

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL

LUCAS DA SILVA RIBEIRO

**MODELAGEM DO VOLUME DE MADEIRA E ESTOQUE DE CARBONO EM
PLANTAÇÕES DE SERINGUEIRA**

Chapadão do Sul – MS

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL

**MODELAGEM DO VOLUME DE MADEIRA E ESTOQUE DE CARBONO EM
PLANTAÇÕES DE SERINGUEIRA**

Trabalho de conclusão de curso submetido
à Universidade Federal de Mato Grosso do
Sul para obtenção do Grau de Bacharel em
Engenharia Florestal, sob orientação do
docente Dr. Gileno Brito de Azevedo.

Chapadão do Sul

2023



Serviço Público Federal
Ministério da Educação

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

AUTOR: **LUCAS DA SILVA RIBEIRO.**

ORIENTADOR: **Prof. Dr. Gileno Brito de Azevedo.**

Aprovado pela Banca Examinadora como parte das exigências do Componente Curricular Não Disciplinar TCC, para obtenção do grau de BACHAREL EM ENGENHARIA FLORESTAL, pelo curso de Bacharelado em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Câmpus de Chapadão do Sul.

Prof. Dr. Gileno Brito de Azevedo
Presidente da Banca Examinadora e Orientador

Profa. Dra. Glauce Tais de Oliveira Sousa Azevedo
Membro da Banca Examinadora

Eng. Florestal Me. Marcus Vinicius Vieira Borges
Membro da Banca Examinadora

Chapadão do Sul, 21 de junho de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Gileno Brito de Azevedo, Professor do Magisterio Superior**, em 21/06/2023, às 09:21, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcus Vinicius Vieira Borges, Usuário Externo**, em 21/06/2023, às 09:41, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Glauce Tais de Oliveira Sousa Azevedo, Professora do Magistério Superior**, em 21/06/2023, às 13:00, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4141554** e o código CRC **55AA3126**.

COORDENAÇÃO DE GESTÃO ACADÊMICA DO CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL

Câmpus de Chapadão do Sul - Rod MS 306, Km 105, Caixa Postal 112

Fone:

CEP 79560-000 - Chapadão do Sul - MS

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que demonstrou as oportunidades para ingressar no nível superior em uma universidade federal e a saúde que desfrutamos hoje.

A minha mãe Sueli Izaura da Silva que me apoiou nessa jornada. Meu amigo Marcelo Augusto Pereira dos Santos que indicou o curso na UFMS, me proporcionando uma nova realidade.

Aos meus orientadores Dr. Gileno de Brito Azevedo, onde me orientaram na maior parte da minha graduação e Dra. Glauce Taís de Oliveira Sousa Azevedo. A todo conhecimento adquirido e experiência compartilhada.

A todo corpo docente da UFMS CPCS e técnicos administrativos, e ao programa de bolsas PROAES - Pró Reitoria de Assistência Estudantil onde sem esses auxílios não conseguiria concluir essa graduação.

Em especial aos meus amigos que apoiaram nesses desafios Priscilla Líber, Weverth Martins, Luca Nunes, Marcus Borges, Natalia de Jesus, Lillian Moreira e aos demais... que demonstraram que para ser uma família não precisa ser do mesmo sangue.

Ao grupo GEMFLOS por todas as experiências vivenciadas e o networking que ele proporcionou.

A minha banca examinadora Dr. Gileno de Brito Azevedo; Dra. Glauce Taís de Oliveira Sousa Azevedo e Me. Marcus Vinícius Vieira Borges.

MODELAGEM DO VOLUME DE MADEIRA E ESTOQUE DE CARBONO EM PLANTAÇÕES DE SERINGUEIRA

RESUMO: A seringueira é uma espécie nativa do Brasil utilizada principalmente para a produção de látex. Além disso, há potencial na exploração da madeira e créditos de carbono a partir dos seus cultivos. No entanto, a falta de estudos de modelagem do crescimento e produção desses estoques dificulta o planejamento da exploração florestal. Este estudo teve como objetivo realizar a modelagem dos estoques futuros em volume de madeira (V_2) e carbono (C_2) em plantações de seringueira. Os dados foram provenientes de duas plantações de seringueira cultivados no município de Paraíso das Águas/MS (coordenadas 19°03'08"S e 52°58'06"N), onde foram estabelecidas 14 parcelas permanentes, mensuradas em 6 ocasiões, com idades entre 4,3 e 9,3 anos. Em cada ocasião foram obtidos no campo dados de circunferência do fuste a 1,3 m do nível do solo, altura total e altura dominante, além de estimativas do volume de madeira e carbono em cada árvore a partir dados da literatura. O banco de dados foi dividido em ajuste e validação. Foi realizada a modelagem do crescimento e produção de V_2 e C_2 a partir do modelo Clutter. A precisão das estimativas foi avaliada pela correlação entre os estoques observados e estimados, raiz quadrada do erro médio e análise gráfica dos erros. Os sistemas de equações obtidos foram utilizados para projetar os estoques de V_2 e C_2 até a idade de 30 anos, em áreas com diferentes capacidades produtiva. O modelo de Clutter mostrou ser adequado para obter estimativas precisas e consistentes de V_2 e C_2 . Os estoques projetados para a idade de 30 anos são de 113,3 a 197,4 m³ ha⁻¹ para V_2 e de 40,6 a 77,2 ton ha⁻¹ para C_2 . Assim, o modelo de Clutter consiste em uma importante ferramenta para o planejamento da exploração dos estoques em volume de madeira e carbono dos seringais.

