

DONIZETE DA COSTA DIAS

**USO DA RESISTOGRAFIA NA MODELAGEM DA DENSIDADE BÁSICA DE
CLONES DE EUCALIPTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

DONIZETE DA COSTA DIAS

**USO DA RESISTOGRAFIA NA MODELAGEM DA DENSIDADE BÁSICA DE
CLONES DE EUCALIPTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Aprovada em: 15 de Fevereiro de 2011

Cláudio Roberto Triersch

Prof. Hélio Garcia Leite

Prof. Jorge Luiz Colodette
(Orientador)

Às pessoas mais importantes da minha vida, com muito carinho:

Meus pais: Aristides (*in memoriam*) e Maria José;

Minha esposa: Regina;

Meus filhos: Vinícius, Matheus e Maria Clara;

Meus irmãos: José Antônio, Eni, Helenice e Cidinha.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Jorge Luiz Colodette, pela orientação, e em especial pela confiança e incentivo nesta jornada.

Ao professor e ex-colega de trabalho Cláudio Roberto Thiersch, pelo apoio crucial no desenvolvimento deste trabalho e pelas muitas horas de conversa e ensinamentos que tanto contribuíram para minha formação profissional.

Ao professor Hélio Garcia Leite, pela participação na banca examinadora e pelos conselhos, correções e ensinamentos.

À professora Cássia Cristina Pereira pelo apoio na revisão do texto.

À Fibria Celulose S. A., por disponibilizar os dados utilizados neste estudo e pelas condições oferecidas para executá-lo.

Ao Gerente de Melhoramento e Manejo Florestal da Fibria, Fernando L. Bertolucci, pelo apoio na conclusão do mestrado.

Ao Gerente de Biotecnologia da Fibria, Cesar Bonine, pelo incentivo e apoio iniciais que permitiram a realização deste trabalho.

Aos colegas que direta ou indiretamente participaram de alguma fase dessa jornada, nas amostragens, nas análises laboratoriais e em outras atividades.

BIOGRAFIA

Donizete da Costa Dias, filho de Aristides Dias da Fonseca e Maria José da Costa Dias, nasceu aos 29 dias de março de 1968, na cidade de Alto Rio Doce, Minas Gerais.

Concluiu o curso Técnico Agropecuário em 1985 na Escola Agrotécnica Federal de Rio Pomba, em Rio Pomba, MG.

Em novembro de 1987 iniciou suas atividades profissionais no setor de celulose e papel como Técnico de Silvicultura na Florin Florestamento Integrado S/A.

Entre 1989 e 1991 atuou com Técnico de Planejamento Florestal na mesma empresa.

A partir de 1991 passou a atuar na área de Melhoramento Genético Florestal, passando em 2004 para a Votorantim Celulose e Papel S/A, e atualmente Fibria Celulose S/A, onde atua como Pesquisador Sênior em Melhoramento Genético de *Eucalyptus*.

Cursou Bacharelado em Ciências Biológicas no período de 2000 a 2004 pela Universidade Braz Cubas, em Mogi das Cruzes, SP.

Cursou pós-graduação *lato sensu* em Tecnologia de Celulose e Papel no período de março de 2006 a abril de 2008 pela Universidade Federal de Viçosa.

Em Março de 2009 iniciou o curso de Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel pela Universidade Federal de Viçosa, com defesa da dissertação em Fevereiro de 2011.

ÍNDICE

	Página
Lista de Tabelas	vi
Lista de Figuras	vii
Resumo	viii
ABSTRACT	x
1 INTRODUÇÃO	01
2 MATERIAL E MÉTODOS	03
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	06
4 CONCLUSÕES	16
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17
6 APÊNDICE	20

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1	Número de árvores-amostra por clone e variações de mínimo, média e máximo para cinco variáveis de povoamentos de eucalipto: idade, altura total (HT), diâmetro a 1,3 m de altura (DAP), altura dominante (HD) e altitude 08
Tabela 2	Coeficiente de correlação entre a densidade básica a 1,3 m de altura e as médias de amplitude ou as variáveis dendrométricas da população, com os respectivos níveis de significância 10
Tabela 3	Equações selecionadas para predição da densidade básica a 1,3 m de altura dos clones C2, C4, P95, V3 e geral (todos os clones), com as respectivas estimativas dos parâmetros e medidas de precisão 12

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1	Valores mínimos, médios e máximos de densidade básica de discos a 1,3 m de altura (DAP) para os quatro genótipos avaliados.....
	09
Figura 2	Variações nas medidas de precisão para o conjunto dos quatro clones ao utilizar somente o Resistógrafo® (AMP_100), ao acrescentar variáveis do indivíduo e da população (ID, DAP, HD e DG) e ao eliminar o Resistógrafo®.....
	15
Figura 3	Análise gráfica da melhor equação selecionada para o conjunto dos quatro clones: (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em percentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm ³ e (d) dispersão dos resíduos padronizados.....
	17

RESUMO

DIAS, Donizete da Costa. M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2011. **Uso da resistôgrafia na modelagem da densidade básica de clones de eucalipto.** Orientador: Jorge Luiz Colodette. Coorientadores: José Lívio Gomide e Rubens Chaves de Oliveira.

A densidade básica é uma propriedade chave de qualidade da madeira para produção de celulose, mas sua determinação demanda muito tempo e altos custos. O desenvolvimento de ferramentas de amostragem não destrutiva, eficientes e de baixo custo, torna-se importante, e o Resistógrafo® pode ser uma alternativa. Este estudo teve o objetivo de utilizar dados de amplitude coletados pelo Resistógrafo®, associados a variáveis dendrométricas, para desenvolver modelos para estimativa de densidade básica em povoamentos clonais de *Eucalyptus*. Utilizaram-se quatro clones híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* distribuídos em plantios comerciais no Vale do Paraíba com idade variando de dois a sete anos. Os materiais foram amostrados pelo Resistógrafo® a 1,30 m de altura da árvore (DAP) e pela retirada de um disco na mesma altura para determinação da densidade básica em laboratório. Foram selecionadas equações lineares simples e múltiplas, iniciando pelo uso de dados do Resistógrafo® (amplitude média) como variável preditora, e, posteriormente incluindo variáveis dendrométricas como DAP, idade, altura total, altura média das árvores dominantes e diâmetro médio quadrático. A inclusão destas variáveis aumentou a precisão das estimativas. A melhor equação selecionada para o conjunto dos quatro clones, ajustada, utilizando a amplitude média (Resistógrafo®), associada à altura média das árvores dominantes, à idade das árvores e ao diâmetro médio quadrático, apresentou coeficiente de determinação ajustado igual a 68,80%, com erro padrão residual de 0,0201 g/cm³ ou 4,31%. Para cada clone isoladamente as equações mais precisas também foram aquelas em que se associou o Resistógrafo® às variáveis do indivíduo e da população. Equações ajustadas em função apenas de variáveis dendrométricas apresentaram medidas de precisão superiores às ajustadas em função apenas do Resistógrafo®, no caso do conjunto dos 4 clones, e superiores ao Resistógrafo® associado a variáveis do indivíduo, no caso de cada clone isoladamente. O Resistógrafo® mostrou-se

como uma ferramenta eficiente para predição da densidade básica. Entretanto, estimativas tão ou mais precisas podem ser obtidas sem uso do equipamento quando se tem variáveis individuais e da população.

ABSTRACT

DIAS, Donizete da Costa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2011. **Resistograph use in modeling basic density of clones of eucalypt.** Advisor: Jorge Luiz Colodette. Co-advisors: José Lívio Gomide and Rubens Chaves de Oliveira.

The basic density is a key property of wood quality for pulp production, but its determination is very time consuming and costly. The development of non-destructive sampling tools, efficient and low cost is important, and Resistograph can be an alternative. This study is aimed at amplitude data collected by the resistograph, associated the dendrometrical variables, to develop models to estimate basic density in *Eucalyptus* clonal stands. It was used four hybrid clones of *E. grandis* x *E. urophylla* distributed in commercial plantations in the Paraíba Vally aged 2-7 years. These materials were sampled by Resistograph at 1.30 m above ground (DBH) and the removal of a disk at the same height to determine the density in the laboratory. Were selected single and multiple linear equations starting with data usage Resistograph (amplitude) as a predictor variable, and then dendrometric variables such as DBH, age, height, average height of dominant trees and quadratic mean diameter. The inclusion of these variables increased the accuracy of estimates. The best equation selected for all four clones, adjusted using the average amplitude (Resistograph), associated with the average height of dominant trees, the tree age and quadratic mean diameter, presented adjusted coefficient of determination equal to 68.80%, with error residual standard 0.0201 g/cm^3 or 4.31%. For each clone alone, the more accurate equations also were those involving Resistograph variables of the individual and the population. Equations adjusted for only dendrometric variables showed precision measurements higher than those adjusted for only the Resistograph, in the case of all four clones, and superior to Resistograph associated with the individual variables in the case of each clone alone. The Resistograph proved to be an efficient tool for prediction of the density. However, equally or more accurate estimates can be obtained without use of the equipment when you have individual variables and population.

