica utilizando índice de local**. *Revista Árvore*, v. 40, n. 1, p. 107-116, 2016.

CLUTTER, J. L. **Compatible growth and yield models for loblolly pine**. *Forest Science*, v. 9, n. 3, p. 354–371, 1963. Society of American Foresters.

CLUTTER, J.L. et al. **Timber management: a quantitative approach**. New York, John Wiley, 1983. 333p.

CUNHA NETO, F. R. da; SCOLFORO, J. R. S.; CALEGÁRIO, N. ; OLIVEIRA, A.D.; KANEGAE JUNIOR, H. **Uso da diferença algébrica para construção de curvas de índice de sítio para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* na região de Luiz Antônio - SP**. *CERNE (UFPA)*, Lavras - MG, v. 2, n.2, p. 119-141, 1996.

CUNHA, A. B. **Modelagem do crescimento e produção de povoamentos de *Eucalyptus* por diferentes métodos de classificação de índice de local**. 2016. 42p. Dissertação (mestrado em Ciências Florestais) – Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

DE ABREU DEMOLINARI, R. et al. **Crescimento de plantios clonais de eucalipto não desbastados na região de Monte Dourado (PA)**. *Rev. Árvore*, v. 31, n. 3, 2007.

DOLPH, K. L. **Polymorphic site index curves for red fir in California and southern Oregon**. Res. Paper PSW-206. Berkeley. CA: Pacific Southwest Research Station. Forest Service, U.S. Department of Agriculture; 1991, 18 p.

FRAGA FILHO, C. V. **Modelagem para Prognose do Crescimento e Produção de Eucalipto em Diferentes níveis de Abordagem**. 2016 .280p. Dissertação (Doutorado em Concentração Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2016

GUIMARÃES, D. P. **Desenvolvimento de um modelo de distribuição diamétrica de passo invariante para prognose e projeção da estrutura de povoamentos de eucalipto**, 1994. 160 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1994.

HENAO ,I.D. **Estudio de rendimientos y rentabilidad em una plantación de teca (*Tectona grandis* L.F.) del departamento de Córdoba, Colombia**. *Crónica Forestal y del Medio Ambiente*, 2(1):1-75. 1982

JEREZ-RICO, M. et al. **Curvas de índice de sítio basadas en modelos mixtos para plantaciones de teca (*Tectona grandis* LF) en los llanos de Venezuela**. *Agrociencia*, v. 45, n. 1, p. 135-145, 2011.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES- IBÁ. **Relatório IBÁ 2019**. Ano-base 2018. São Paulo. 2019.

KEOGH, R. M. **Teak (*Tectona grandis* Linn. f.) provisional site classification chart for the Caribbean, Central America, Venezuela and Colombia**. Forest Ecology and Management, v. 4, n. 2, p. 143-153, 1982.

KÖPPEN, W. **Grundriss der klimakunde**. Berlin: W. Guyter, 1931, 390p.

LEITE, H. G. **Ajuste de um modelo de estimação de frequência e produção por classe de diâmetro, para povoamentos de *Eucalyptus saligna* Smith**, 1990. 97f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1990.

MACKINNEY, A. L.; SCHUMACHER, F. X.; CHAIKEN, L. E. **Construction of yield tables for nonnormal loblolly pine stands**. Journal of Agricultural Research, v. 54, n. 7, p. 531–545, 1937.

MAGALHÃES, J. G. DE S. **Prognose e Regulação de Florestas de eucalipto utilizando Modelo de Crescimento e Inteligência Computacional**, 2014. 66f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

MARTINS, E. F. P. et al. **Curvas de índice de sítio para leucena [*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit] no agreste de Pernambuco**. Ciência Florestal, v. 17, n. 4, p. 365-376, 2007.

MIGUEL, E. P.; IMANÃ-ENCINAS, J.; REZENDE, A. V.; FERREIRA, J. C. S.; AGUIAR, G. P. **Classificação de sítio para plantios de *Eucalyptus urophylla* em Niquelândia, Estado de Goiás**. ENCICLOPEDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer - Goiânia, vol.7, N.12; 2011.