Palavras-chave: Crescimento, *Hevea brasiliensis*, Modelo de Clutter, Modelos de povoamento total, Mudanças climáticas.

MODELING WOOD VOLUME AND CARBON STOCKS IN RUBBER TREE PLANTATIONS

ABSTRACT: The rubber tree is a native species of Brazil mainly used for latex production. In addition, there is potential for timber exploitation and carbon credits from its cultivation. However, the lack of growth and production modeling studies for these stocks hinders forest exploitation planning. This study aimed to model future stocks of wood volume (V_2) and carbon (C_2) in rubber tree plantations. The data came from two rubber tree plantations cultivated in the municipality of Paraíso das Águas/MS (coordinates 19°03'08"S and 52°58'06"N), where 14 permanent plots were established, measured on 6 occasions, with ages ranging from 4.3 to 9.3 years. In each occasion, field data were collected, including stem circumference at 1.3 m above ground level, total height, dominant height, as well as estimates of wood volume and carbon for each tree based on literature data. The database was divided into calibration and validation. Growth and production modeling of V_2 and C_2 were performed using the Clutter model. The accuracy of the estimates was evaluated by the correlation between observed and estimated stocks, root mean square error, and graphical analysis of errors. The obtained equation systems were used to project V_2 and C_2 stocks up to the age of 30 in areas with different productivity capacities. The Clutter model proved to be suitable for obtaining precise and consistent estimates of V_2 and C_2 . The projected stocks for the age of 30 range from 113.3 to 197.4 m³ ha⁻¹ for V_2 and from 40.6 to 77.2 ton ha⁻¹ for C_2 . Thus, the Clutter model represents an important tool for planning the exploitation of wood volume and carbon stocks in rubber tree plantations.

Keywords: Growth. *Hevea brasiliensis*. Clutter model. Stand-level models. Climate change.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	8
2.1 ÁREA DE ESTUDO	8
2.2 BASE DE DADOS.....	9
2.3 AJUSTE DO MODELO DO MODELO DE POVOAMENTO TOTAL	10
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
4. CONCLUSÕES	17
5. REFERÊNCIAS	17

1. INTRODUÇÃO

A *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg., popularmente conhecida como seringueira, é uma espécie florestal pertencente à família Euphorbiaceae, nativa da região amazônica, de porte elevado, atingindo até 30 metros de altura (PIZETTA et al., 2021). A seringueira atualmente é cultivada em diversas partes do mundo, com destaque ao continente asiático. Suas florestas são capazes de produzir principalmente o látex, que é a matéria-prima para fabricação da borracha natural (HAN et al., 2022). Os sistemas de produção da seringa varia desde o tradicional extrativista, até o mais tecnificado, visando aplicação de técnicas silviculturais e práticas de manejo afim de alavancar a produtividade (CAVALCANTE FILHO et al., 2019).

A extração de látex da seringueira também é uma importante atividade brasileira, principalmente para região norte, onde é realizada por comunidades locais extativistas (ALMEIDA FILHO; CARVALHO, 2022). De acordo o relatório do IBGE, a produção de borracha natural no Brasil atingiu 172 toneladas em 2020, e os estados com maior produção são Pará, São Paulo e Mato Grosso. A participação ativa do cultivo de seringueira no Brasil representa 0,2% do PIB agropecuário e menos de 0,1% do PIB total, contudo o potencial de crescimento é alto devido a alta demanda (IBGE, 2021). O látex é utilizado nos mais diversos ramos industriais como produção de pneus, calçado, luva, adesivos, isolantes termicos, dentre outros.

Apesar do látex ser o principal produto advindo da seringueira, a madeira apresenta potencial de uso diverso. Sua madeira apresenta boa qualidade, resistência e durável, adequada à finalidades diversas como construção civil, fabricação de móveis, laminação, carvão vegetal, dentre outros (FARIA; MENDES; GUIMARÃES JÚNIOR, 2020; GILIO et al., 2021; LIMA et al., 2020). Outra finalidade comercial potencial é o mercado de créditos de carbono, tendo em vista que as florestas de seringueira tem alta capacidade de sequestrar grandes quantidades de carbono (LENCI et al., 2022). Estudos ligados ao desenvolvimento volumétrico e estoque de carbono em florestas de seringueira, bem como a modelagem do comportamento destas variáveis são escassos.

Para a gestão das florestas plantadas é indispensável a modelagem florestal, que considera fatores como idade, espaçamento e condições locais, essa técnica visa

auxiliar na otimização e planejamento das florestas plantadas. Os modelos em nível de povoamento total (MPT) são capazes de gerar estimativas do crescimento da floresta, bem como a produção das mais diversas variáveis quantitativas que se deseja obter informações (BEDANE; FEYISA; WAKJIRA, 2023). Assim, a utilização de MPT em florestas de seringueira pode permitir a projeção da produção em idades avançadas, auxiliando no planejamento e condução do povoamento.

Dentre as principais relações funcionais utilizadas em MPT, o modelo de Clutter é bastante difundido, principalmente devido a baixa complexidade (AZEVEDO et al., 2016). Os modelos de crescimento e produção são ferramentas primordiais para obtenção de informações quantitativas a respeito do povoamento, de forma a auxiliar na definição de práticas de manejo e tratos silviculturais (MIRANDA; FIGUEIREDO, 2016). O modelo de Clutter é um sistema de equações que visam prever o comportamento do desenvolvimento da floresta em idades futuras, e auxiliar na tomada de decisão (VALERIANO et al., 2020).