1 INTRODUÇÃO

A densidade básica é uma das características mais importantes da madeira devido à sua relação com o rendimento das operações florestais e dos processos industriais. De forma geral, ela é definida como sendo a quantidade da substância madeira presente em um dado volume, obtido pela razão entre a massa seca e o seu volume verde.

Santos (2002) define a densidade básica como resultante da interação entre propriedades químicas e anatômicas da madeira, ressaltando sua influência no processo de polpação e nos parâmetros de qualidade da polpa. Queiroz *et al* (2004) comentam que a avaliação adequada da densidade básica fornece indicações bastante precisas sobre a impregnação dos cavacos e sobre o rendimento do processo de polpação, e que geralmente está associada às características físico-mecânicas da polpa e à sua qualidade. Trabalhando com 10 clones de *Eucalyptus* selecionados por empresas brasileiras, Lopez *et al* (2009) concluíram que a densidade básica, juntamente com o incremento volumétrico médio anual e o teor de lignina, influenciam significativamente no valor presente líquido (VPL) do complexo integrado pela floresta e a fábrica de celulose. Esses estudos corroboram as afirmações de Gomes (2007), de que a densidade básica é uma propriedade chave para a produção de celulose, e de Foelkel *et al*, (1990) de que é um bom índice para avaliar a qualidade da madeira.

Segundo Hansen (2000), a densidade básica da madeira possui um caráter muito complexo e é influenciada por muitos fatores, como o diâmetro e a espessura de parede das células, as proporções de lenho inicial e lenho tardio e os teores de celulose, lignina e extrativos. Lopes & Garcia (2002) também citam que as variações da densidade básica estão relacionadas com as características anatômicas da madeira, como comprimento e largura da célula, espessura da parede celular, diâmetro do lume e proporção e distribuição dos tecidos no lenho.

Apesar da importância do conhecimento da densidade básica da madeira a ser utilizada no processo industrial, as técnicas tradicionais de sua determinação apresentam alguns inconvenientes operacionais que podem

limitar o atendimento satisfatório à indústria. Os principais são o baixo rendimento da operação (amostragem, transporte, preparo de amostras e determinação da densidade básica em laboratório), e o alto custo da atividade. Esses fatores levam a uma amostragem reduzida que por vezes não abrange as variações ambientais e genóticas da população avaliada. As amostragens destrutivas não se aplicam também aos programas de melhoramento genético, pelos mesmos motivos acima, e mais ainda quando se tratam de matrizes que fazem parte do programa e devem ser mantidas no campo.

Dada a importância e a dificuldade de obtenção da densidade básica, muitos estudos têm sido feitos na tentativa de encontrar metodologias de amostragem mais simples e menos onerosas, passando quase sempre pelas amostragens não destrutivas. Os trabalhos de Rinn *et al* (1996); Hansen (2000); Trugilho *et al* (2006), Lima *et al* (2007) e Gomes (2007), são alguns exemplos. Sobre este aspecto, Thiersch *et al* (2006) ressaltam que a densidade básica pode ser relacionada a outras características de fácil medição, podendo, portanto, ser modelada. Os mesmos autores citam que o controle da estrutura do povoamento (diâmetro e altura), da idade, da capacidade produtiva dos locais, do manejo e dos materiais genéticos, somados a alguma variável mecânica pode permitir construir modelos precisos para predição da densidade básica média da árvore.

Neste sentido, uma das ferramentas para obtenção de uma variável mecânica de fácil medição e não destrutiva é o Resistógrafo®. Este equipamento foi desenvolvido visando a um método fácil e seguro de avaliar defeitos internos em árvores para uso em produtos sólidos. Algum tempo depois foi proposta a sua utilização para predição de densidade básica, através da correlação da resistência à penetração na madeira com a densidade da mesma.

Segundo Rinn *et al* (1996), o Resistógrafo® baseia-se no uso de uma broca de aço de 3 mm de diâmetro, que, ao penetrar na madeira, registra as variações de intensidade de torque correspondentes às variações estruturais da parede celular, lenho inicial e tardio e efeitos das condições de crescimento da árvore. Os registros são feitos por sensores mecânicos e eletrônicos do

equipamento como um valor de resistência à perfuração, denominado amplitude. De forma resumida, Gomes (2007) comenta que o Resistógrafo® registra o perfil da variação radial da madeira, que está relacionado com sua dureza e densidade.

Diante do exposto, é plausível imaginar que a utilização do Resistógrafo® poderá produzir informações, que por si só ou associadas a outras variáveis de fácil obtenção, propiciem estimar com precisão a densidade de populações clonais de *Eucalyptus*. Tal situação poderá trazer significativas vantagens e facilidades ao planejamento de abastecimento da indústria bem como as avaliações de populações em programas de melhoramento genético, reforçadas pela possibilidade de avaliar maior número de árvores com muito menor esforço e custo.

O objetivo deste estudo foi utilizar dados de amplitude coletados pelo resistógrafo, associados a variáveis dendrométricas, para testar e ou desenvolver modelos para estimar a densidade básica ao nível do DAP em povoamentos clonais de *Eucalyptus*.

2 Material e métodos

2.1 Caracterização das populações de estudo

Para este estudo, foram amostradas árvores em quatro cultivares clonais identificados como C2, C4, P95 e V3, todos híbridos *E. grandis* x *E. urophylla*, implantados em larga escala em áreas distribuídas por todo o Vale do Paraíba, (Leste do Estado de São Paulo e Sul do Estado do Rio de Janeiro), entre as latitudes 22° 30' a 23° 30' S e longitudes 44° 22' a 46° 12' W. As árvores-amostra foram selecionadas buscando abranger as variações de idade, capacidade produtiva, altitude, diâmetro a 1,30 m de altura (DAP), altura e volume.

As amostras foram coletadas no entorno de parcelas do inventário florestal contínuo, abrangendo idades entre 2 e 7 anos. Em cada parcela foram determinadas quatro classes de diâmetro, sendo amostrada uma árvore para cada classe, totalizando 278 árvores.

As árvores escolhidas foram amostradas pelo Resistógrafo®, modelo F400-S, sempre a 1,30 m de altura (DAP), com o equipamento ajustado para madeiras duras. Nesta mesma posição foi retirado um disco com espessura aproximada de 3 cm para determinação da densidade básica em laboratório. Em seguida, cada árvore abatida teve seu volume individual determinado por cubagem rigorosa pelo método de Smalian, nas alturas 0,1; 0,7; 1,3; 2,0; 4,0 m e, assim sucessivamente de 2 em 2 metros até atingir a altura do diâmetro mínimo comercial de 3,0 cm com casca.

A densidade básica dos discos foi determinada em laboratório pelo método da balança hidrostática, conforme descrito e utilizado por Alzate *et al* (2005).

2.2 Tratamento dos dados de amplitude do Resistógrafo®

O Resistógrafo® registra 100 pares de dados (profundidade e amplitude) a cada centímetro de avanço da broca no sentido radial do tronco, ou seja, mede a resistência à penetração a cada 0,1 mm. Essa quantidade de pontos de amostragem permite representar com bastante detalhe o perfil de resistência da árvore. Porém, variações inerentes à própria madeira, como presença de nós e bolsas de resina, ou inerentes ao processo de amostragem, tais como passagem da broca pela casca da árvore ou leitura feita com a broca fora da madeira, podem gerar dados não representativos da estrutura do tronco.

Devido a isso, os dados de cada amostra passaram por alguns tratamentos visando à eliminação de valores nulos (zeros) e remoção de dados estranhos.

2.2.1 Eliminação de leituras fora do lenho

Foram eliminados os valores de amplitude iguais a “zero”, que indicavam movimentação da broca antes de iniciar a penetração na árvore e, também, as amplitude iguais a 0,5% referentes à passagem da broca pela casca da árvore. Após remoção, foi calculada a média geral da amplitude por amostra, denominada AMP_100.

2.2.2 Eliminação de dados extremos

Para o cálculo de outras médias das resistências à penetração no lenho, foram removidos os valores extremos que podem ocorrer devido a situações diversas, como por exemplo, presença de nós, rachaduras, podridão, bolsas de resina, etc.

Na primeira forma de remoção, para obter, por exemplo, a média denominada AMP_90, foram consideradas todas as amplitudes entre os percentis 5% e 95%. O procedimento foi repetido para a construção das médias das amplitudes entre os percentis 0,5% a 99,5% (AMP_99), 2,5% a 97,5% (AMP_95) e 5,0% a 95,0% (AMP_90).

Como segunda forma de remoção de dados extremos foi aplicado o critério do gráfico de caixa (Box Plot). Os valores de amplitude, identificados por este critério como estranhos ao conjunto de dados, foram excluídos e foi gerada uma nova média de amplitude (AMP_Out) para cada árvore.

2.3 Modelagem da densidade

Visando à seleção prévia das variáveis a serem utilizadas na modelagem da densidade básica, foi utilizada a tabela de valores críticos de “r” apresentada por Triola (2005) para verificar a significância da relação linear entre cada variável e a densidade básica dos discos a 1,30 m de altura da árvore.

Para a estimativa da densidade básica da árvore ao nível do DAP, foram testados, ou desenvolvidos modelos lineares simples ou múltiplos, em que somente a média de amplitude dada pelo Resistógrafo® foi utilizada como variável independente, embora com diferentes formas de apresentação dadas pelos tratamentos dos dados.

