

EQUAÇÕES VOLUMÉTRICAS PARA UM PLANO DE MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL NO ACRE

Francisco Costa Júnior¹, Thelma Shirlen Soares², Edmilson Santos Cruz³

RESUMO:

Equações volumétricas específicas por área de manejo são legalmente exigidas nos Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) na Amazônia, superando o fator de forma convencionalmente adotado. Este estudo objetivou ajustar modelos de simples e dupla entrada para estimar o volume individual de árvores comerciais em uma Unidade de Produção Anual em Bujari, Acre. Analisaram-se 1.722 árvores de 44 espécies. Doze modelos foram avaliados quanto a observações influentes (resíduos padronizados, matriz H, DFFITS e distância de Cook) e selecionados com base no erro padrão, coeficiente de determinação ajustado, resíduos e somas de quadrados. A melhor equação de simples entrada foi gerada pelo ajuste do modelo de Hohenadl e Krenm ($V = -0,971631 + 0,0334686 \cdot DAP + 0,000310589 \cdot DAP^2$) e a de dupla entrada, gerada pelo ajuste do modelo de Spurr ($V = 0,446744 + 0,0000277045 \cdot DAP^2 \cdot HC$), sendo que a equação de dupla entrada produziu resultados superiores à de simples entrada.

Palavras-chave: Floresta Amazônica, modelos volumétricos, observações influentes.

VOLUMETRIC EQUATIONS FOR A SUSTAINABLE FOREST MANAGEMENT PLAN IN ACRE

ABSTRACT:

Volumetric equations specific to each management area are legally required in Sustainable Forest Management Plans (SFMPs) in the Amazon, replacing the traditionally used form factor. This study aimed to fit single- and double-entry models to estimate the individual volume of commercial trees in an Annual Production Unit in Bujari, Acre. A total of 1,722 trees from 44 species were analyzed. Twelve models were evaluated for influential observations (standardized residuals, hat matrix leverage, DFFITS, and Cook's distance) and selected based on standard error, adjusted coefficient of determination, residual analysis, and sums of squares. The best-fitting single-entry equation was obtained using the Hohenadl and Krenn model ($V = -0.971631 + 0.0334686 \cdot DBH + 0.000310589 \cdot DBH^2$), while the best-performing double-entry equation was derived from the Spurr model ($V = 0.446744 + 0.0000277045 \cdot DBH^2 \cdot Hc$), which showed superior performance compared to the single-entry model.

Keywords: Amazon Forest, volumetric models, influential observations.

¹Engenheiro Florestal, curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Jataí – UFJ, Jataí-GO, jr.florestal@live.com, <https://orcid.org/0000-0002-7503-3697> ²Professora do curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Jataí – UFJ, Jataí-GO, thelmasoares@ufj.edu.br, <https://orcid.org/0000-0003-1532-5038> ³Professor do curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Jataí – UFJ, Jataí-GO, edmilson_santos_cruz@ufj.edu.br, <https://orcid.org/0000-0002-7503-3697>

A floresta Amazônica é a maior floresta tropical do mundo, possuindo vários rios e diversas espécies da fauna e da flora e abrigando uma das maiores biodiversidades do planeta em uma área de aproximadamente 6,7 milhões de km² (Leal Filho et al., 2025), o que torna este bioma um dos maiores prestadores de serviços ecossistêmicos. Estes serviços vão desde a oferta de produtos oriundos da floresta (madeira, frutos, látex, ervas etc.) até o controle de ciclos biológicos (nutrientes, estabilidade climática, água etc.) (Castro e Andrade, 2016). A madeira é um dos principais recursos oferecidos pela floresta e, segundo Higuchi et al. (2007), o volume de madeira disponível na floresta amazônica é grande o suficiente para abastecer o mercado internacional por mais um século.

Ainda que a floresta amazônica apresente uma variada gama de recursos aproveitáveis, a forte heterogeneidade espacial do estoque de espécies comerciais resulta em maior dificuldade de aproveitamento e em potenciais situações de subaproveitamento ou desvalorização desses recursos (Cysneiros et al., 2017; Oliveira et al., 2024). Dessa maneira, o manejo florestal sustentável, enquanto instrumento de administração permanente de áreas florestais, dependerá de projeções baseadas em inventários com delineamentos e estimadores estatisticamente eficientes, capazes de representar a elevada heterogeneidade da floresta amazônica (Reategui-Betancourt et al., 2023).

A madeira explorada em florestas naturais na Amazônia é legalmente obtida por dois meios: Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) ou autorização de desmatamento e, neste sentido, ferramentas que possibilitem estimativas precisas do volume comercial das espécies amazônicas são cruciais diante da necessidade de quantificação do estoque de matéria prima florestal e da busca pela máxima rentabilidade e produção da floresta (Thaines et al., 2010). Nesse sentido, a determinação precisa do volume das árvores individuais é fundamental para o cumprimento das exigências legais do manejo florestal, sendo as equações volumétricas indispensáveis ao planejamento e à execução de Planos de Manejo Florestal Sustentável, pois a legislação demanda modelos específicos por área manejada e qualquer imprecisão na estimativa do estoque volumétrico compromete o planejamento e a viabilidade econômica da exploração madeireira na Amazônia (Silva et al., 2022).

O ajuste de modelos volumétricos realizado exclusivamente para as áreas de cada plano de manejo florestal resulta em um procedimento mais eficiente, econômico e preciso para a determinação do volume de uma floresta, uma vez que a legislação brasileira exige equações desenvolvidas especificamente para a área do PMFS e equações ajustadas por espécie/área reduzem erros e aumentam a precisão das estimativas de volume (Silva et al., 2022; Abreu et al., 2023). Este fato evidencia a razão das estimativas por meio de equações de volume tornarem-se obrigatórias e previstas na legislação desde 2002.

A Instrução Normativa nº 5, de 2006, do Ministério do Meio Ambiente, estabelece os procedimentos técnicos para a elaboração e a execução de Planos de Manejo Florestal Sustentável, prevendo a expedição da Autorização de Exploração (AUTEX) baseada em um volume máximo por espécie (Brasil, 2006). Desse modo, quanto maior a precisão dos dados oriundos da floresta, mais embasadas serão as ofertas por parte dos concessionários e a emissão da AUTEX pelo órgão ambiental.

No entanto, segundo Tonini e Borges (2015) e Biazatti et al. (2020), os técnicos da região ainda aceitam e utilizam o fator de forma 0,7 para estimativa do volume da árvore individual e, sendo este tipo de cálculo menos preciso, pode subestimar ou superestimar o volume real quando comparado com os resultados gerados a partir de modelos volumétricos desenvolvidos localmente.

Apesar da necessidade do ajuste e geração de equações volumétricas, os estudos relacionados ao tema ainda são poucos diante da imensidão da floresta amazônica, sendo necessário abranger uma maior quantidade de espécies, regiões e tipologias florestais, uma vez que há escassez de equações alométricas para importantes sub-regiões da Amazônia e forte dependência dos modelos em relação às condições locais de sítio e composição florística (Romero et al., 2020; Leão et al., 2021).

Com base no exposto, este estudo teve como objetivo ajustar equações volumétricas de simples e de dupla entrada e selecionar equações para estimativa do volume de árvores individuais em uma floresta localizada no município de Bujari, no estado do Acre.

A área de estudo foi uma Unidade de Produção Anual (UPA) de 1560,9080 ha da Área de Manejo Florestal (AMF) localizada no município de Bujari, AC, com coordenadas de 9°49'22" Sul e

67°56'51" Oeste, cujo acesso é realizado pelo km 82 da BR-364.

A região apresenta um clima quente e úmido, com duas estações bem definidas: (a) estação chuvosa, conhecida como o inverno amazônico, com duração aproximada de seis meses; (b) estação seca, que comumente apresenta fenômenos efêmeros como a friagem, resultante do avanço de frentes polares (Acre, 2021).