A modelagem de MPT é bastante difundida para outras espécies florestais de cultivo comercial, bem como eucalipto e pinus (GOYCOCHEA CASAS et al., 2018; WOLFF II et al., 2019). Contudo, não há relatos da aplicação em seringueira, afim de captar o crescimento das variáveis dendrométricas. Diante do exposto, este estudo teve como objetivo realizar a modelagem dos estoques em volume de madeira e de carbono a partir do modelo de Clutter em plantações de seringueira na região de Paraíso das Águas – MS.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

Os dados utilizados neste estudo foram provenientes de duas plantações clonais de seringueira, clones RRIM 600 e RIMM 937, do Rubber Research Institute of Malaysia, cultivados no espaçamento de 7 x 2,7 m. As plantações estão localizadas em áreas adjacentes, com condições edafoclimáticas semelhantes, e situadas na Fazenda Promissão, no município de Paraíso das Águas – MS, nas coordenadas 19°03'08" S e 52°58'06" N, com uma altitude média de 600 m. Segundo a classificação de Köppen e Geiger, o clima da região é tropical do tipo Aw, com estações bem definidas, sendo uma chuvosa no verão e outra seca no inverno (ALVARES et al.,

2013). A pluviosidade média anual é de 1.549 mm e a temperatura média é de 23,6° C.

O solo local é classificado como Neossolo quartzarênico) (SANTOS et al., 2014) e apresenta as seguintes características químicas na profundidade de 0-20 cm: pH (CaCl₂) = 4,7; Al (cmolc dm⁻³) = 0,24; Ca (cmolc dm⁻³) = 0,75; Mg (cmolc dm⁻³) = 0,10; P (mg dm⁻³) = 5,6; K (mg dm⁻³) = 14; Capacidade de troca catiônica (ou CTC) (cmolc) = 2,9; Saturação por bases (%) = 30,7 (OLIVEIRA et al., 2018).

2.2 BASE DE DADOS

Em cada plantação, foram alocadas sete parcelas permanentes, com dimensões de 21,0 x 32,4 m (~ 680 m² de área cada). Cada parcela é composta pela área útil de 36 árvores (3 linhas de plantio x 12 árvores em cada linha). Essas parcelas foram medidas em seis ocasiões: 4,3; 6,3; 6,9; 7,8; 8,3 e 9,3 anos de idade. Em cada ocasião foram mensuradas a circunferência na altura de 1,3 m do nível do solo (C – em centímetros) e a altura total (H – em metros).

A circunferência foi obtida de todos os indivíduos da parcela, com auxílio de uma fita métrica. Posteriormente, essa variável foi transformada em diâmetro a altura do peito (D) a partir da divisão de C pelo valor de π . A altura foi obtida apenas para árvores da linha central e para as árvores dominantes, com auxílio de um clinômetro Haglof. A altura dominante (H_D) foi obtida conforme o conceito de Assman (1970), sendo consideradas como dominantes as sete árvores de maior C em cada parcela e em cada medição.

Para estimativa da altura total das plantas não mensuradas na parcela, foi utilizada a expressão 1, proveniente do ajuste de um modelo hipsométrico para área de estudo, a partir dos pares de D e H obtidos nas medições realizadas em ocasiões sucessivas na área.

$$\ln(H) = -0,315 + 0,365 * \ln(D) + 0,721 * \ln(H_D) \quad [r = 0,96; RMSE = 7,89] \quad (1)$$

Em que: H é altura total (m); D é o diâmetro à altura de 1,3 m do nível do solo (cm); H_D é altura dominante (m)

O volume de madeira foi estimado por meio da equação 2, proveniente do modelo padrão adotado na área florestal descrito por Schumacher e Hall (1993), ajustado por Khun et al. (2008). Devido a escassês de equações volumétricas para

seringueira no Brasil e a impossibilidade da realização de cubagem na área de estudo, neste trabalho adotou-se uma equação já ajustada e descrita na literatura, representada pela expressão 2.

$$v = 0,00018 * D^{2,2396} * H^{0,1533} \quad [r^2 = 0,92] \quad (2)$$

Em que: v é o volume de madeira com casca da árvore (m³); D é o diâmetro à altura de 1,3 m do nível do solo (cm); H é a altura total da árvore (m).

Para as variáveis biomassa e estoque de carbono, assim como o volume, não se tem equações provenientes da área, e, portanto, as estimativas foram realizadas por meio de equações e relações abordadas na literatura. A biomassa da floresta foi estimada a partir do modelo ajustado por Brahma et al. (2017), representado na expressão 3:

$$\text{Ln}(w) = - 2,84 + 0,9 * \text{Ln}(D^2 * H) \quad [r = 0,98; \text{RMSE} = 0,184] \quad (3)$$

Em que: w é a biomassa da árvore (kg); D é o diâmetro à altura de 1,3 m do nível do solo (cm); H é a altura total (m).

O estoque de carbono foi obtido por meio de uma relação direta com a biomassa conforme utilizado por Khun et al. (2008), através da expressão 4:

$$c = w * 0,475 \quad (4)$$

Em que: c é o estoque de carbono da árvore (kg); w é a biomassa da árvore (kg).