Num segundo momento, com o intuito de melhorar a estimativa da densidade básica, foram ajustados modelos com inclusão da altura média das árvores dominantes (HD), do diâmetro a 1,30 m de altura (DAP), da altura total (H), do diâmetro médio quadrático (DG) e da idade (ID), bem como variações e combinações destas variáveis.

Para a construção dos modelos lineares, foi utilizado o procedimento de *Stepwise*. Para cada modelo construído foi analisado o coeficiente de determinação corrigido, em porcentagem (R^2_{aj}), o erro padrão residual (Syx) na

escala original da variável dependente e em porcentagem e a análise gráfica dos resíduos.

3 Resultados e Discussão

3.1 Caracterização da base de dados

As informações básicas da população clonal amostrada são apresentadas na Tabela 1, com o número de árvores por clone e as variações de mínimo, médio e máximo para as variáveis idade, altura total (HT), diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) e altura dominante (HD), totalizando 278 árvores.

Tabela 1. Número de árvores-amostra por clone e variações de mínimo, média e máximo para cinco variáveis de povoamentos de eucalipto: idade, altura total (HT), diâmetro a 1,3 m de altura (DAP) e altura dominante (HD)

Table 1. Number of trees sampled per clone and variation of minimum, average and maximum for five variables of eucalypt populations: age, total height (HT), diameter at 1.3 m of height (DBH) and dominant height (HD)

Clone*	Idade (anos)			HT (m)			DAP (cm)			HD (m)		
	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx
C2 (44)	1,9	4,3	7,6	13,4	21,8	32,9	8,3	13,8	21,6	14,8	23,7	31,7
C4 (94)	2,1	4,4	7,7	9,7	22,2	35,5	8,0	13,9	23,2	13,5	24,3	32,4
P95 (75)	2,0	4,35	7,7	11,1	22,5	32,2	7,6	13,5	21,8	17,0	24,6	32,2
V3 (65)	2,0	4,2	5,5	12,8	22,4	29,2	6,7	13,0	20,5	16,7	24,8	30,3

* Número entre parênteses indica a quantidade de árvores amostradas por clone.

3.2 Variações na densidade básica

Os resultados de densidade básica obtidos nas análises dos discos retirados na altura do DAP das árvores e determinados pelo método da balança hidrostática apresentaram valor médio de 0,470 g/cm³ para todos os povoamentos, com mínimo de 0,373 e máximo de 0,561 g/cm³ (Figura 1).

Foi verificada tendência de aumento da densidade básica em função do aumento da idade das árvores, para todos os genótipos. Esta constatação está de acordo com vários autores que relataram relação positiva da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* com a idade, como, por exemplo, Vital

(1987), Trugilho *et al* (1996), Trugilho *et al* (1997), Lopes & Garcia (2002), Thiersch (2002), Silva *et al* (2004) e Eisfeld *et al* (2009).

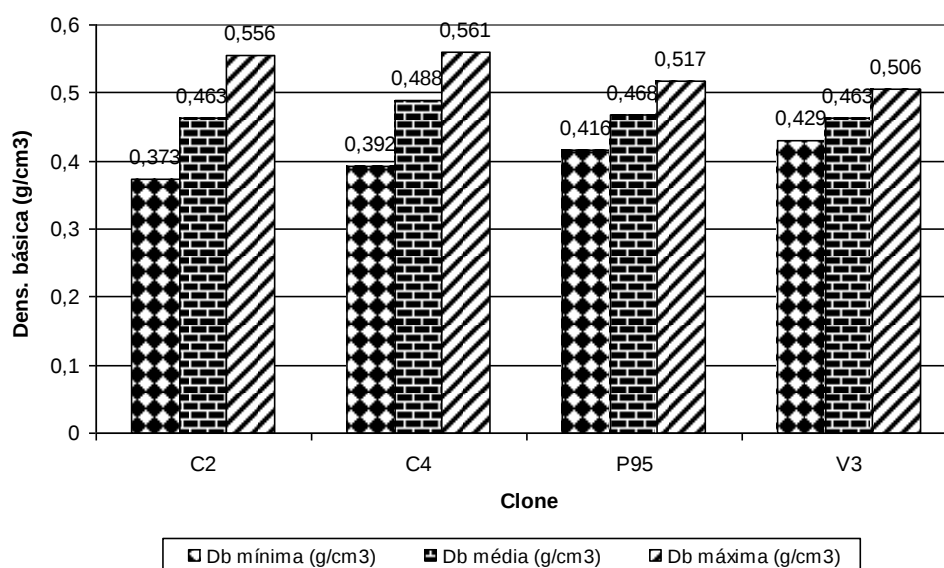


Figura 1. Valores mínimos, médios e máximos de densidade básica de discos a 1,3 m de altura (DAP) para os quatro genótipos avaliados.

Figure 1. Minimum, average and maximum density of disks at 1,3 m of height (DBH) for the four genotypes.

3.3 Resultados de amplitude de resistência

Os valores médios de amplitude de resistência dos quatro clones (AMP_100), registrados pelo Resistógrafo®, variaram de 5,31 a 34,92%, com média geral de 14,34%. Lima *et al* (2006), avaliando clones aos 7 anos de idade, obtiveram valores de amplitude entre 8,53 e 17,92%. Em outro estudo, Lima *et al* (2007) avaliaram sete clones híbridos aos 16 anos de idade e encontraram valores de amplitude variando de 12,00 a 33,00%. Andrade *et al* (2008) avaliaram árvores aos três anos de idade e registraram amplitudes variando de 8,02 a 25,27%.

No presente estudo, a variação entre menor e maior amplitude média foi superior às apresentadas nos trabalhos citados. Isto pode ter ocorrido devido à variação na idade das árvores amostradas e no ambiente de crescimento destas, além da combinação destes dois fatores. Possíveis diferenças entre equipamentos e suas regulagens podem ter contribuído também para este resultado.

3.4 Análise da correlação entre as variáveis

Pelo coeficiente de correlação foi medida a intensidade da relação linear entre as variáveis independentes (médias de amplitude e variáveis dendrométricas) e a variável dependente (densidade básica). Esses valores obtidos para o conjunto dos clones avaliados podem ser observados na Tabela 2, assim como os níveis de significância do coeficiente de correlação linear para cada par de dados correlacionados, de acordo com a tabela de valores críticos de r apresentada por Triola (2005).

Tabela 2. Coeficiente de correlação entre a densidade básica a 1,3 m de altura e as médias de amplitude ou as variáveis dendrométricas da população, com os respectivos níveis de significância

Table 2. Correlation coefficient between the density at 1,3 m in height and the average amplitude or the dendrometric variables of population, with the respective levels of significance

y	x	r
Densidade básica (g/cm ³)	AMP_100	0,6856
	AMP_Out	0,6659
	AMP_99	0,6842
	AMP_95	0,6802
	AMP_90	0,6760
	DAP	0,3977
	HT	0,5595
	HD	0,6630
	ID	0,7150
	DG	0,6056

y – densidade básica (kg/m³); x – médias de amplitude ou variáveis dendrométricas (DAP – diâmetro a 1,30 m do solo, HT – altura total, HD – altura dominante, ID – idade, DG – diâmetro médio quadrático); r – coeficiente de correlação linear.

Os dados da Tabela 2 indicam que há correlação linear positiva e significativa a 1% de probabilidade entre as variáveis independentes utilizadas e a densidade média da árvore. Indicam, também, que a magnitude dessa correlação é maior para a amplitude, em suas diferentes médias, em relação às

outras variáveis. Para as médias de amplitude, as correlações variaram entre 0,6659 e 0,6856, sendo mais alta para a AMP_100, obtida após eliminação das leituras realizadas fora do lenho, indicando que os outros tratamentos aplicados aos dados não contribuíram para melhorar a capacidade explicativa do Resistógrafo®. Estes valores estão de acordo com os obtidos por Gouvêa *et al* (2009), que avaliaram a correlação entre a densidade básica no DAP e a amplitude em um clone amostrado em quatro locais e encontraram magnitude 0,597 e, com Eisfeld *et al* (2009), que ao avaliarem as correlações de densidade básica de cavacos com variáveis dendrométricas em quatro genótipos de *Eucalyptus*, encontraram correlações de 0,56 com a idade, 0,36 com o DAP e 0,39 com a altura total.

3.5 Equações selecionadas para estimativa da densidade básica

Após o ajuste de vários modelos e testes de precisão dos mesmos, foi selecionado um conjunto de 20 equações lineares simples e múltiplas que apresentaram as melhores medidas de precisão na predição da densidade básica de cada genótipo e do conjunto dos quatro clones. Estas equações são apresentadas na Tabela 3.

As equações selecionadas apresentaram variações na precisão em função das variáveis explicativas utilizadas. Quando foi utilizado apenas o Resistógrafo® (médias de amplitude) como variável independente, a melhor forma de apresentação foi sempre a AMP_100.