A vegetação dominante do município de Bujari, onde se encontra a área de estudo, é a floresta aberta com palmeiras e floresta densa. A precipitação anual é superior a 2.000 mm, com um período seco com precipitação mensal inferior a 60 mm de chuva. A temperatura média anual varia de 24,6°C a 25,0°C. Os solos dominantes que ocorrem na área de abrangência do município pertencem às classes dos Argissolos, Alissolos, Neossolos e Gleissolos (Sema, 2019).

O levantamento dos dados para realização deste estudo consistiu na obtenção das informações provenientes do próprio PMFS, especificamente de um Unidade de Produção Anual (UPA 5).

Desta forma, a aquisição dos dados ocorreu em dois momentos distintos: (a) obtenção dos dados do inventário censitário, realizado na fase pré-exploratória como uma etapa essencial para elaboração do PMFS; (b) obtenção dos dados da cubagem (romaneio), que ocorre após a exploração florestal como uma etapa essencial para elaboração do relatório pós-exploratório. Do inventário censitário, que corresponde ao levantamento de todas as árvores comerciais com diâmetro a altura do peito (DAP) medido a 1,30 m do solo maior ou igual a 30 cm, foram utilizadas as seguintes informações diretamente do PMFS e do Plano Operacional Anual (POA): a) Identificação dendrológica das árvores inventariadas, cujos nomes científicos e famílias ocorreram por meio de consultas às listas comumente utilizadas em PMFSs no Acre, publicadas pela Embrapa Acre (Araújo e Silva, 2000); b) Circunferência à altura do peito (CAP), medida a 1,30 m do solo; c) Altura comercial (HC); d) Classificação das árvores nas seguintes categorias: corte futuro, localizada em área de preservação permanente (APP), porta sementes, proibidas de corte (legislação), raras, remanescentes, não comerciais, exploráveis; e) ainda de acordo com o PMFS e POA, as árvores da categoria explorável ainda foram divididas em situações, ou seja: colhida, muito grossa, oca, pouco

aproveitamento, próxima a uma seringueira, seca, torta.

Devido a extensão e variabilidade dos dados, uma etapa de análise pré-exploratória e de pré-processamento foi necessária, onde foram identificadas observações discrepantes, sobretudo erros não amostrais, como erros de medição. Gimenez et al. (2015) afirmam que a superestimação de poucos metros nos valores de altura comercial pode representar um aumento considerável nas estimativas de volume de madeira da floresta.

Diante disso, todos os dados com altura comercial estimada menor que o comprimento final das toras cubadas produzidas pelas árvores e, ainda, todas as árvores com volume cubado maior que o volume estimado pelo fator de forma foram filtrados, a fim de se obter um ajuste volumétrico com mais acuracidade, entre outras fontes de erros detectadas.

No inventário censitário, o volume das árvores em pé para a elaboração do PMFS foi obtido por meio do fator de forma igual a 0,7, utilizado para todas as espécies dos PMFS do Acre e outros estados da Amazônia.

Após a exploração florestal (derrubada e extração), foram obtidos os dados do romaneio, isto é, a cubagem das árvores nos pátios de estocagem localizados na floresta. A cubagem das toras foi realizada conforme rotina da equipe da empresa que executou a exploração florestal, cujos procedimentos consistiram em realizar, antes da derrubada: a) confirmação da identificação dendrológica da espécie com base no inventário florestal censitário; b) conferição e a anotação dos dados da plaqueta de identificação da árvore no formulário de campo do romaneio.

Foram obtidas as seguintes variáveis das toras: a) Posição da tora na árvore, marcadas com as letras do alfabeto no sentido base-ápice; b) Medição de dois diâmetros ortogonais, em centímetros, em cada uma das extremidades da tora; c) Medição do comprimento da tora. Com as variáveis obtidas do romaneio, o somatório do volume de toras por árvore da categoria 'Explorável' e situação 'Colhida', descritas anteriormente, correspondeu ao volume observado, que foi a variável dependente de todos os modelos de regressão deste estudo (volume de toras com casca). E o volume de cada tora foi obtido de acordo com a fórmula de Smalian.

A obtenção do volume observado neste estudo foi exatamente de acordo com a Resolução nº 406, de 2 de fevereiro de 2009, na qual está estabelecido que

o volume observado, a variável dependente dos modelos volumétricos, deve ser o volume advindo do romaneio das árvores exploradas no Plano Operacional Anual (POA) do primeiro ano, assim como as variáveis independentes devem ser o DAP e a HC das respectivas árvores, cujas medidas advêm do inventário censitário do mesmo POA.

Com o volume cubado (variável dependente), o DAP e a HC, que são as variáveis independentes, foram ajustados os modelos volumétricos lineares de

simples e de dupla entrada, os quais foram selecionados com base nos estudos mais recentes sobre o assunto em questão.

Nos modelos volumétricos de simples entrada (Tabela 1), a variável dependente (volume) está associada a uma única variável independente (DAP). Já nos modelos volumétricos de dupla entrada (Tabela 2), a variável dependente (volume) está associada a duas variáveis independentes, isto é, DAP e HC.

Tabela 1. Modelos volumétricos lineares convencionais de simples entrada.

Autor	Modelo Matemático
Berkhout	$v = \beta_0 + \beta_1.d + \varepsilon$
Kopecky e Gehrhardt	$v = \beta_0 + \beta_1.d^2 + \varepsilon$
Hohenadl e Krenm	$v = \beta_0 + \beta_1.d + \beta_2.d^2 + \varepsilon$
Husch	$\ln v = \beta_0 + \beta_1.\ln d + \varepsilon$
Brenac	$\ln v = \beta_0 + \beta_1.\ln d + \beta_2.1/d + \varepsilon$

Em que: v = volume (m³); d = diâmetro a 1,3 m do solo; β_{is} = parâmetros do modelo de regressão; ln = logaritmo neperiano; ε = erro de estimativa.

Tabela 2. Modelos volumétricos lineares convencionais de dupla entrada.

Autor	Modelo Matemático
Spurr	$v = \beta_0 + \beta_1.(d^2.h) + \varepsilon$
Spurr Logarítmica	$\ln v = \beta_0 + \beta_1.\ln(d^2.h) + \varepsilon$
Schumacher-Hall	$\ln v = \beta_0 + \beta_1.\ln d + \beta_2.\ln h + \varepsilon$
Stoate	$v = \beta_0 + \beta_1.d^2 + \beta_2.(d^2.h) + \beta_3.h + \varepsilon$
Meyer	$v = \beta_0 + \beta_1.d + \beta_2.d^2 + \beta_3.(d.h) + \beta_4.(d^2.h) + \beta_5.h + \varepsilon$
Meyer Modificada	$v = \beta_0 + \beta_1.d + \beta_2.d^2 + \beta_3.(d.h) + \beta_4.(d^2.h) + \varepsilon$
Näslund	$v = \beta_0 + \beta_1.d^2 + \beta_2.(d^2.h) + \beta_3.(d.h^2) + \beta_4.h^2 + \varepsilon$

Em que: v = volume (m³); d = diâmetro a 1,3 m do solo; β_{is} = parâmetros do modelo de regressão; h = altura comercial (m); ln = logaritmo neperiano; ε = erro de estimativa.

A seleção da equação com maior acurácia foi feita por meio da análise dos seguintes parâmetros estatísticos: erro padrão da estimativa, coeficiente de determinação ajustado, distribuição gráfica dos resíduos percentuais, soma de quadrados de predição e soma dos resíduos.

O erro sistemático dos modelos logarítmicos foi corrigido por meio do fator de Meyer, assegurando a acurácia das estimativas na unidade original.

A identificação de observações influentes foi pautada na premissa de que tais pontos exercem impacto desproporcional nos parâmetros estimados, podendo representar elementos não condizentes com a população amostrada (Hair Jr. et al., 2018; Scolforo et al., 2025). Para o diagnóstico e avaliação dessas observações, foram empregados quatro critérios

estatísticos: resíduos padronizados, elementos da diagonal principal da matriz H, estatística DFFITS e a distância de Cook. Seguindo as recomendações de Scolforo et al. (2025), adotou-se um critério de exclusão, sendo removidas do banco de dados apenas as observações identificadas como influentes de forma simultânea em, no mínimo, três dos métodos avaliados, assegurando assim a representatividade e a robustez do ajuste final.