Para obter o índice de local (S) para cada parcela foi utilizada a expressão 5. Essa equação foi desenvolvida para a área de estudo a partir da classificação da capacidade produtiva pelo método do curva guia, com o ajuste do modelo de Weibull. Foi considerado a idade-índice de 30 anos, que é o ciclo de duração de exploração do látex na cultura da seringueira.

$$S = H_D + 15,834 * \exp(-0,011 * I^{1,825}) - 15,834 * \exp(-0,011 * I_i^{1,825}) \quad (5)$$

Em que: S é o índice de local; H_D é a altura dominante (m); I é a idade do povoamento (anos); I_i é a idade índice (anos)

2.3 AJUSTE DO MODELO DO MODELO DE POVOAMENTO TOTAL

Inicialmente, o conjunto de dados foi dividido de forma em dois subconjuntos: um para o ajuste dos modelos (80%) e outro para a validação dos sistemas de equações obtidos (20%).

O modelo de Clutter (1963) foi utilizado como o modelo de crescimento e produção para realizar as projeções dos estoques em uma idade futura para volume de madeira (v_2) e carbono (c_2). Esse é um dos modelos de povoamento total (MPT) mais difundidos no Brasil e é composto por um sistema de equações (expressões 6 e 7), ajustado de forma simultânea. O sistema de equações a seguir foi ajustado separadamente para as variáveis V_2 e C_2 .

$$\text{Ln}(G_2) = \text{Ln}(G_1) * (l_1 / l_2) + \alpha_0(1 - l_1 / l_2) + \alpha_1(1 - l_1 / l_2) * S + \varepsilon \quad (6)$$

$$\text{Ln}(Y_2) = \beta_0 + (\beta_1 / l_2) + \beta_2 * S + \beta_3 * \text{Ln}(G_2) + \varepsilon \quad (7)$$

Em que: G_1 é a área basal inicial (m^2/ha); G_2 é a área basal futura (m^2/ha); l_1 é a idade inicial (anos); l_2 é a idade futura (anos); Y_2 é o estoque futuro em volume de (m^3/ha) ou carbono (ton/ha); α_i e β_i são os coeficientes do modelo; S é o índice de local; ε é o resíduo.

Para realizar a validação, os sistemas de equações obtidos foram aplicados para gerar estimativas das variáveis de interesse a partir dos dados destinados a validação. A qualidade do ajuste foi avaliada com base nos seguintes critérios: 1) coerência dos sinais que acompanha os coeficientes; 2) significância do teste t para cada um dos coeficientes; 3) raiz média do erro quadrático (RMSE); 4) correlação entre os valores observados e estimados (r); 5) distribuição gráfica dos erros em porcentagem. Os erros foram obtidos pela diferença entre os valores observados e estimados. No caso da validação, foi utilizado os critérios 3, 4 e 5. As etapas de ajuste e validação foram realizadas com auxílio do software R (R CORE TEAM, 2020).

Os sistemas de equações obtidos também foram utilizados para realizar uma simulação dos estoques em volume de madeira e carbono projetados para a idade de 30 anos (final do ciclo de exploração do látex), considerando diferentes classes de produtividade. Para realizar a projeção é necessário que se tenha uma condição inicial conhecida para o povoamento. Assim, a área basal aos 4 anos (idade aproximada em que iniciou as mensurações na área) de idade foi estimada com base na expressão 8. Essa expressão foi desenvolvida para a área de estudo e estima a área basal atual em função da idade e da capacidade produtiva do local [$S = f(l, S)$].

$$\text{Ln}(G_i) = -3,276 + 1,117 * \text{Ln}(l) + 0,990 * \text{Ln}(S) \quad [r = 0,97 \text{ RMSE} = 9,73] \quad (8)$$

Em que: G_i é a área basal na idade i (m^2/ha); l é a idade do povoamento (anos); S é o índice de sítio (m).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os sistemas de equações inicialmente ajustados para a projeção dos estoques futuros em volume (v_2) e carbono (c_2) proporcionaram estimativas precisas dessas variáveis ($r > 0,992$; $RMSE > 6,49$). Os sinais associados aos coeficientes α_1 e β_1 nos modelos ajustados para ambas as variáveis também foram coerentes, sendo os valores de α_0 positivos e de β_1 negativos, conforme sugerido por Campos e Leite (2017). Porém, nem todos os coeficientes foram significativos pelo teste t, como ocorrido para o α_0 , sendo recomendado a sua eliminação ou substituição no modelo.

Portanto, o sistema de equações com as expressões 6 e 7 foi reajustado para as variáveis v_2 e c_2 , com a eliminação dos termos que acompanham o coeficiente α_0 na equação que estima a área basal. Assim, foi realizado o reajuste do modelo de Clutter com a substituição da expressão 6 pela expressão 9, descrita a seguir:

$$\ln(G_2) = \ln(G_1) * (I_1 / I_2) + \alpha_1(1 - I_1 / I_2) * S + \varepsilon \quad (9)$$

Em que: G_1 é a área basal inicial (m^2/ha); G_2 é a área basal futura (m^2/ha); I_1 é a idade inicial (anos); I_2 é a idade futura (anos); α_1 é o coeficiente do modelo; S é o índice de local; ε é o resíduo.

A exclusão de α_0 do modelo do modelo MPT para a projeção do volume de madeira em uma idade futura garantiu a significância todos os coeficientes do modelo (Tabela 1). Além disso, as estimativas apresentaram boa precisão nas etapas de ajuste e validação, com baixos valores de erros ($RMSE < 10$), alta correlação entre os valores observados e estimados ($r > 0,99$) e ausência de tendências nas estimativas (Figura 1). Esses resultados são superiores aos obtidos por Penido et al., (2020), em que ao ajustar modelos de povoamento total em eucalipto, alcançou $RMSE$ mínimo de 5,76% e correlação máxima entre observado e estimado de 0,971.