NUNIFU, T. K.; MURCHISON, H. G. **Provisional yield models of teak (*Tectona grandis* Linn F.) plantations in northern Ghana**. Forest Ecology and management, v. 120, n. 1-3, p. 171-178, 1999.

PENTEADO, J, et. al. **Transferência de tecnologia florestal – Perguntas e respostas**. EMBRAPA. Brasília – DF. 2017. Disponível em <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/eucalipto/perguntas-e-respostas> . Acesso em 18 de outubro de 2019.

PRITCHETT, W. L. **Properties and management of forest soils**. New York: John Wiley & Sons., 1979. 500 p.

PRODAN, M. PETERS, R. COX, F. REAL, P. **Mensura Florestal**. San José, C. R: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Instituto Internacional de Cooperación para la Agricultura (IICA), 586p. 1997.

RUSSEL, W. **Site determination, classification and application**. Journal of Forestry, v. 15, n.5. 552-563p. 1917.

SAMI, J. C. **Na applied for better index site**. Journal of Forestry, v. 63. N. 3. 174- 176p. 1965. CARMEAN, W. H. Tree height-growth patterns in relation to soil and site. *In*:

Youngberg, C. T. and Davey, C. B. ed. "Tree growth and forest soil". Cavallins, Oregon State University Press. 499-512p. 1970.

SANTAROSA, E, et al. **Cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda.** EMBRAPA. Brasília-DF.2014. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/121607/1/Apostila-Serie-TT-Eucalipto.pdf>. Acesso em 17 de outubro 2019.

SALLES, T. T.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA NETO, S. N.; et al. **Modelo de Clutter na modelagem de crescimento e produção de eucalipto em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 47, n. 2, p. 253 – 260, 2012. SciELO Brasil.

SCAVINSKI, V. **Projeção da produção utilizando curvas de sítio anamórficas e polimórficas para plantios de *Eucalyptus grandis* W. Hill.** 2014. 61f. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, PR, 2014.

SCHÖNAU, A.P. **Problems in using vegetation or soil classification in determining site quality.** South African Forestry Journal, Pretoria, n.141, p.13-18, 1987.

SCHNEIDER, P. R. **Introdução ao manejo florestal.** Santa Maria: UFSM, 1993.

SCHUMACHER, F.X. **A new growth curve and its application to timber-yield studies.** Journal of forestry, Washington, (37): 819-20, 1939.

SELLE, G. L.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. **Classificação de sítio para *Pinus taeda* L., através da altura dominante, para a região de Cambará do Sul, RS, Brasil.** Ciência Florestal, Santa Maria, v.4, n.1, p. 77-95, 1994.

SILVA, F.R. et al. **Classificação da produtividade para um plantio de *Tectona grandis* em Alta Floresta, Mato Grosso Classification of productivity for a *Tectona grandis* planting in Alta Floresta, Mato Grosso.** AMBIÊNCIA, v. 12, n. 4, p. 809-823, 2016.

SCOLFORO JR (1997) **Biometria florestal: métodos para classificação de sítios florestais.** Lavras: UFLA/FAEP. 151p.

SOARES, C.P.B., LEITE, H.G., OLIVEIRA, M.L.R., CARVALHO, A., **Especificação de um modelo de crescimento e produção florestal.** Revista Árvore, v.28, n.6, p.831-837, 2004.

SPURR, S.H. **Forest Inventory.** New York, The Ronald Press Company. 1952.

SPURR, S.H, BARNES, B.V. **Forest ecology.** New York: Ronald, 1973. 571 p

TONINI, H.; COSTA, M. C. G.; SCWENGBER, L. A. M.. **Crescimento da teca (*Tectona grandis*) em reflorestamento na Amazônia Setentrional.** Pesquisa Florestal Brasileira, n. 59, p. 05, 2009.

TREVIZOL JÚNIOR, T. L. **Análise de um modelo compatível de crescimento e**

produção de *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex Maiden), 1985. 74f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1985.

VAIDES LÓPEZ, E. E. Características de sitio que determinan el crecimiento y productividad de teca (*Tectona grandis* L. f.), en plantaciones forestales de diferentes regiones en Guatemala. 2004.

VANCLAY, J. K. Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests. School of Environmental Science and Management Papers, p. 537, 1994.