O inventário florestal censitário da UPA estudada identificou 20.501 árvores, as quais são apresentadas na Figura 1. A categoria 'Explorável', onde se encontram as árvores alvo deste estudo, apresentou 3.892 árvores, distribuídas em 43 espécies.

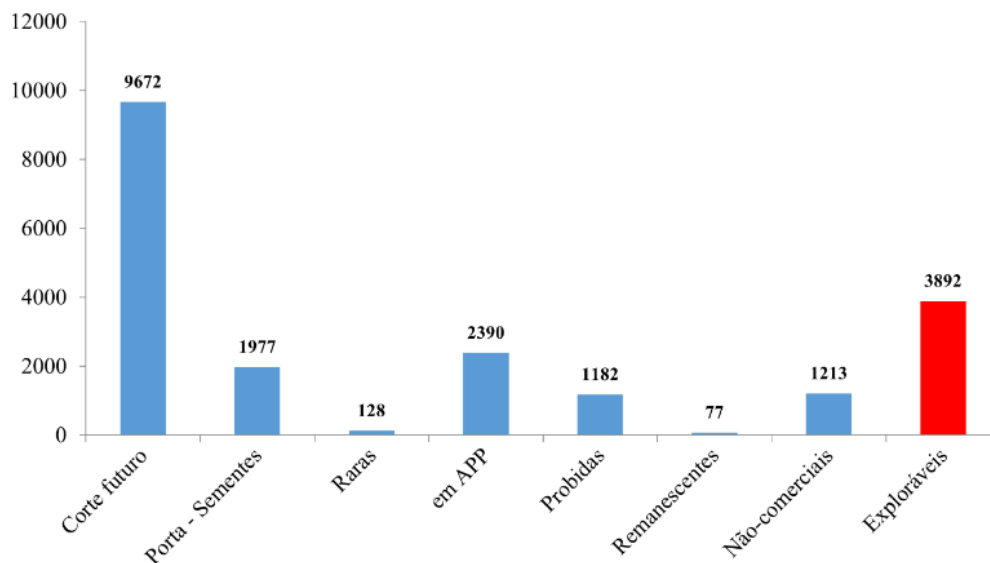


Figura 1. Distribuição das árvores em classes pelas categorias do inventário florestal censitário de um PMFS em Bujari, Acre.

As árvores da categoria ‘Explorável’ foram reclassificadas por situação (Figura 2). Desta forma, das 3.892 árvores exploráveis (Figura 1), foram

colhidas 2.872 (Figura 2). Estas árvores colhidas constituíram o banco de dados base para a realização deste estudo.

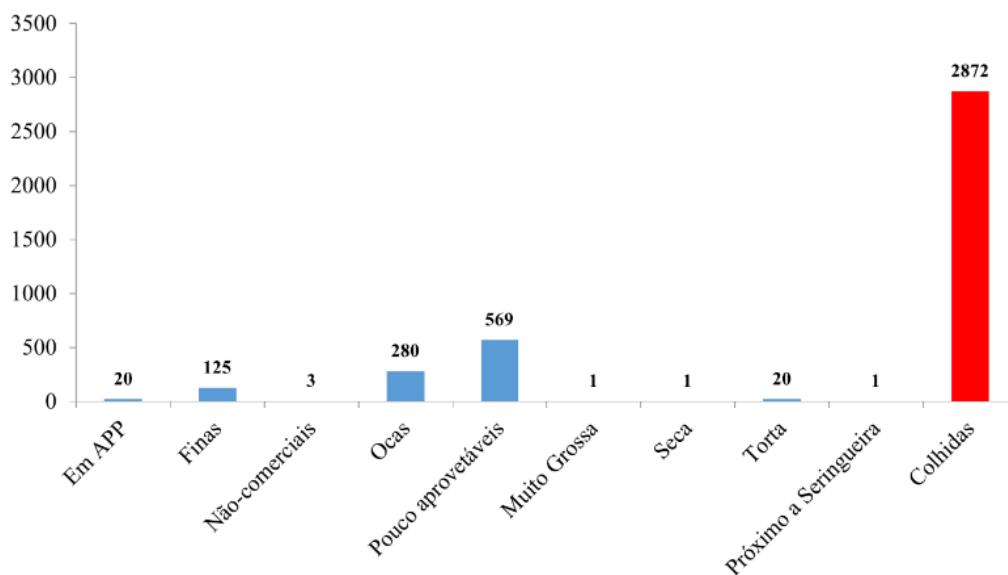


Figura 2. Distribuição das árvores em classes de situações das árvores exploráveis na UPA 5, no município de Bujari, Acre.

Todas as observações que foram indicadas como influentes por pelo menos três das estatísticas utilizadas foram excluídas. Foi observado que, após a remoção das observações influentes, houve uma

manutenção das medidas de tendência central e de variabilidade, ocorrendo pouca variação no banco de dados, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Estatísticas descritivas da população de árvores colhidas, com observações influentes e após refinamento, para ajuste de modelos volumétricos de simples e de dupla entrada para um PMFS em Bujari, Acre.

Estatísticas	μ	σ	σ^2	CV%	λ	N	r		
							d x v	d x h	h x v
Antes	4,20	1,88	7,74	44,85	28,85	1722	0,680	0,067	0,326
Após (Simples)	3,93	1,54	4,21	39,18	21,73	1629	0,684	0,018	0,312
Após (Dupla)	3,88	1,49	3,78	38,48	14,10	1610	0,664	0,003	0,343

Em que: μ = média dos volumes reais em m^3 ; σ = desvio padrão; σ^2 = variância; CV% = coeficiente de variação; λ = amplitude do volume real em m^3 ; N = número de árvores cubadas; r = coeficiente de correlação de Pearson; d = diâmetro à altura do peito; h = altura comercial; v = volume real.

As correlações entre as variáveis dependentes e independentes (Tabela 3) apresentaram valores baixos devido à variada composição em espécie e idade do bioma Amazônia, existindo, em alguns casos, correlação muito baixa ou nenhuma entre diâmetro e altura comercial (Scolforo e al, 2025). Gimenez et al. (2015) corroboram com esta afirmação e ainda indicam ainda que a baixa correlação das variáveis diâmetro e altura não implicam em um problema de multicolinearidade, o que favorece os modelos de dupla entrada.

As medidas de precisão das equações de simples entrada estão apresentadas na Tabela 4, as quais foram obtidas a partir do banco de dados sem a presença das observações influentes que foram avaliadas e removidas do banco de dados. As equações apresentaram coeficientes de determinação ajustado variando de 38,23% a 47,61%; erro padrão da estimativa de 1,45662 m^3 a 1,61641 m^3 , ou de 10,41% a 37,81%; soma de resíduos de 0,0014 m^3 a 593,7801 m^3 e soma de quadrados da predição de 3.429,76 a 4576,94.

Tabela 4. Medidas de precisão para as equações volumétricas de simples entrada obtidas para um PMFS em Bujari, Acre.

Equações	R ² aj. (%)	S _{yx} (m ³)	S _{yx} (%)	Soma res.	PRESSp	N	p
Berkhout	44,28	1,46	37,40	0,002	3435,1	1621	1
Kopecky-Gehrhardt	46,65	1,46	37,32	-0,002	3429,8	1617	1
Hohenadl e Krenm	47,61	1,49	37,81	0,001	3590,4	1629	2
Husch	38,23	1,54	39,00	-57,559	4007,6	1643	1
Brenac	38,64	1,62	40,58	46,584	4576,9	1659	2

Em que: R²aj. = Coeficiente de determinação ajustado, em %; S_{yx} = erro padrão da estimativa, em m^3 e em %; Soma res. = soma de resíduos, em m^3 ; PRESSp = soma de quadrados de predição; N = número de amostras; p = número de parâmetros.