Tabela 1. Resultado do ajuste do modelo de Clutter para a projeção do volume de madeira em uma idade futura em plantações de seringueira em Paraíso das Águas/MS.

Parâmetro	Área Basal ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)	Volume ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)			
	α_1	β_0	β_1	β_2	β_3
Estimativa	0.147	1.489	-0.878	0.01	1.127
Teste t	119	11.979	-2.069	2.599	27.425
p-valor	2.00E-16	2.00E-16	0.04	0.01	2.00E-16
r	0.995	0.996			
RMSE	3.52	3.38			
Validação					
r	0.996	0.995			
RMSE	3.46	4.38			

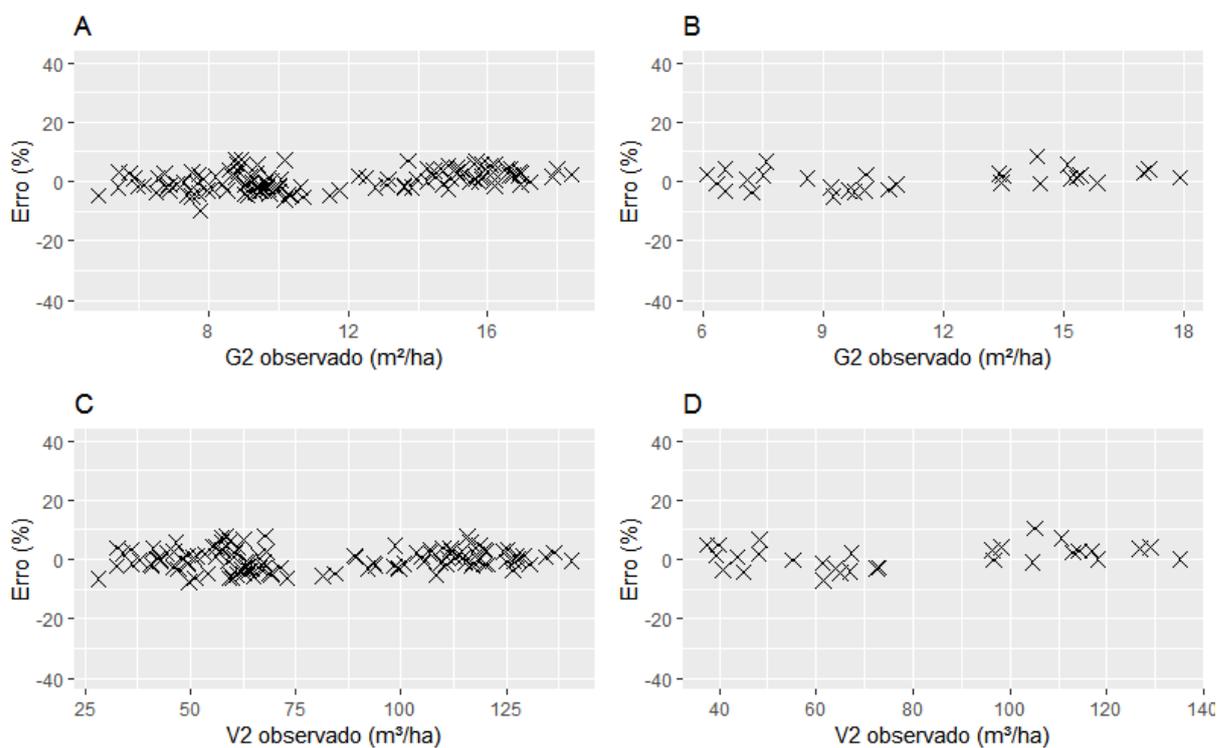


Figura 1. Distribuição dos erros das estimativas, em função dos valores observados, obtidos a partir do modelo de Clutter para projeção do volume de madeira em plantações de seringueira. A e C) etapa de ajuste; B e D) etapa de validação.

O modelo de Clutter também proporcionou boas estimativas do estoque de carbono em uma idade futura, assim como observado para o volume de madeira. Após o reajuste do modelo com a substituição da equação 6 pela 9, o efeito de todos os coeficientes foi significativo quanto ao teste t, os sinais que acompanham os coeficientes foram adequados e foram obtidas boas estatísticas de precisão dos modelos (Tabela 2). Além disso, as estimativas foram livres de tendências, com erros distribuídos em torno de zero (Figura 2), o que indica que o modelo de Clutter é adequado para a projeção do estoque de carbono em plantações de seringueira.

Tabela 2. Resultado do ajuste do modelo de Clutter para a projeção do estoque de carbono nas árvores em uma idade futura em plantações de seringueira em Paraíso das Águas/MS.

Parâmetro	Área Basal (m ² ha)	Carbono (ton ha ¹)			
	α_1	β_0	β_1	β_2	β_3
Estimativa	0.147	0.033	-3.417	0.035	1.134
Teste t	119	0.162	-4.779	5.313	16.343
p-valor	2.00E-16	0.87	5.30E-06	5.40E-07	2.00E-16
r	0.995			0.994	
RMSE	3.52			5.48	
Validação					
r	0.996			0.992	
RMSE	3.45			6.49	