Esse fato indica que as observações eliminadas por estarem posicionadas nos percentis extremos ou eliminadas pela técnica do “*gráfico de caixa*”, na verdade fazem parte da variação natural da madeira e devem ser mantidas na composição da média de amplitude registrada pelo Resistógrafo®. Considerando que o material amostrado é madeira de *Eucalyptus* em idade relativamente jovem, pode-se inferir que esta é ainda muito homogênea e que as variações associadas a eventuais defeitos, caso eles existam, são ainda confundidas com variações normais da estrutura da madeira. Provavelmente em árvores mais velhas ou em madeira de coníferas, que têm maior variação com relação a bolsas de resina e dureza de nós, os tratamentos pudessem dar resultados vantajosos.

Tabela 3 – Equações selecionadas para predição da densidade básica a 1,3 m de altura dos clones C2, C4, P95, V3 e geral (todos os clones), com as respectivas estimativas dos parâmetros e medidas de precisão

Table 3 – Selected equations to predict the density at 1,3 m in height of clones C2, C4, P95, V3, and general (all clones), with their parameter estimates and accuracy measures

Clone	Equação	Equações selecionadas	R^2_{aj} (%)	Syx (g/cm ³)	Syx (%)
C2	1	$\log(DB) = -0,45293 - 6,23721 \times \left(\frac{1}{AMP_100}\right) + 23,96093 \times \left(\frac{1}{AMP_100^2}\right) + \varepsilon_i$	55,76	0,0296	6,27
	2	$\log(DB) = -0,848531 + 0,089751 \times \log(AMP_100) - 0,040788 \times \left(\frac{DAP}{ID}\right) + \varepsilon_i$	74,65	0,0221	4,68
	3	$\log(DB) = -0,313785 + 0,002776 \times (AMP_100) - 7,116263 \times \left(\frac{1}{HD}\right) + 1,074338 \times \left(\frac{ID}{HD}\right) - 0,025168 \times (DG) + \varepsilon_i$	83,12	0,0179	3,79
	4	$\log(DB) = -0,51664 + 25,39691 \times \left(\frac{1}{DG^2}\right) - 8,12747 \times \left(\frac{1}{HD}\right) - 0,02553 \times \left(\frac{HD}{ID}\right) + 0,05905 \times \log(DAP) + \varepsilon_i$	81,61	0,0189	4,01
C4	1	$\log(DB) = -1,25151 + 0,18498 \times \log(AMP_100) + \varepsilon_i$	52,65	0,0299	6,43
	2	$\log(DB) = -1,26465 + 0,09858 \times \log(AMP_100) + 0,13412 \times \log(DAP) - 0,03205 \times \left(\frac{DAP}{ID}\right) + \varepsilon_i$	67,98	0,0245	5,30
	3	$\log(DB) = -0,377443 + 0,005635 \times (AMP_100) + 1,055221 \times \left(\frac{1}{ID}\right) - 8,359632 \times \left(\frac{1}{HD}\right) - 0,045061 \times \left(\frac{DG}{ID}\right) - 0,038352 \times \left(\frac{HD}{ID}\right) + \varepsilon_i$	75,51	0,0217	4,66
	4	$DB = 0,356521 + 0,045001 \times (ID) - 0,007555 \times (HD) - 0,048039 \times \left(\frac{DG}{ID}\right) + 0,044823 \times \left(\frac{HD}{ID}\right) + \varepsilon_i$	70,92	0,0234	5,03
P95	1	$\log(DB) = -1,03690 + 0,10837 \times \log(AMP_100) + \varepsilon_i$	42,63	0,0191	4,05
	2	$\log(DB) = -1,05005 + 0,07605 \times \log(AMP_100) + 0,06851 \times \log(ID) + \varepsilon_i$	58,79	0,0161	3,40
	3	$\log(DB) = -0,51398 - 0,81933 \times \left(\frac{1}{AMP_100}\right) + 1,03235 \times \left(\frac{1}{ID}\right) - 127,49513 \times \left(\frac{1}{HD^2}\right) - 0,05317 \times \left(\frac{HD}{ID}\right) + 1,54040 \times \left(\frac{1}{DG}\right) + \varepsilon_i$	69,40	0,0140	2,97
	4	$DB = 0,050871 - 0,016848 \times (HD) + 0,043759 \times (DG) + 15,756850 \times \left(\frac{1}{DG}\right) - 21,719118 \times \left(\frac{1}{HD}\right) + 0,103751 \times \left(\frac{DG}{ID}\right) - 0,069141 \times \left(\frac{HD}{ID}\right) + 0,019075 \times \log(DAP) + \varepsilon_i$	63,77	0,0152	3,22

Continua...

Tabela 3 – Equações selecionadas para predição da densidade básica a 1,3 m de altura dos clones C2, C4, P95, V3 e geral (todos os clones), com as respectivas estimativas dos parâmetros e medidas de precisão (continuação...)

Table 3 – Selected equations to predict the density at 1,3 m in height of clones C2, C4, P95, V3, and general (all clones), with their parameter estimates and accuracy measures

Clone	Equação	Equações selecionadas	R ² _{aj} (%)	Syx (g/cm ³)	Syx (%)
V3	1	$\log(DB) = -0,6877 - 1,0586 \times \left(\frac{1}{AMP_{100}}\right) + \varepsilon_i$	19,47	0,0207	4,51
	2	$\log(DB) = -0,65615 - 0,48395 \times \left(\frac{1}{AMP_{100}}\right) - 0,29566 \times \left(\frac{1}{ID}\right) - 1,44171 \times \left(\frac{1}{DAP}\right) + 2,33154 \times \left(\frac{1}{HT}\right) + \varepsilon_i$	50,59	0,0135	2,95
	3	$\log(DB) = 0,52184 + 0,11468 \times \log(HD) - 0,43698 \times \left(\frac{1}{AMP_{100}}\right) - 0,38803 \times \log(DG) - 0,47451 \times \left(\frac{1}{ID}\right) - 1,91687 \times \left(\frac{1}{DAP}\right) - 0,11268 \times \log(HT) + \varepsilon_i$	69,54	0,0119	2,60
	4	$\log(DB) = 0,023264 + 0,549124 \times \left(\frac{1}{ID}\right) - 0,127101 \times \left(\frac{DG}{ID}\right) + 0,025834 \times \left(\frac{HD}{ID}\right) - 2,540784 \times \left(\frac{1}{DAP}\right) - 0,151850 \times \log(HT) + \varepsilon_i$	67,39	0,0123	2,68
Geral	1	$\log(DB) = -1,144325 + 0,146185 \times \log(AMP_{100}) + \varepsilon_i$	45,95	0,0262	5,62
	2	$\log(DB) = -0,757045 + 0,006296 \times (AMP_{100}) - 0,370420 \times \left(\frac{1}{ID}\right) + \varepsilon_i$	63,93	0,0215	4,60
	3	$DB = 0,3990 + 0,00008129 \times (AMP_{100})^2 - 21,55 \times \left(\frac{1}{HD^2}\right) + 0,2159 \times \left(\frac{ID}{HD}\right) + 0,7264 \times \left(\frac{1}{DG}\right) + \varepsilon_i$	68,80	0,0201	4,31
	4	$\log(DB) = -2,14976 + 0,08492 \times (ID) - 0,58907 \times \log(HD) - 0,44046 \times \log(ID) - 0,05974 \times \left(\frac{DG}{ID}\right) - 16,29842 \times \left(\frac{1}{HD}\right) + 0,04346 \times \log(DAP) + \varepsilon_i$	61,29	0,0226	4,85

DB – densidade básica (g/cm³); AMP₁₀₀ – amplitude média dada pelo Resistógrafo® na árvore (%); ID – idade em anos; DAP – diâmetro a 1,30 m do solo (cm); HT – altura total das árvores (m); HD – altura média das árvores dominantes (m); DG – diâmetro médio quadrático (cm²); R²_{aj} – coeficiente de determinação ajustado e Syx – erro padrão residual.

A modelagem da densidade básica, utilizando apenas o Resistógrafo®, propiciou seleção de equações com coeficiente de determinação corrigido (R^2_{aj}) de 19,47% para o clone V3, de 42,63% para o clone P95, de 52,65% para o clone C4 e de 55,76% para o clone C2, sendo este coeficiente de 45,95% para a equação de predição para o conjunto dos 4 clones avaliados. Ao avaliar o poder preditivo do Resistógrafo®, com base no erro padrão residual das equações, temos que este variou de 0,0299 g/cm³ (ou 6,43%) para o clone C4 a 0,0191 g/cm³ (ou 4,05%) para o clone P95, sendo 0,0262 g/cm³ (ou 5,62%) para os 4 clones.

Lima *et al* (2007) ajustaram um modelo linear simples em função apenas da amplitude para 7 clones, em somente uma idade, e obtiveram um coeficiente de determinação igual a 64,00%, com erro padrão da regressão igual a 0,036 g/cm³. Em outro estudo, Lima *et al* (2006) ajustaram modelos lineares simples com base no Resistógrafo® para predição de densidade de dois clones aos 7 anos de idade e obtiveram equações com R^2 variando de 49,90% a 65,90% e erro padrão de 0,014 g/cm³ a 0,012 g/cm³. Essas variações foram obtidas com os mesmos clones, mas tomando medidas do Resistógrafo® em direções diferentes na árvore (Norte-Sul e Sul-Norte), e também com a média de amplitude nas diferentes posições.