A análise gráfica revelou fortes tendências de superestimativas (Figura 3), demonstrando elevada variabilidade e heterogeneidade do banco de dados. Nota-se que entre 50 cm e 100 cm, onde a maior parte das árvores está concentrada, esta tendência foi mais acentuada, com resíduos próximos a -350%. Estes

resultados também foram encontrados no ajuste de modelos volumétricos por Cysneiros et al. (2017) e Santos et al. (2020), os quais disponham de um amplo banco de dados oriundos de romaneio em PMFSs na Amazônia, situação similar à do presente estudo.

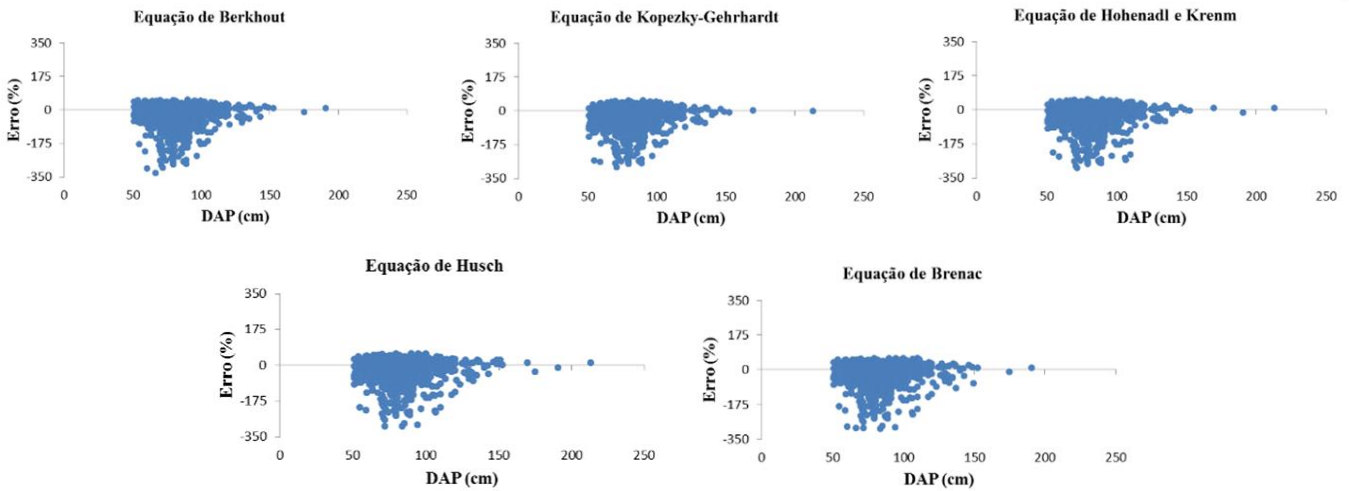


Figura 3. Distribuição gráfica dos resíduos percentuais para as equações volumétricas de simples entrada para um PMFS em Bujari, Acre.

As equações que forneceram resultados inferiores foram aquelas advindas dos modelos com variável dependente na forma logarítmica (Husch e Brenac). E as equações que mais se destacaram foram as que resultaram do ajuste dos modelos de Kopecky-Gehrhardt, de Hohenadl-Krenm e de Berkhout, que exibiram os menores valores de erro padrão da estimativa e de PRESSp e maiores valores de

coeficiente de determinação ajustado, além de apresentarem soma de resíduos muito baixas.

Então, as equações de Kopecky-Gehrhardt, de Hohenadl-Krenm e Berkhout apresentaram resultados muito similares quanto às medidas de precisão, além da distribuição gráfica dos resíduos ter sido muito semelhante, não só para estas três, mas para todas as equações, conforme pôde ser observado na Figura 4.

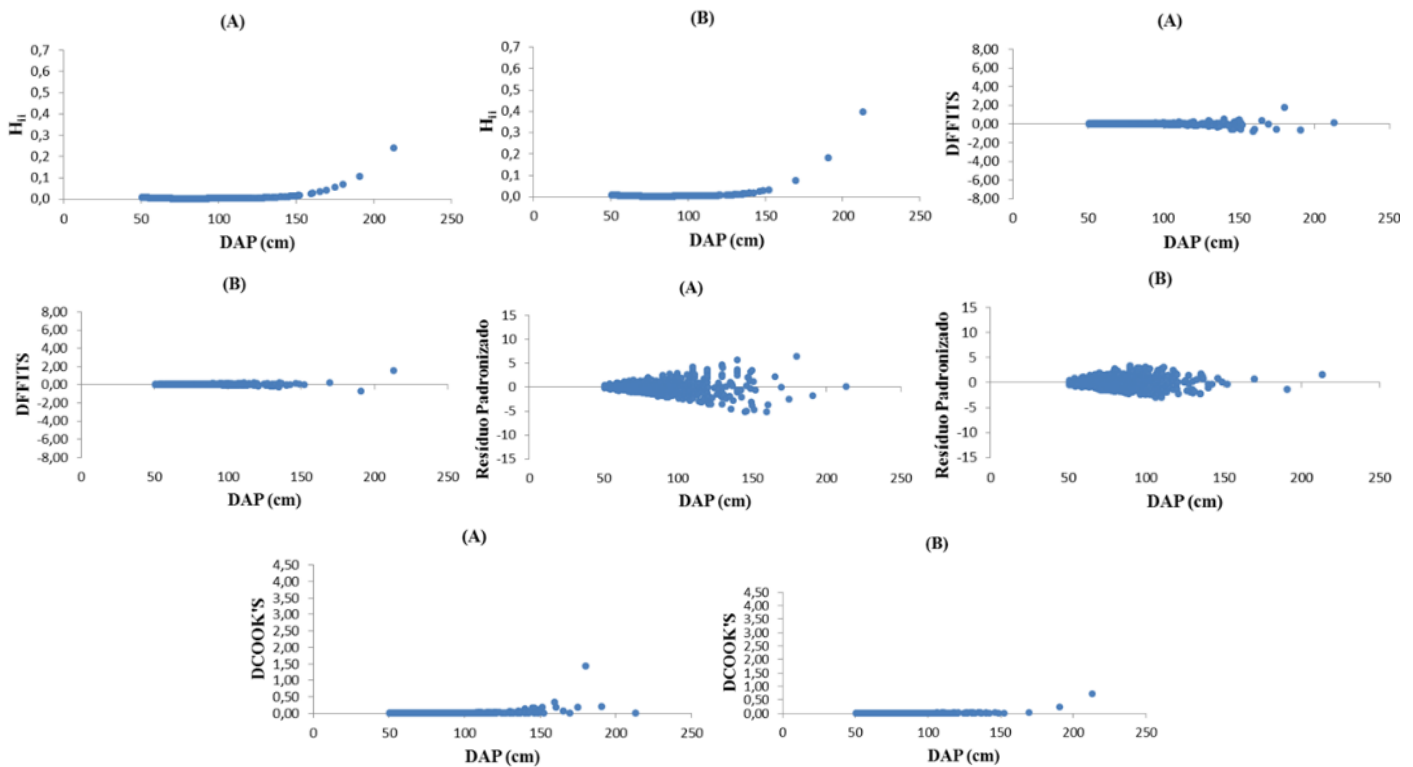


Figura 4. Distribuição das estatísticas aplicadas para análise de observações influentes antes (A) e após (B) a análise de influência, para a equação produzida pelo ajuste do modelo de Hohenadl e Krenm para um PMFS em Bujari, Acre.

Na seleção da melhor equação, foi escolhida a que resultou do ajuste do modelo de Hohenadl-Krenm por ter sido a que apresentou maior coeficiente de determinação ajustado (47,61%) e menor soma de resíduos (0,0014), indicando ligeira superioridade desta estatística. Portanto, a equação de simples entrada selecionada neste estudo foi $V = -0,971631 + 0,0334686.DAP + 0,000310589.DAP^2$.

Na análise de influência da equação de dupla entrada selecionada, foram encontradas 75 observações influentes que foram identificadas simultaneamente em três ou quatro das estatísticas utilizadas, as quais foram analisadas e, posteriormente, removidas do banco de dados. Cabe ressaltar que nem toda observação influente é

eliminada do banco de dados, pois algumas delas foram enquadradas nos critérios por não estarem suficientemente amostradas, serem observações atípicas, pontos de alavancagem ou observações influentes, conforme relatam Hair Jr. et al. (2018). O critério do elemento h_{ii} da diagonal principal da matriz H apontou a existência de 198 observações influentes; a estatística DFFITS, 56; o critério da distância de Cook, 97 e o Resíduo Padronizado, 84.