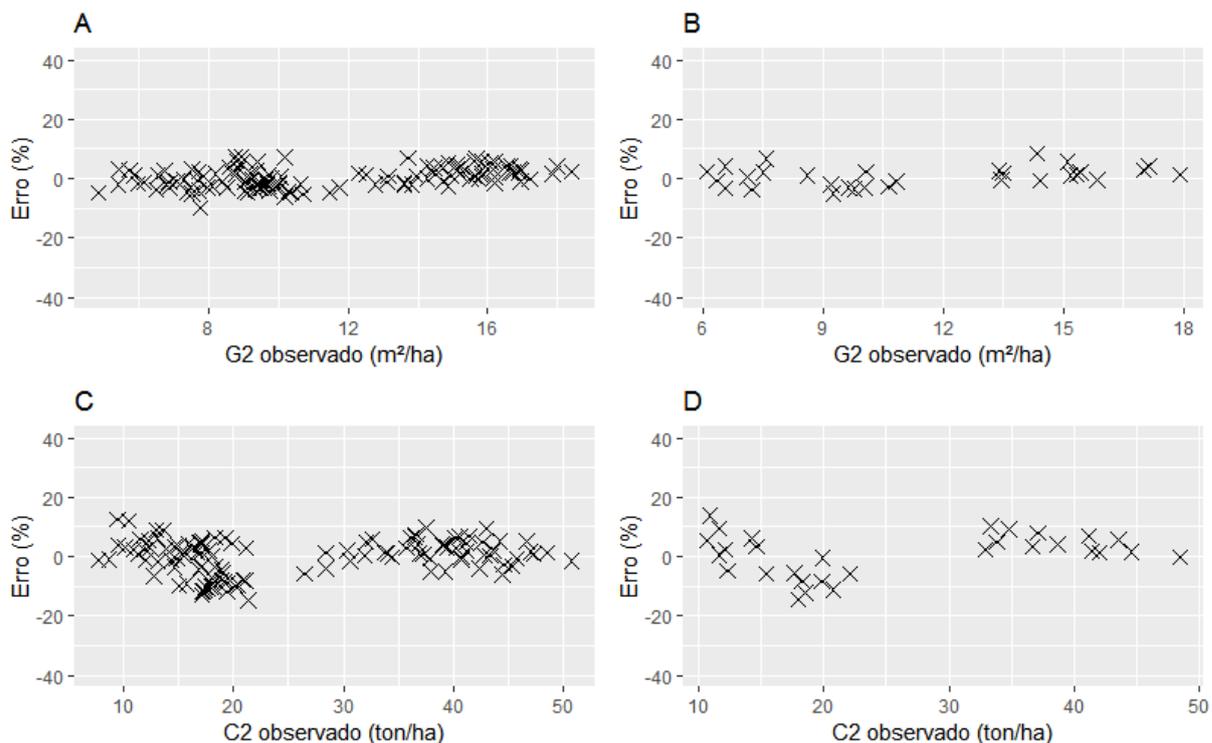


Figura 2. Distribuição dos erros das estimativas, em função dos valores observados, obtidos a partir do modelo de Clutter para projeção do estoque de carbono em plantações de seringueira. A e C) etapa de ajuste; B e D) etapa de validação.

Monteiro et al. (2021) comenta que a análise gráfica dos resíduos é indispensável para verificar o comportamento dos dados estimados. É possível verificar que nas Figuras 1 e 2 apresentadas os resíduos são pouco dispersos e sem tendência. Os valores de r e RMSE alcançados no presente trabalho podem ser considerados satisfatórios para predição, uma vez que na área de modelagem florestal valores de $RMSE < 10$ e $r > 0,90$ indica boa precisão dos modelos (FIANDINO et al., 2020; HAMIDI et al., 2021; REZAALI et al., 2021).

Assim, o modelo de Clutter mostrou ser uma alternativa eficiente para a modelagem do crescimento e produção em plantações de seringueira, com a possibilidade de realizar projeções precisas dos estoques em volume de madeira e carbono em uma idade futura. Apesar dessas variáveis envolver um objetivo secundário da heveicultura, as informações obtidas podem ser de fundamental importância na tomada de decisões relacionadas a melhor estratégia de manejo das plantações, principalmente na fase final do seu ciclo produtivo.

Entre os vários fatores que podem influenciar nos estoques futuros, destaca-se

a capacidade produtiva do local onde as plantações estão inseridas (Figura 3). Com base no modelo ajustado, projeções indicam que a produção em volume de madeira aos 30 anos é de $113,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (IMA = $3,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), $149,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (IMA = $5,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e $197,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (IMA = $6,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), respectivamente, para áreas de baixa, média e alta capacidade produtiva. Já os estoques de carbono projetados para aos 30 anos são de $40,6 \text{ ton ha}^{-1}$ (IMA = $1,4 \text{ ton ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), $56,0 \text{ ton ha}^{-1}$ (IMA = $1,9 \text{ ton ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e $77,20 \text{ ton ha}^{-1}$ (IMA = $2,6 \text{ ton ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), respectivamente, para áreas de baixa, média e alta capacidade produtiva.