A inclusão de variáveis dendrométricas, associando-as aos dados do Resistógrafo® (amplitude), melhorou a precisão das equações selecionadas para cada um dos quatro genótipos avaliados e também para o conjunto deles, propiciando aumento do coeficiente de determinação e redução do erro padrão de predição. Esses ganhos foram verificados com inclusão de variáveis de fácil obtenção, associadas ao indivíduo (DAP, idade e altura total) e aumentados ao acrescentar variáveis relacionadas à população (altura média dominante e diâmetro médio quadrático).

Ao trabalhar a modelagem da densidade básica eliminando os dados do Resistógrafo® e usando apenas variáveis dendrométricas, verificou-se comportamento diferente do grupo dos quatro clones em relação a cada um isoladamente. Para o conjunto dos clones (equação geral), a eliminação do Resistógrafo® permitiu ajuste de uma equação que apresentou ganhos apenas

sobre a equação cuja variável preditora foi o Resistógrafo® (Figura 2). Já para cada clone em separado, as variáveis dendrométricas propiciaram melhor precisão não só em relação ao Resistógrafo®, mas também a este acrescentado das variáveis do indivíduo.

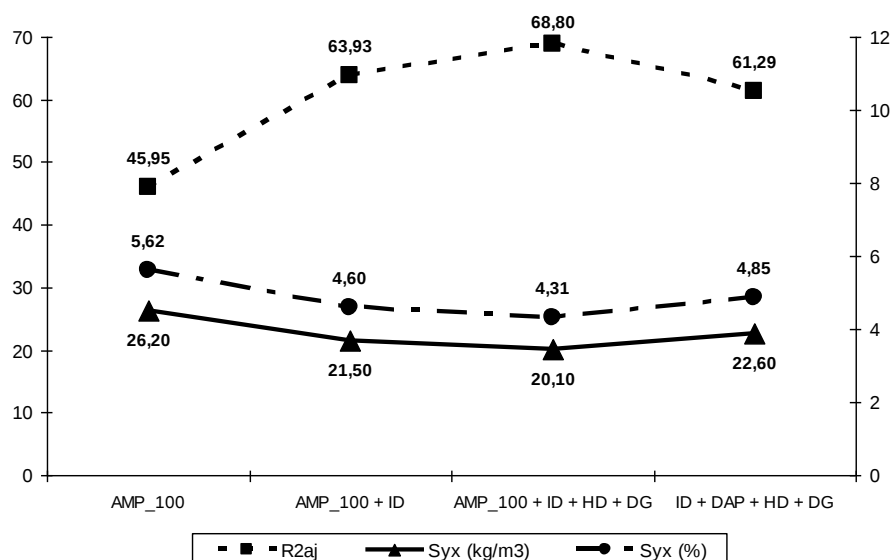


Figura 2. Variações nas medidas de precisão para o conjunto dos quatro clones ao utilizar somente o Resistógrafo® (AMP_100), ao acrescentar variáveis do indivíduo e da população (ID, DAP, HD e DG) e ao eliminar o Resistógrafo®.

Figure 2. Variations in accuracy for all four clones by using only the Resistograph® (AMP_100), adding variables of individual and population (ID, HD and DG) and to eliminate Resistograph®.

Voltando à análise das equações selecionadas para a predição da densidade básica geral (os quatro clones ao mesmo tempo), a que propiciou as melhores estimativas da densidade básica foi

$$DB = 0,3990 + 0,00008129 \times (AMP_100)^2 - 21,55 \times \left(\frac{1}{HD^2} \right) + 0,2159 \times \left(\frac{ID}{HD} \right) + 0,7264 \times \left(\frac{1}{DG} \right) + \varepsilon_i, \text{ em}$$

que DB é a densidade básica da árvore ao nível do DAP (g/cm³), AMP_100 é a média de amplitude coletada pelo Resistógrafo® (%), HD é a altura média das árvores dominantes (m) e ID é a idade da árvore (anos) e DG é o diâmetro médio quadrático da população onde a árvore avaliada se insere.

As medidas de precisão da equação acima revelam um erro padrão residual de 0,0201 g/cm³ (4,31%) na predição da densidade média das árvores, com um coeficiente de determinação múltipla ajustado (R^2_{aj}) de 68,80%, indicando ser este o poder explicativo do Resistógrafo® associado às variáveis citadas sobre a variação da densidade básica nas populações dos quatro genótipos avaliados.

A Figura 3 mostra a análise gráfica da melhor equação selecionada para predição da densidade básica dos 4 genótipos avaliados. Houve boa sobreposição dos valores de densidade básica estimada em relação à densidade básica observada (a), e dispersão de resíduos relativamente homogênea em torno da média zero (b e c), não apresentando tendências importantes de erro de estimativa dentro da faixa de densidade básica identificada na população de estudo. Em (d) é apresentada a dispersão dos resíduos “studentizados”, bem distribuída em torno da média zero, sem tendências evidentes, e com poucos dados fora da faixa de 95% de probabilidade pela estatística t.

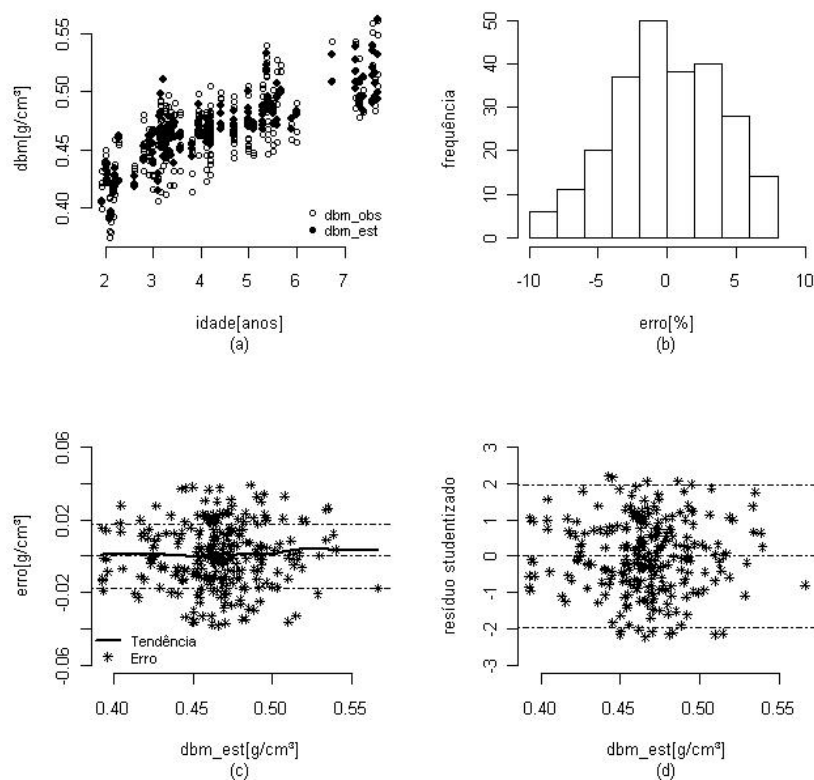


Figura 3. Análise gráfica da melhor equação selecionada para o conjunto dos quatro clones: (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em percentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos “studentizados”.

Figure 3. Graphic analysis of best fit equation selected for all four clones: (a) observed versus estimated density, (b) dispersion of the residuals as a percentage, (c) dispersal of residuals in g/cm³ and (d) dispersion of residuals “studentized” .

Os resultados indicam que o Resistógrafo® é uma ferramenta potencial para ser usada na amostragem de árvores visando à estimativa da densidade básica a 1,3 m de altura, por exemplo, em programas de melhoramento genético, quando em geral, além da possibilidade de amostragem, dados relativos ao indivíduo, como DAP, altura e idade, são facilmente obtidos. Entretanto, quando se trata de populações comerciais inventariadas, das quais o inventário florestal obtém também dados de variáveis relacionadas à população, como altura média das árvores dominantes e diâmetro médio

quadrático, estimativas tão ou mais precisas podem ser obtidas somente com tais variáveis, sem necessidade de amostragem pelo Resistógrafo®.

No Apêndice são apresentadas as tabelas de significância dos parâmetros ajustados para todas as equações apresentadas na Tabela 3, bem como os gráficos com sobreposição das densidades básicas estimadas sobre a densidade real determinada para cada árvore, a dispersão dos resíduos em % e na unidade real da densidade básica (g/cm^3) e a dispersão dos resíduos “studentizados”.

4 Conclusões

As variáveis diâmetro a 1,30 m de altura (DAP), altura total (HT), altura dominante (HD), idade (ID), diâmetro médio quadrático (DG) e diferentes médias das amplitudes obtidas através do Resistógrafo® correlacionaram significativamente com a densidade básica das árvores, com maior magnitude dessa correlação para a idade, seguida da amplitude média coletada pelo Resistógrafo®.

Os tratamentos dos dados de amplitude não melhoraram a correlação desta com a densidade básica, sendo a melhor forma de apresentação da média de amplitude a AMP_100, com eliminação apenas de dados não pertencentes à madeira.

As equações selecionadas, ajustadas em função do Resistógrafo®, validam seu potencial para modelagem da densidade básica.

A inclusão de variáveis do nível árvore, associadas ao Resistógrafo®, aumentou a precisão das estimativas. Maior aumento de precisão foi ainda obtido ao incluir variáveis do nível população.