Na Figura 4 pode-se notar a melhoria da equação após a retirada das observações influentes em todos os critérios e nas medidas de tendência e variabilidade demonstradas na Tabela 3 para equação de simples entrada, resultando em um rearranjo da massa de dispersão e melhor agrupamento dos dados.

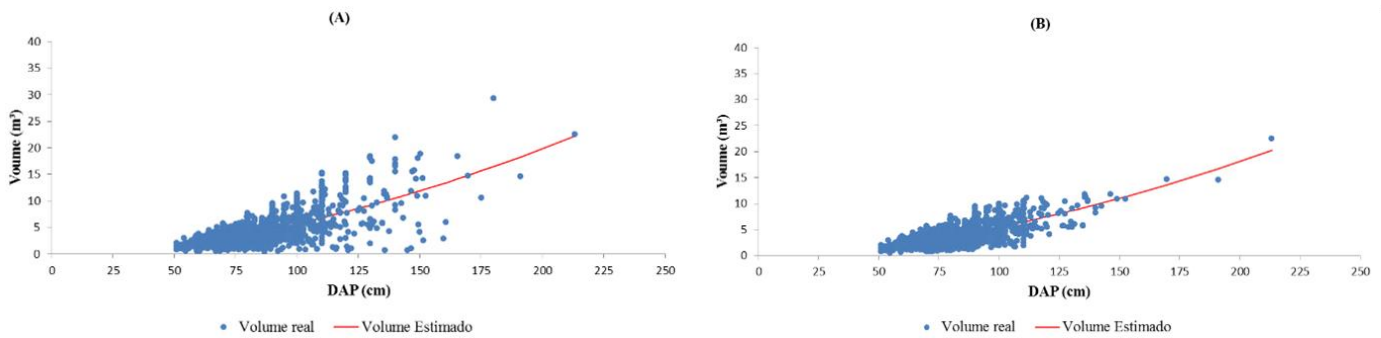


Figura 5. Distribuição dos volumes observados e estimados pela equação de simples entrada produzida pelo ajuste do modelo de Hohenadl-Krenm, antes (A) e após (B) a análise de influência, Bujari, Acre.

Na Figura 5 é apresentada a comparação de volume real e estimado, antes e após o refinamento do banco de dados, para a equação volumétrica de simples entrada selecionada neste estudo. Pode-se notar que mesmo depois da retirada das observações influentes, o banco de dados ainda teve

representações de árvores maiores, o que é ratificado na Figura 6.

Ainda em relação à Figura 6, das 2814 árvores exploradas, houve refinamento de 8,4% do banco de dados, restando 1.722 árvores, o que justifica as diferenças na distribuição de frequência por classe diamétrica.

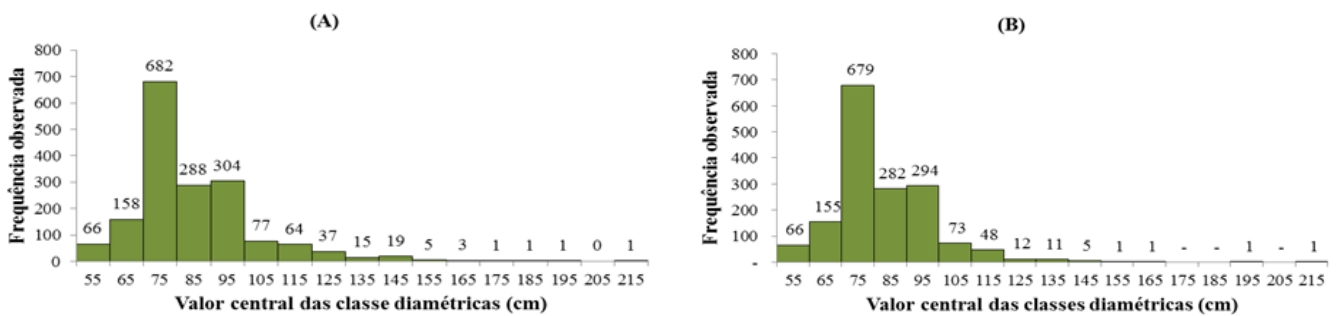


Figura 6. Número de árvores por classe diamétrica antes (A) e após (B) o refinamento do banco de dados para o ajuste do modelo de Hohenadl e Krenm, Bujari, Acre.

Em função da redução considerável do banco de dados original do inventário censitário, notou-se

que não há padrão de distribuição exponencial negativo ou jota-invertido. Isso foi esperado, uma vez

que o banco de dados original possuía 20.501 árvores, sendo apenas 2.814 exploradas, o que representa apenas 13,7% de todas as árvores do inventário censitário.

Após o diagnóstico e tratamento das observações influentes, o modelo de Hohenadl-

Krenm apresentou medidas de precisão superiores em relação ao ajuste realizado antes da análise de influência, conforme resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Medidas de precisão para a equação volumétrica de simples entrada selecionada, antes e após a análise de influência, para um PMFS em Bujari, Acre.

Hohenadl e Krenm	R ² aj.(%)	S _{yx} (m ³)	S _{yx} (%)	Soma res.	PRESSp
Antes da Análise	47,00	2,02	48,18	0,01	7047,99
Após a Análise	47,61	1,49	37,81	0,00	3590,41

Em que: R²aj. = Coeficiente de determinação ajustado, em %; S_{yx} = erro padrão da estimativa, em m³ e em %; Soma res. = soma de resíduos, em m³; PRESSp = soma de quadrados de predição.

Os valores para as medidas de precisão das equações de dupla entrada após o tratamento das observações influentes estão dispostos na Tabela 6.

Verificou-se que as equações apresentaram coeficiente de determinação ajustado entre 50,92% e 60,92%, erro padrão da estimativa entre 33,14% e 35,68%.

As equações de dupla entrada demonstraram superioridade estatística em relação às de simples entrada, com os menores valores de erro padrão da estimativa e coeficiente de determinação ajustado.

A opção por modelos de dupla entrada justifica-se pelo fato de que modelos de simples entrada pressupõem uma relação constante onde apenas o diâmetro explica o volume, assumindo

erroneamente que árvores com o mesmo DAP possuem a mesma altura. Tal premissa é frequentemente invalidada em florestas tropicais heterogêneas, onde a variabilidade interespecífica e a estratificação vertical tornam a relação diâmetro-volume insuficiente para predições acuradas (Almeida et al., 2021).

A melhoria evidenciada nos ajustes de modelos volumétricos com dupla entrada é citada por outros autores, como Gimenez et al. (2015) e Corrêa et al. (2018). No entanto, Cysneiros et al. (2017) relatam que, devido à dificuldade de se obter a variável altura em florestas nativas, é necessário a qualificação da equipe de campo para mensuração e otimização da estimativa da variável.

Tabela 6. Medidas de precisão para as equações volumétricas de dupla entrada obtidas para um PMFS em Bujari, Acre.

Equações	R ² aj. (%)	S _{yx} (m ³)	S _{yx} (%)	Soma res.	PRESSp	N	p
Spurr	56,18	1,29	33,14	0,0009	2662,9	1610	1
Stoate	58,11	1,37	34,45	-0,0018	3045,2	1635	3
Meyer	60,73	1,45	35,68	0,0028	3488,7	1660	5
Meyer Modificada	60,06	1,41	34,92	0,0045	3247,4	1649	4
Näslund	60,92	1,39	34,61	0,0089	3158,2	1643	4
Spurr Logarítmica	50,97	1,31	33,78	-57,5881	2836,7	1622	1
Schumacher-Hall Logarítmica	52,92	1,41	35,34	-43,7851	3348,5	1648	2

Em que: R²aj. = Coeficiente de determinação ajustado, em %; S_{yx} = erro padrão da estimativa, em m³ e em %; Soma res. = soma de resíduos, em m³; PRESSp = soma de quadrados de predição; N = número de amostras; p = número de parâmetros.