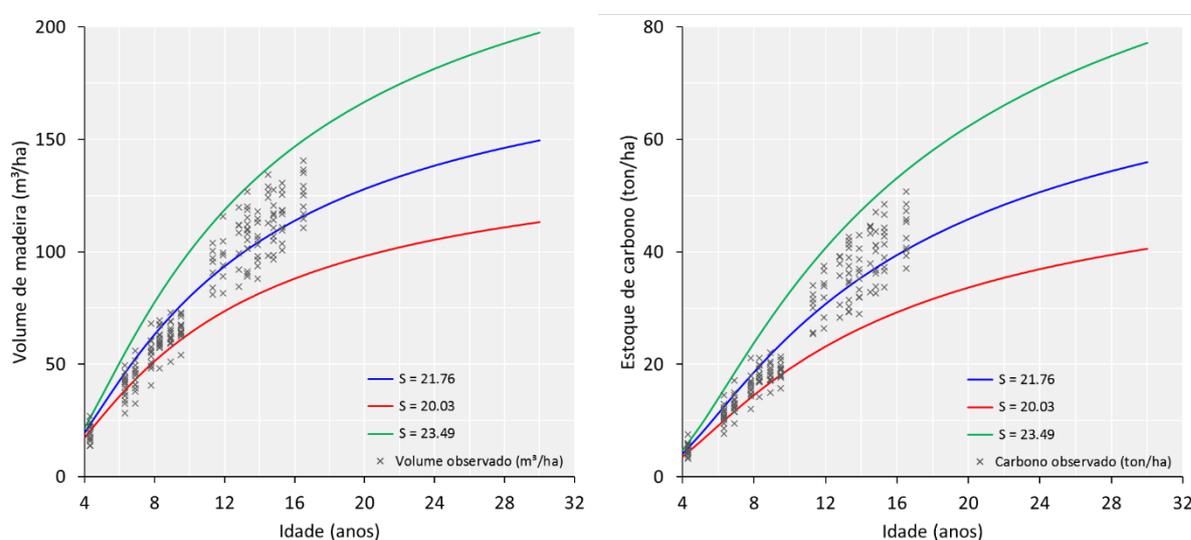


Figura 3. Projeção da produção em volume de madeira e do estoque de carbono em plantações de seringueira até os 30 anos de idade, geradas a partir do modelo Clutter.

O principal produto extraído das florestas de seringueira é o látex (borracha natural) utilizado nos mais diversos setores industriais, altamente requerido por sua produção sustentável (SURYANARAYANAN; AZEVEDO, 2023). Contudo, a madeira da árvore de seringueira ao fim do ciclo de vida da floresta pode ser destinada, por exemplo, para uso como painéis e mourões estruturais (GARCIA et al., 2021; EUFRADE JUNIOR et al., 2015). Com isso, a projeção da produção de madeira da floresta pode ser útil para o planejamento florestal e destinação do produto florestal (VESCOVI et al., 2020).

Atualmente o mercado de carbono é amplamente destacado, a fim de garantir sustentabilidade e mitigação de impactos ambientais nas principais atividades potencialmente poluidoras (JIA, 2023). Os créditos de carbono advindos de florestas

plantadas estão em alta, e a seringueira é uma espécie potencial para essa atividade (GOMES et al., 2021). Com isso, a previsão do estoque de carbono da floresta plantada é essencial para as negociações voltadas aos créditos de carbono (MAGGIOTTO et al., 2014).

O estoque de carbono em uma floresta pode estar em diferentes componentes, como em galhos e folhas, no fuste, nas raízes e potencialmente em matéria orgânica e microrganismos presente no solo (KAZEMPOUR LARSARY et al., 2021; LINDROOS; MÄKIPÄÄ; MERILÄ, 2022; PATI et al., 2022; SOUZA et al., 2023; ZHOU et al., 2013). Desta forma, o potencial sequestro de carbono na área de estudo pode ser potencialmente maior, tendo em vista que o presente trabalho apresenta o estoque de carbono e volume do fuste.

4. CONCLUSÃO

O modelo de Clutter consiste em uma ferramenta promissora para realizar a modelagem do crescimento e produção em plantações de seringueira e tem a capacidade de gerar estimativas precisas dos estoques em volume de madeira e carbono durante o período de condução da plantação.

5. REFERÊNCIAS

ALMEIDA FILHO, L. DA S.; CARVALHO, J. A. L. DE. Extrativismo de balata na Amazônia histórico e atualidade. **Muiraquitã - Revista de Letras e Humanidades**, v. 10, n. 1, 2022.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.

AZEVEDO, G. B. DE et al. Modelagem da produção em nível de povoamento e por distribuição diamétrica em plantios de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, 1 jun. 2016.

BEDANE, G. A.; FEYISA, G. L.; WAKJIRA, F. S. Modeling effects of abiotic factors on the abundances of eight woody species in the Harana forest using artificial networks, random forest, and generalized linear models. **Ecological Processes**, v. 12, n. 1, p. 10, 2 mar. 2023.

BRAHMA, B. et al. Development and evaluation of robust tree biomass equations for rubber tree (*Hevea brasiliensis*) plantations in India. **Forest Ecosystems**, v. 4, n. 1, p. 14, 24 dez. 2017.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal - Perguntas e respostas**. 5ª Edição ed. Viçosa - MG: [s.n.].

CAVALCANTE FILHO, P. G. et al. Dinâmica inovativa e investimento na reserva extrativista Chico Mendes. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 8, p. 13358–13382, 2019.

CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. **Forest Science**, v. 9, p. 354–371, 1963.

DE JESUS EUFRATE JUNIOR, H. et al. Potential of rubberwood (*Hevea brasiliensis*) for structural use after the period of latex extraction: a case study in Brazil. **Journal of Wood Science**, v. 61, n. 4, p. 384–390, 28 ago. 2015.

DE OLIVEIRA VALERIANO, M. F. et al. Are models of volumetric production at the diametric distribution and total stand level mutually compatible? **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 5, p. 1691–1698, 19 out. 2020.

ERNEST ASSMANN. **The principles of forest yield study**. Oxford: [s.n.].

FARIA, D. L.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Estudo do comportamento mecânico de madeira laminada colada de *Hevea brasiliensis* produzida com adesivo poliuretano. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 126, 30 jun. 2020.

FIANDINO, S. et al. Modeling forest site productivity using climate data and topographic imagery in *Pinus elliottii* plantations of central Argentina. **Annals of Forest Science**, v. 77, n. 4, p. 95, 7 dez. 2020.