Para o conjunto dos quatro clones, a equação ajustada em função das variáveis dendrométricas foi mais precisa na estimativa da densidade básica do que o ajuste feito apenas em função do Resistógrafo®.

Para cada clone isoladamente, o uso das variáveis dendrométricas permitiu maior precisão que o Resistógrafo® e também que este associado a apenas variáveis do nível árvore.

5 Referências Bibliográficas

- ALZATE, S. B. A.; FILHO, M. T.; PIEDADE, S. M. F. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm e *E. grandis* x *E. urophylla*. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, n. 68, p. 87-95. 2005.
- ANDRADE, C. R.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SORAGI, L. C.; OLIVEIRA, A. C. Relação entre a densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus* e os ensaios não-destrutivos. In: XI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA. EBRAMEM. **Anais**. Londrina, PR. 11 p. 2008.
- EISFELD, R.; EISFELD, C. L.; FERREIRA, J. M.; PIMENTEL, A.; RODRIGUES, F.; ALMEIDA, A. Modelagem da massa específica básica dos cavacos a partir de variáveis dendrométricas e da massa específica do disco. **Floresta**. Curitiba, PR., v. 39, n. 4, p. 877-886. 2009.
- FOELKEL, C. E.; MORA, E.; MENOCELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., Campos do Jordão. **Anais**. P.719- 728. 1990.
- GOMES, A. F. Avaliação das características da madeira e da polpa de *Eucalyptus* mediante a aplicação de métodos não destrutivos na árvore viva. **Dissertação de Mestrado**. UFLA, Lavras. 2007. 124 p.
- GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C.; SILVA, C. M. Caracterização tecnológica para produção de celulose da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.1, p.129-137. 2005.
- GOUVÊA, A. F. G.; TRUGILHO, P. F.; COLODETTE, J. L.; GOMES, C. M.; ALVES, I. C.; GOMES, F. J. B.; SOUZA, E. **Relação funcional entre os métodos não destrutivos e a produção de polpa celulósica**. Poster. In: 42o CONGRESSO E EXPOSIÇÃO INTERNACIONAL DE CELULOSE E PAPEL. ABTCP, São Paulo, 26 a 29 de outubro de 2009.
- HANSEN, C. P. Application of the pilodyn in Forest tree improvement. DFSC – Danida Forest seed Centre, Denmark. Series of Technical Notes, number 55. 2000.
- HERRERA, M. E. F. Densidade básica e equações de peso de madeira seca de povoamentos de eucaliptos de acordo com a idade, local, espécie e método de regeneração. **Dissertação de Mestrado** – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 1989. 113 p.
- LIMA, J. T.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M. Adequação do Resistograph para a estimativa da densidade básica da madeira de *Eucalyptus*. In: 10º ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA - EBRAMEM. **Anais**. São Pedro, SP. 16 p. 2006.
- LIMA, J. T.; SARTÓRIO, R. C.; TRUGILHO, P. F.; CRUZ, C. R.; VIEIRA, R. S. Uso do resistógrafo para estimar a densidade básica e a resistência à

perfuração da madeira de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, n. 75, p. 85-93. 2007.

LOPES, G. A.; GARCIA, J. N. Densidade básica e umidade natural da madeira de *Eucalyptus saligna* Smith, de Itatinga, associadas aos padrões de casca apresentados pela população. **Scientia Forestalis**, n. 62, p. 13-23. 2002.

LOPEZ, J.; GOMIDE, J. L.; PHILLIPS, R. Impacto da qualidade da madeira de eucalipto no desempenho financeiro de um modelo de fábrica brasileira de celulose. **O Papel**, São Paulo, v. 70, n. 07, p. 53-71. 2009.

MOKFIENSKI, A.; COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; CARVALHO, A. M. M. L. A importância relativa da densidade da madeira e do teor de carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 3, p. 401-413. 2008.

MOKFIENSKI, A.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. Importância da Densidade e do Teor de Carboidratos Totais da Madeira de Eucalipto no Desempenho da Linha de Fibra. In: COLÓQUIO INTERNACIONAL SOBRE CELULOSE KRAFT DE EUCALIPTO. Viçosa. Colóquio... p. 15-38. 2003.

QUEIROZ, S. C. S.; GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 901-909. 2004.

RINN, F.; SCHWEINGRUBER, F.H.; SCHAR, E. Resistograph and X-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. **Holzforschung**, Berlin, v.50, n.4, p.303-311. 1996.

SANTOS, C. R. **Qualidade da madeira e sua influência nas características de papéis de imprimir & escrever e tissue**. Monografia, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, M. G. 2002. 45 p.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; FILHO, M. T.; JÚNIOR, S. K.; MATOS, J. L. M. Influência da idade e da posição radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Revista Floresta**. Curitiba. 34 (1). p. 13-22. 2004.

THIERSCH, C. R. **Modelagem da densidade básica, do volume e do peso seco para plantios de clones de *Eucalyptus* sp.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 197 p. 2002.

THIERSCH, C. R.; SCOLFORO, J. R.; OLIVEIRA, A. D.; REZENDE, G. D. S. P.; MAESTRI, R. O uso de modelos matemáticos na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clones de *Eucalyptus* sp. **Cerne**. Lavras, v.12, n. 3, p. 264-278. 2006.

TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística**. 9ª Ed. Rio de Janeiro: LTC. 2005.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**. Lavras, v.2, n. 1, p. 94-111. 1996.

TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; SILVA, J. R.; LIMA, J. T. Influência da idade nas características físicas, químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. In: IUFRO CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPTS. Salvador 1997. **Anais**. Colombo: EMBRAPA/CPNF. V3. P. 269-275. 1997.

TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; BOTREL, M. C. G.; ANDRADE, C. R.; SORAGI, L. C. Utilização de métodos não destrutivos na avaliação de clones de *Eucalyptus* spp. 10º encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira. **Anais**. São Pedro. 2006.

VITAL, B. R. Efeito da idade da árvore na densidade da madeira de *Eucalyptus grandis* cultivado na região do cerrado de Minas Gerais. Brasília: IBDF, Brasília. Boletim técnico 8, p. 49-52. 1987.

6 Apêndice

Tabela 5- Estimativa dos parâmetros da equação linear múltipla selecionada para o clone C2 (equação 1 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	-0,45293	0,04846	-9,347	1,02e-11 ***
β_1	-6,23721	1,14139	-5,465	2,49e-06 ***
β_2	23,96093	5,73992	4,174	0,000152 ***

Significância: '***' 0.001 '**' 0,01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.0

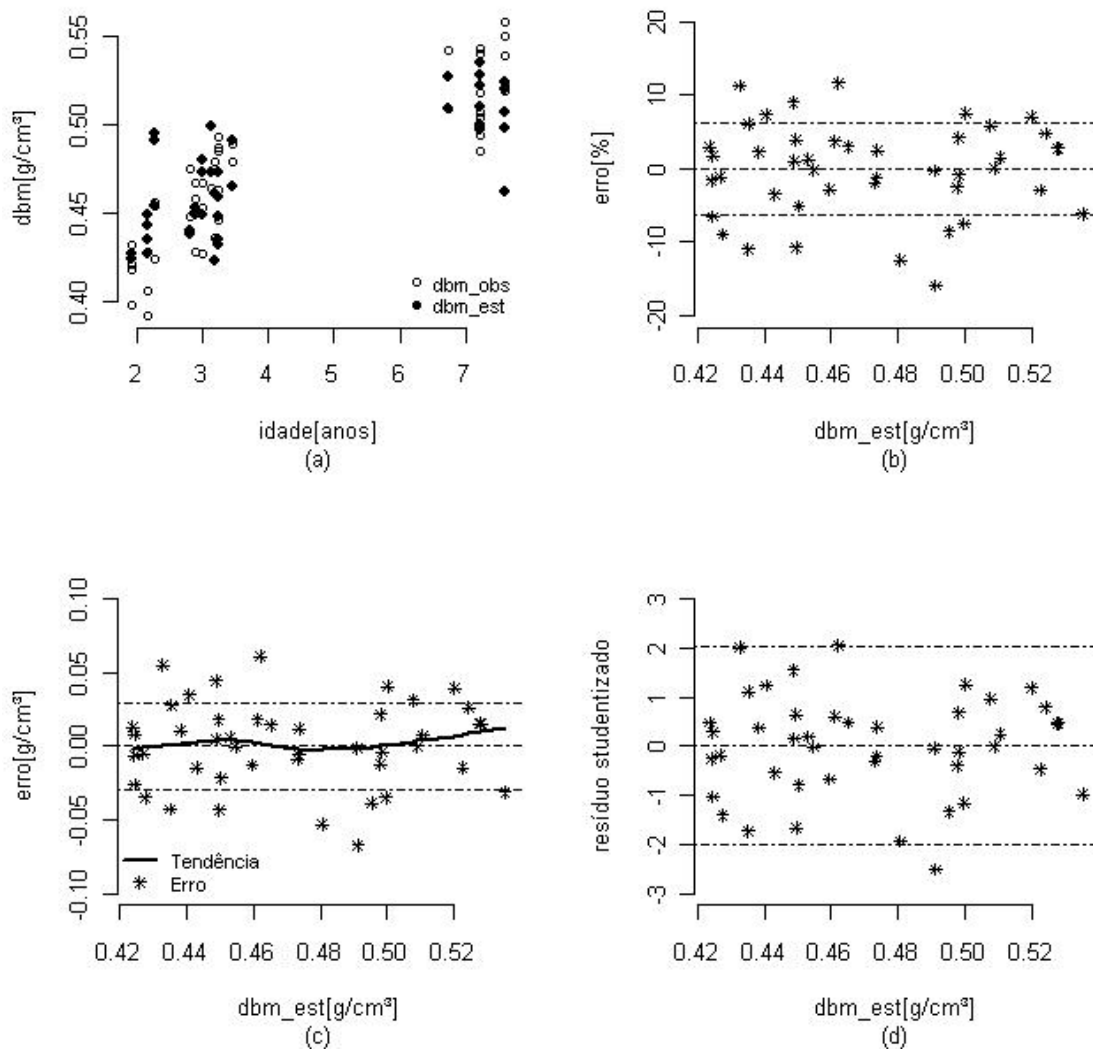


Figura 4. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em porcentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos “studentizados”, para a equação linear múltipla selecionada para o clone C2 (equação 1 da Tabela 3).