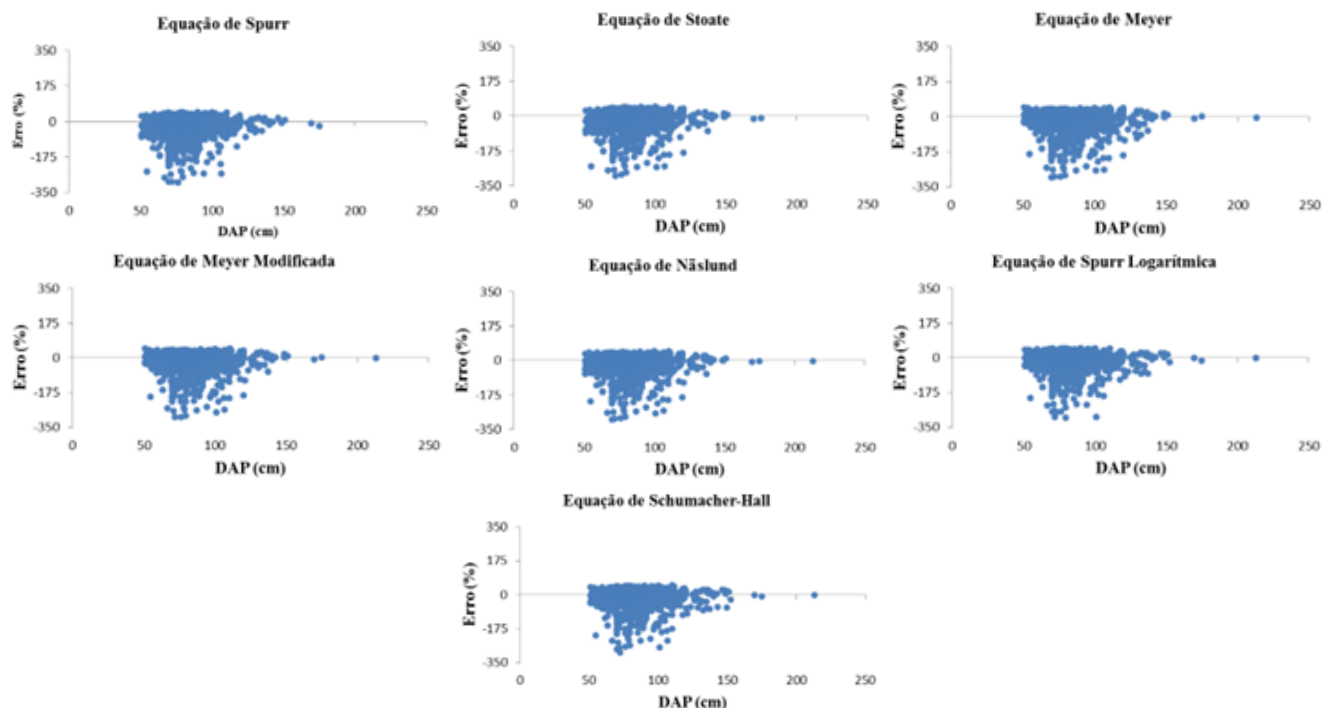


Figura 7. Distribuição gráfica dos resíduos percentuais para as equações volumétricas de dupla entrada para um PMFS em Bujari, Acre.

Quanto à distribuição gráfica dos resíduos (Figura 7), todas as equações de dupla entrada apresentaram tendência de superestimativa nas classes de diâmetro compreendidas entre 50 cm e 100 cm, assim como ocorreu para as equações de simples entrada

Entre as equações de dupla entrada, as que forneceram os piores ajustes foram as advindas do ajuste dos modelos de Spurr (logarítmica) e de Schumacher-Hall (linearizada por transformação logarítmica), por apresentarem elevados valores de soma de resíduos e os mais baixos coeficientes de determinação ajustado. As demais equações apresentaram valores próximos em todas as estatísticas de precisão.

Apesar de apresentar coeficiente de determinação ajustado mais baixo entre as melhores, a equação gerada pelo modelo de Spurr apresentou melhores resultados para todos as outras estatísticas de análise deste estudo, sendo selecionada como a melhor equação de dupla entrada para estimar o

volume das árvores da referida área de estudo pela expressão $V = 0,446744 + 0,0000277045.DAP^2.HC$.

No primeiro ajuste dos modelos de dupla entrada foram detectadas, pelo critério dos resíduos padronizados, 92 observações influentes; pela matriz H, 268; pelo DFFITS, 61; pela distância de Cook, 166. O tratamento de todas estas observações influentes resultou na retirada de 93 observações, as quais foram consideradas influentes em pelo menos três dos quatro critérios, tal como ocorreu para a equação de simples entrada.

Na Figura 8 estão apresentadas as distribuições gráficas dos ajustes da equação gerada pelo modelo de Spurr, antes e após o diagnóstico e análise das observações influentes, para cada um dos quatro critérios considerados, na qual pode-se notar uma distribuição mais uniforme dos dados após o refinamento.

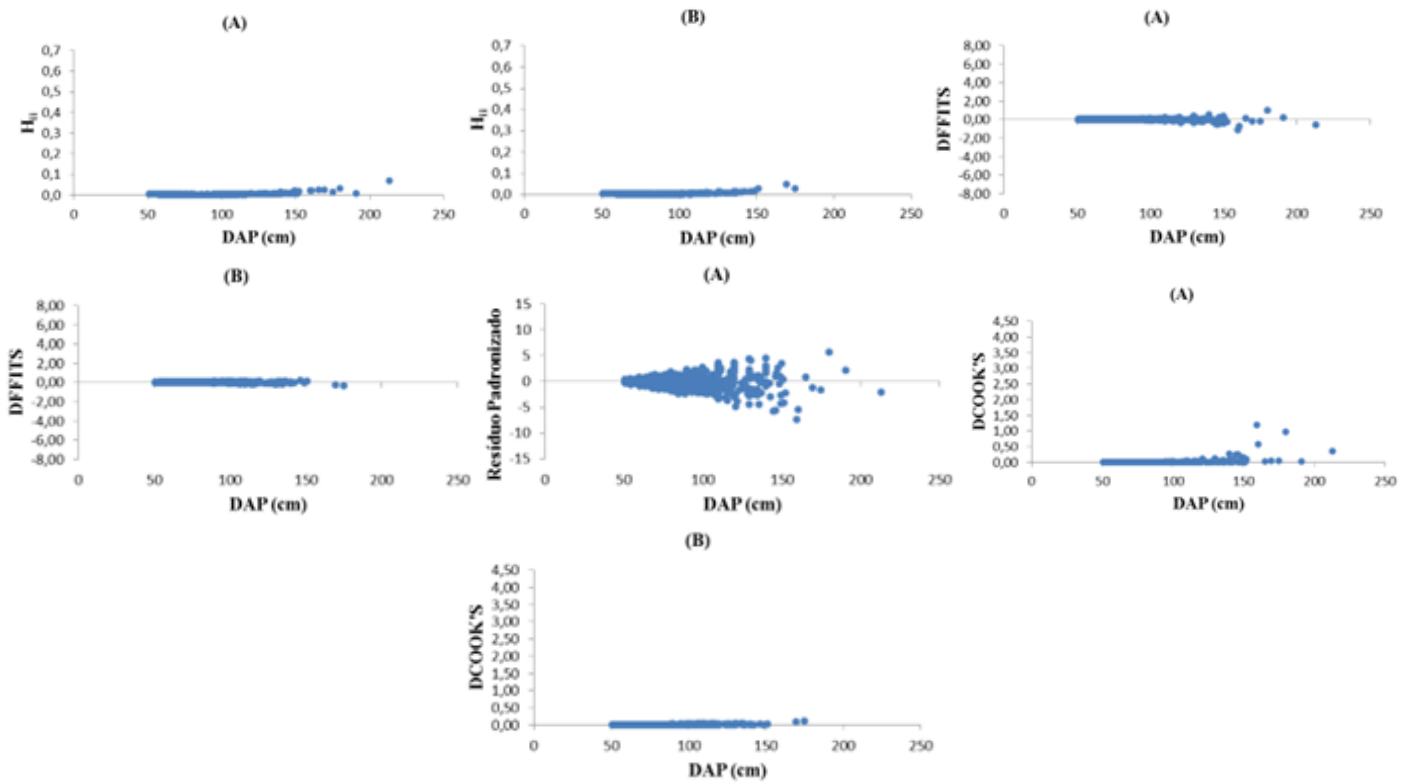


Figura 8. Distribuição das estatísticas aplicadas para análise de observações influentes antes (A) e após (B) a análise de influência, para a equação produzida pelo ajuste do modelo de Spurr para um PMFS em Bujari, Acre.