GARCIA, H. V. S. et al. Desempenho de painéis de madeira laminada colada cruzada constituídos com eucalipto, seringueira e bambu. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 8, p. e33210817181, 13 jul. 2021.

GILIO, C. G. et al. Produção de painéis aglomerados empregando seringueira, teca e poliuretano derivado de óleo de mamona. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, n. 57, p. 86, 19 dez. 2021.

GOMES, K. M. A. G. et al. Plantios abandonados de *Hevea guianensis* Aubl. E seu potencial para créditos de carbono na Floresta Nacional do Tapajós. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 18, n. 42, 2021.

GOYCOCHEA CASAS, G. et al. Regulación de la producción forestal con pronósticos de modelación Clutter y redes neuronales artificiales en plantaciones de eucalipto del Estado de Minas Gerais – Brasil. **Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería**, v. 1, n. 1, p. 55, 18 jun. 2018.

HAMIDI, S. K. et al. Analysis of plot-level volume increment models developed from machine learning methods applied to an uneven-aged mixed forest. **Annals of Forest Science**, v. 78, n. 1, p. 4, 12 mar. 2021.

HAN, Q. et al. Development and characterization of microsatellite markers for the rubber tree powdery mildew pathogen *Oidium heveae*. **European Journal of Plant Pathology**, v. 164, n. 2, p. 253–262, 18 out. 2022.

JIA, Q. The impact of green finance on the level of decarbonization of the economies: An analysis of the United States', China's, and Russia's current agenda. **Business Strategy and the Environment**, v. 32, n. 1, p. 110–119, 13 jan. 2023.

KAZEMPOUR LARSARY, M. et al. Tree-size dimension inequality shapes aboveground carbon stock across temperate forest strata along environmental gradients. **Forest Ecology and Management**, v. 496, p. 119482, set. 2021.

KHUN, K. et al. Stem Volume Equation and Tree Growth For Rubber Trees in Cambodia. **Journal of Forest Planning**, v. 13, n. 2, p. 335–341, 2008.

LENCI, L. H. V. et al. Carbon stock of tree biomass, litter and soil in rubber based agroforestry systems. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 17, n. 3, p. 1–9, 30 set. 2022.

LIMA, I. L. DE et al. Caracterização das propriedades mecânicas da madeira de clones de *Hevea brasiliensis* (Willd. Ex Adr.). **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 125, 31 mar. 2020.

LINDROOS, A.-J.; MÄKIPÄÄ, R.; MERILÄ, P. Soil carbon stock changes over 21 years in intensively monitored boreal forest stands in Finland. **Ecological Indicators**, v. 144, p. 109551, nov. 2022.

MAGGIOTTO, S. R. et al. Potential carbon sequestration in rubber tree plantations in the northwestern region of the Paraná State, Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 36, n. 2, p. 239, 29 abr. 2014.

MIRANDA, R. O. V. DE; FIGUEIREDO, A. Ajuste do modelo de Clutter utilizando o programa Gretl. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 59, n. 4, p. 417–421, 2016.

MONTEIRO, B. C. et al. Uso de modelos mistos para estimativa do volume de árvores individuais em tipologias florestais no Estado do Amapá. **BIOTA AMAZÔNIA**, v. 11, p. 1–4, 2021.

OLIVEIRA, V. H. S. DE et al. Initial development and sample dimensioning of rubber tree clones. **Bioscience Journal**, p. 1225–1231, 2018.

PATI, P. K. et al. Allometric equations for biomass and carbon stock estimation of small diameter woody species from tropical dry deciduous forests: Support to REDD+. **Trees, Forests and People**, v. 9, p. 100289, set. 2022.

PENIDO, T. M. A. et al. Modelos de crescimento e produção para a estimativa volumétrica em povoamentos comerciais de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, 1 dez. 2020.

PIZETTA, M. et al. Fusariosis in rubber tree: pathogenic, morphological, and molecular characterization of the causal agent. **European Journal of Plant Pathology**, v. 161, n. 4, p. 769–782, 23 dez. 2021.

REZAALI, M. et al. A wavelet-based random forest approach for indoor BTEX spatiotemporal modeling and health risk assessment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 18, p. 22522–22535, 9 maio 2021.

SANTOS, H. G. DOS. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. [s.l.: s.n.].

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. D. S. LOGARITHMIC EXPRESSION OF TIMBER-TREE VOLUME. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 9, 1993.

SOUZA, C. R. et al. Carbon stock and uptake in the high-elevation tropical montane forests of the threatened Atlantic Forest hotspot: Ecosystem function and effects of elevation variation. **Science of The Total Environment**, v. 882, p. 163503, jul. 2023.

SURYANARAYANAN, T. S.; AZEVEDO, J. L. From forest to plantation: a brief history of the rubber tree. **Indian Journal of History of Science**, v. 58, n. 1, p. 74–78, 6 mar. 2023.

VESCOVI, L. B. et al. Effect of growth and yield modelling on forest regulation and earnings. **African Journal of Agricultural Research**, v. 16, n. 7, p. 1050–1060, 31 jul. 2020.

WOLFF II, N. I. et al. MODELAGEM DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO EMPREGANDO ANATRO EM *Pinus taeda* L. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 4, n. 1, p. 52, 11 jan. 2019.

ZHOU, Z. et al. Predicting soil respiration using carbon stock in roots, litter and soil organic matter in forests of Loess Plateau in China. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 57, p. 135–143, fev. 2013.