Tabela 6- Estimativa dos parâmetros da equação linear múltipla selecionada para o clone C2 (equação 2 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	-0,848531	0,062829	-13,505	< 2e-16 ***
β_1	0,089751	0,017935	5,004	1,11e-05 ***
β_2	-0,040788	0,006277	-6,498	8,47e-08 ***

Significância: '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1,0

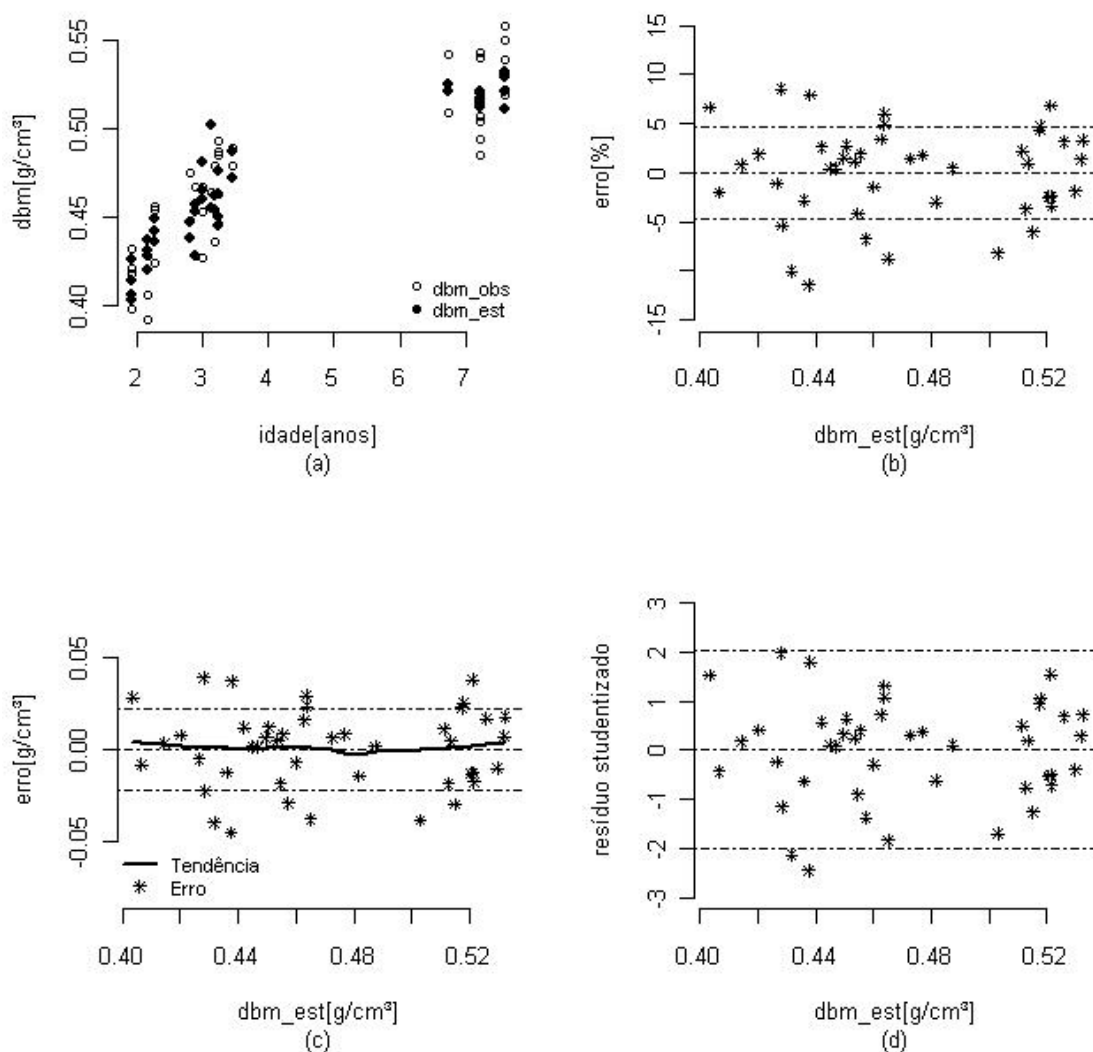


Figura 5. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em porcentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos “studentizados”, para a equação linear múltipla selecionada para o clone C2 (equação 2 da Tabela 3).

Tabela 7- Estimativa dos parâmetros da equação linear múltipla selecionada para o clone C2 (equação 3 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	-0,313785	0,130312	-2,408	0,020870 *
β_1	0,002776	0,001477	1,879	0,067722 .
β_2	-7,116263	1,220513	-5,831	8,90e-07 ***
β_3	1,074338	0,173712	6,185	2,87e-07 ***
β_4	-0,025168	0,006878	-3,659	0,000747 ***

Significância: '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1,0

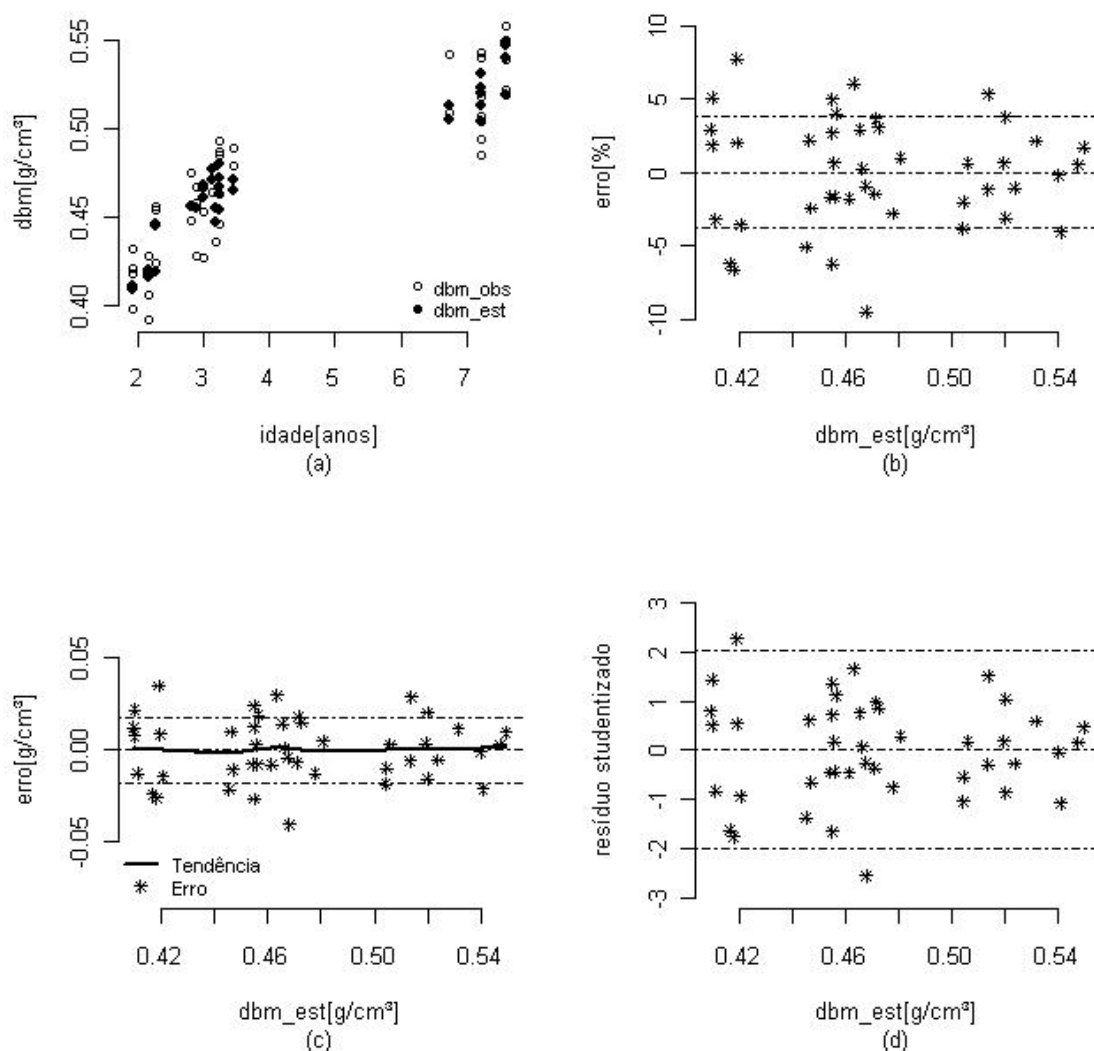


Figura 6. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em percentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos “studentizados”, para a equação linear múltipla selecionada para o clone C2 (equação 3 da Tabela 3).