A Figura 9 apresenta a distribuição gráfica dos volumes reais e estimados pela equação gerada pelo modelo de Spurr e a Figura 10, a distribuição de frequência por classe diamétrica. Nas respectivas figuras, antes e após a análise de influência,

evidenciou-se o ganho na acuracidade da equação após o refinamento das observações influentes, com valores superiores das medidas de precisão que estão dispostos na Tabela 7, confirmando o que demonstra visualmente tais figuras.

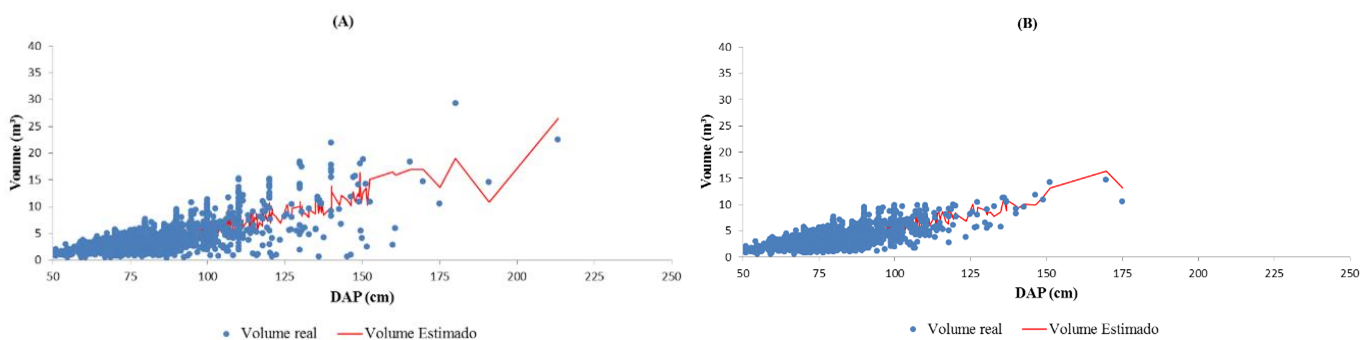


Figura 9. Distribuição dos volumes observados e estimados pela equação de dupla entrada produzida pelo ajuste do modelo de Spurr, antes (A) e após (B) a análise de influência, Bujari, Acre.

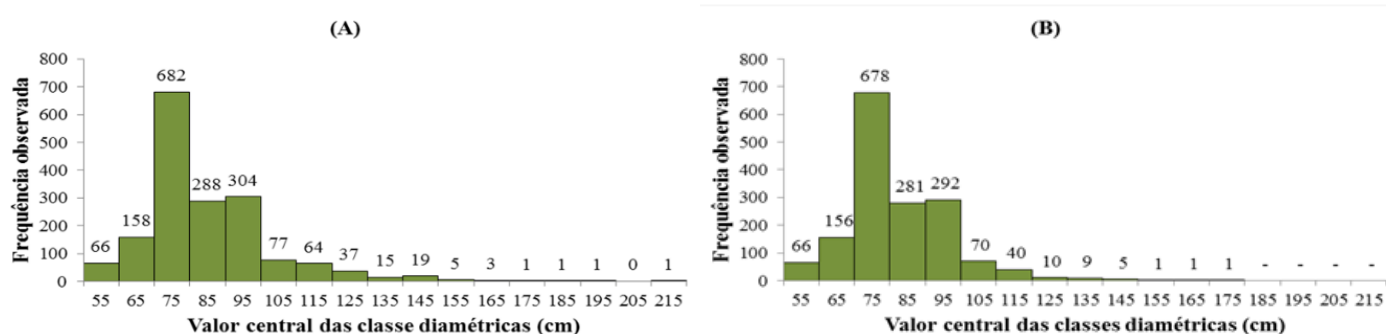


Figura 10. Número de árvores por classe diamétrica antes (A) e após (B) o refinamento do banco de dados para o ajuste do modelo de Spurr.

Tabela 7. Medidas de precisão para a equação volumétrica de dupla entrada selecionada, antes e após a análise de influência, para um PMFS em Bujari, Acre.

Spurr	R ² aj.(%)	S _{yx} (m ³)	S _{yx} (%)	Soma res.	PRESSp
Antes da Análise	56,58	1,83	43,61	0,00	5777,65
Após a Análise	56,18	1,29	33,14	0,00	2662,68

Em que: R²aj. = Coeficiente de determinação ajustado, em %; S_{yx} = erro padrão da estimativa, em m³ e em %; Soma res. = soma de resíduos, em m³; PRESSp = soma de quadrados de predição.

Na Figura 10, pode-se notar a melhor proximidade entre o volume real e o estimado após o refinamento, evidenciando a melhoria na distribuição gráfica. Já na Figura 11, observa-se que as maiores árvores foram identificadas como observações influentes, sendo retiradas do banco de dados e reduzindo, dessa maneira, a amplitude da amostra, resultando em um ajuste mais acurado para a equação selecionada. A retirada das árvores das maiores classes ocorreu em virtude de terem sido detectadas influência na qualidade do ajuste. Entretanto, é importante ressaltar que se trata de uma situação comum em florestas naturais submetidas a exploração por meio de PMFS, no qual existem poucas árvores comerciais, ou nenhuma, nas classes diamétricas superiores, associado ao fato de que o padrão de distribuição das florestas naturais é o exponencial negativo. Uma solução poderia ser a intensificação da amostragem das árvores de grande porte que ocorrem nas classes diamétricas superiores, assim como utilização de metodologias de amostragem que permitam aumentar a representatividade das árvores de grande porte, de baixa frequência, na amostra.

A equação de simples entrada produzida pelo ajuste do modelo de Hohenadl e Krenm, $V = -0,971631 + 0,0334686.DAP + 0,000310589.DAP^2$ (R²aj. = 47,6%; S_{yx} = 37,8%), foi superior, entre as cinco equações de simples entrada produzidas, para estimativa do volume de árvores individuais em um PMFS do Acre.

A equação de dupla entrada produzida pelo ajuste do modelo de Hohenadl e Krenm, $V = 0,446744 + 0,0000277045.DAP^2.HC$ (R²aj. = 56,2%; S_{yx} = 33,1%), foi superior, entre as sete equações de dupla entrada produzidas, para estimativa no volume de árvores individuais em um PMFS do Acre.

As equações de dupla entrada apresentaram resultados superiores em relação às de simples entrada.

A análise e remoção de parte das observações influentes contribuiu para a melhoria no ajuste dos modelos volumétricos estudados, sendo importante ferramenta no ajuste dos modelos volumétricos.

Os estudos relacionados ao ajuste de modelos volumétricos para a floresta Amazônica ainda são incipientes diante da vastidão e complexidade do bioma Amazônia.

A obtenção dos dados no inventário censitário para fins de produção de equações volumétricas em PMFSs na Amazônia ainda é um ponto crítico, pois as equipes de campo não são, em sua maioria, bem preparadas para tal serviço, resultando, muitas vezes, em bancos de dados inconsistentes e com vários tipos de erros não amostrais. A dificuldade de obtenção dessas observações é notória, devido ao tamanho das árvores nos ecossistemas amazônicos, da estrutura de acesso aos locais; no entanto, existem equipamentos de alta precisão e ferramentas da Geotecnologia, os quais conseguem mensurar tais variáveis, associado a

treinamento adequado de equipes de campo. Muitas vezes, a falta de padronização de procedimentos e detalhamento de metodologias podem contribuir para o atraso do desenvolvimento do manejo florestal sustentável na Amazônia.

Não obstante, muitos profissionais e pesquisadores que atuam no bioma Amazônia já conhecem soluções que vão além dos princípios básicos da estatística e da teoria da amostragem, dada a infinidade de outras maneiras de avaliação para um resultado com mais acuracidade das estimativas de volume produzidas pelas equações, tais como o ajuste de modelos por espécie e, ou, grupo de espécies; ajuste de modelos por classe diamétrica; ajuste de modelos por tipologia florestal; incorporação de outras variáveis independentes aos modelos volumétricos por meio de ferramentas geotecnológicas; aplicação de testes de identidade de modelos; dentre muitas outras opções da pesquisa científica em biometria florestal.

É importante salientar que a obrigatoriedade do desenvolvimento de equações volumétricas para extração de madeira, mediante PMFSs foi um grande avanço para o setor, demonstrando, desta maneira, que tem havido avanços neste sentido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, J. C.; Aparício, P. S.; Silva, W. C. & Costa, V. H. (2023). Volumetric modeling in the Amapá National Forest. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, 18(1): e04206. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n1-026>.
- Acre. Governo do Estado do Acre. (2021). **Zoneamento ecológico-econômico do Acre** - fase III: escala 1:250.000: documento-síntese. Rio Branco: Secretaria de Estado do Meio Ambiente e das Políticas Indígenas. 120p.
- Almeida, B. R. S.; Melo, L. O.; Cruz, G. S.; Melo, M. S.; Santos, M. F., Nicoletti, M. F. & Ribeiro, R. B. S. (2021). Índices de produtividade do corte de árvores em uma área de manejo florestal comunitário na Amazônia brasileira. **Advances in Forestry Science**, 8(1): 1271-1278. <https://doi.org/10.34062/afs.v8i1.11502>.
- Araújo, H. B. J. & Silva, I. G. (2000). **Lista de espécies florestais do Acre**: ocorrência com base em inventários florestais. Rio Branco: Embrapa Acre. 77p.
- Biazatti, S. C.; Scoti, M. S. V.; Brito Júnior, J. F.; Môra, R. & Cardozo, G. H. (2020). Eficiência de métodos para estimativa volumétrica de espécies nativas na Amazônia Ocidental. **Nativa**, 8(2): 253-259. <https://doi.org/10.31413/nativa.v8i2.8081>.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. (2006) Instrução Normativa nº 5, de 11 de dezembro de 2006. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 13 dezembro 2006.
- Castro, A. S. & Andrade, D. S. (2016). O custo econômico do desmatamento da Floresta Amazônica brasileira (1988-2014). **Perspectiva Econômica**, 12(1):1-15. <https://doi.org/10.4013/pe.2016.121.01>.
- Cysneiros, V. C.; Pelissari, A. L.; Machado, S. A.; Figueiredo Filho, A. & Souza, L. (2017). Modelos genéricos e específicos para estimativa do volume comercial em uma floresta sob concessão na Amazônia. **Scientia Forestalis**, 45(114): 295-304. <https://doi.org/10.18671/scifor.v45n114.06>.
- Corrêa, K. K. S.; Gama, J. R. V.; Silva-Ribeiro, R. B. & Ximenes, L. C. (2018). Ajuste e classificação do potencial volumétrico de *Lecythis lurida* (Miers) Mori, Flona do Tapajós. **Nativa**, 6(4): 395-401. <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i4.5450>.
- Gimenez, B. O.; Danielli, F. E.; Oliveira, C. K. A.; Santos, J. & Higuchi, N. (2015) Equações volumétricas para espécies comerciais madeireiras do sul do estado de Roraima. **Scientia Forestalis**, 43(106): 291-301.
- Hair Jr., J. F.; Black, W. C.; Babin, B. J.; Anderson, R. E. & Tatham, R. L. (2018). **Multivariate data analysis**. 8. th. Andover: Cengage Learning, 2018. 832p.
- Higuchi, N.; Santos, J.; Lima, A. J. N.; Higuchi, F. G.; Silva, R. P.; Souza, C. A. S.; Pinto, F. R.; Teixeira, L. M.; Carneiro, V. M. C. & Silva, S. R. (2007). Perspectivas do manejo florestal sustentável para a Amazônia Brasileira. **Hiléia Revista do Direito Ambiental da Amazônia**, 8:78-93

- Leal Filho, W.; Dinis, M. A. P.; Canova, M. A.; Cataldi, M.; Costa, G. A.; Enrich-Prast, A.; Symeonakis, E. & Brearley, F. Q. (2025). Managing ecosystem services in the Brazilian Amazon: the influence of deforestation and forest degradation in the world's largest rain forest. **Geoscience Letters**, v.12. <https://doi.org/10.1186/s40562-025-00391-9>.
- Leão, F. M.; Nascimento, R. G. M.; Emmert, F.; Santos, G. G. A.; Caldeira, N. A. M. & Miranda, I. S. (2021). How many trees are necessary to fit an accurate volume model for the Amazon forest? A site-dependent analysis. **Forest Ecology and Management**, 480, 118652. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.11865>.
- Oliveira, A. H. M.; Freitas, L. J. M.; Magliano, M. M.; Chaves, J. H.; Dias, C. T. S. & Martorano, L. G. (2024). Spatio-temporal assessment of heterogeneity by logging intensity in a federal concession area in the Brazilian Amazon. **Forests**, 15(6), 1062. <https://doi.org/10.3390/f15061062>.
- Romero, F. M. B.; Jacovine, L. A. G.; Ribeiro, S. C.; Torres, C. M. M. E.; Silva, L. F.; Gaspar, R. O.; Rocha, S. J. S. S.; Staudhammer, C. L. & Fearnside, P. M. (2020). Allometric equations for volume, biomass, and carbon in commercial stems harvested in a managed forest in the Southwestern Amazon: a case study. **Forests**, 11(8), 874. <https://doi.org/10.3390/f11080874>.
- Reategui-Betancourt, J. L.; Mazzei, L.; Rezende, A. V.; Briceño, G.; Oliveira, C. M. M.; Gaudi, T. D.; Khan, S. & Figueiredo, A. E. S. (2023). Evaluation of sampling with partial replacement and double sampling in a managed forest in the Brazilian Amazon. **Floresta e Ambiente**, 30(4): e20230011. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-floram-2023-0011>.
- Santos, M. F.; Figueiredo Filho, A.; Gama, J. R. V., Retslaff, F. A. S. & Costa, D. L. (2020). Species-specific equations: greater precision in commercial volume estimation in managed forests in the Amazon. **Cerne**, 26(3): 315-330. <https://doi.org/10.1590/01047760202026032741>
- Scolforo, J. R. S.; Scolforo, H. F.; McTague, J. P. & Altoé, T. F. **Biometria florestal: crescimento e produção**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2025.
- Sema - Secretaria do Meio Ambiente. (2019) **Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) Madeireiro: revisão III 2019**. Rio Branco: SEMA, 117p. Disponível em: <https://sema.ac.gov.br/wp-content/uploads/2020/04/Plano-de-Manejo-Florestal-Antimary.pdf>.
- Silva, I. C. O.; Garlet, J.; Morais, V. A.; Araújo, E. J. G.; Silva, J. R. O. & Curto, R. D. A. (2022). Equations and form factor by species increase the precision and accuracy for estimating tree volume in the Amazon. **Floresta**, 52(2), 268-276. <https://doi.org/10.5380/RF.v52i2.76559>.
- Thaines, F.; Braz, E. M.; Mattos, P. P. & Thaines, A. A. R. Equações para a estimativa de volume de madeira para a região da bacia do Rio Ituxi, Lábrea, AM. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 30(64): 283-289. <https://doi.org/10.4336/2010.pfb.30.64.283>.
- Tonini, H. & Borges, R. A. (2015) Equação de volume para espécies comerciais em Floresta Ombrófila Densa no Sul de Roraima. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 35(82):111-117.