Tabela 8- Estimativa dos parâmetros da equação linear múltipla selecionada para o clone C2 (equação 4 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	-0,51664	0,12202	-4,234	0,000135 ***
β_1	25,39691	9,44153	2,690	0,010465 *
β_2	-8,12747	1,57716	-5,153	7,71e-06 ***
β_3	-0,02553	0,00417	-6,123	3,50e-07 ***
β_4	0,05905	0,04011	1,472	0,148992

Significância: '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1,0

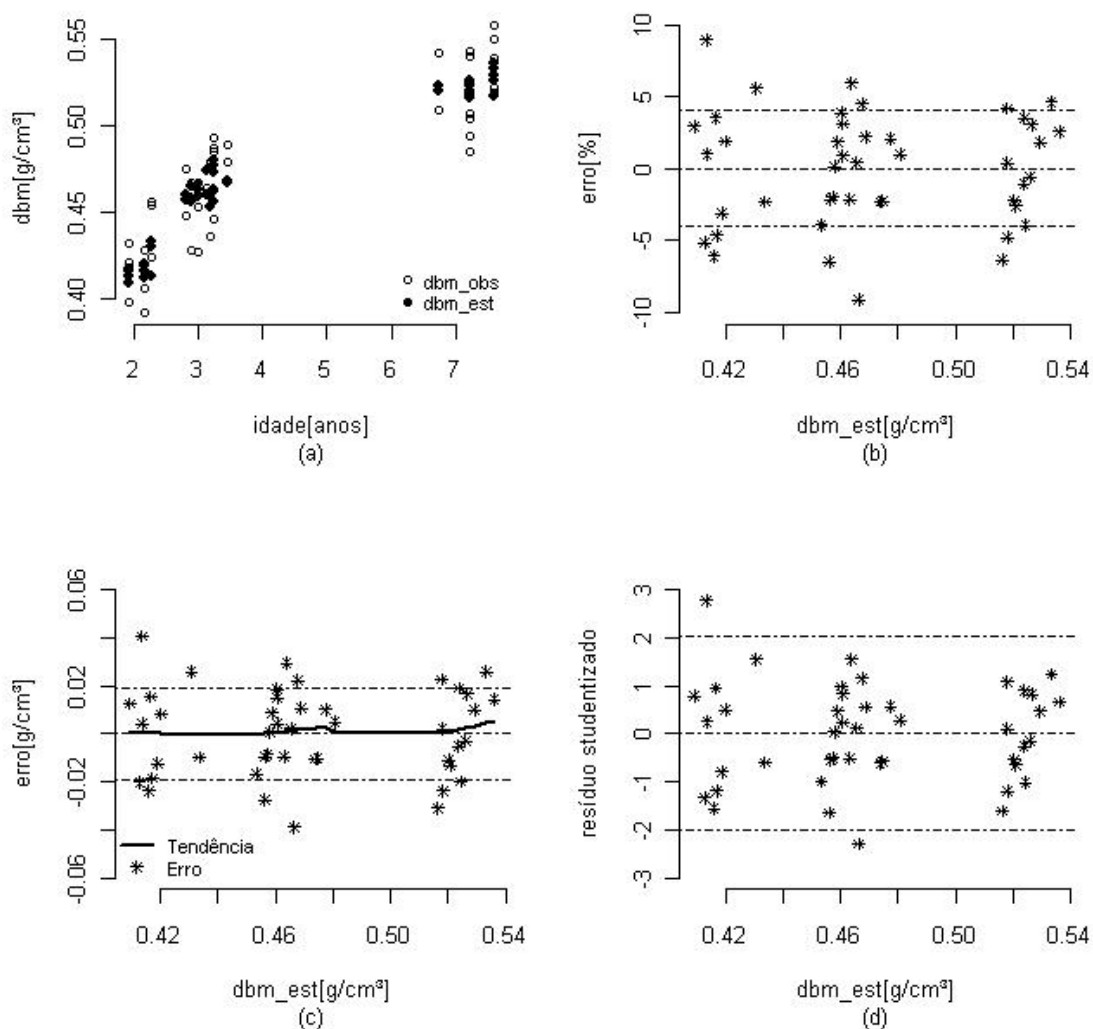


Figura 7. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em percentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos “studentizados”, para a equação linear múltipla selecionada para o clone C2 (equação 4 da Tabela 3).

Tabela 9- Estimativa dos parâmetros da equação linear simples selecionada para o clone C4 (equação 1 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	-1,25151	0,04859	-25,756	< 2e-16 ***
β_1	0,18498	0,01850	9,999	3,61e-16 ***

Significância: '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1,0

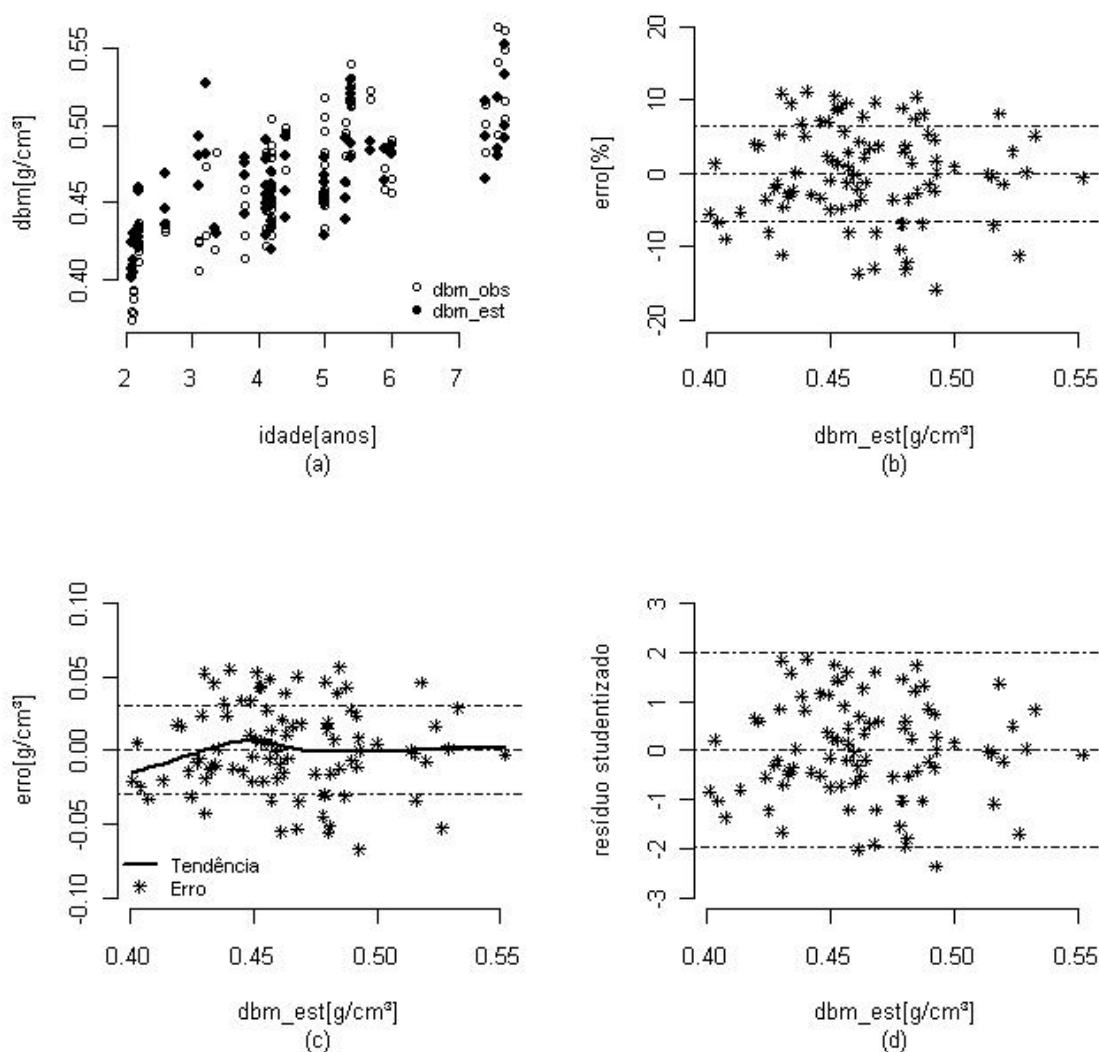


Figura 8. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em porcentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos “studentizados”, para a equação linear simples selecionada para o clone C4 (equação 1 da Tabela 3).

Tabela 10- Estimativa dos parâmetros da equação linear múltipla selecionada para o clone C4 (equação 2 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	-1,26465	0,06506	-19,439	< 2e-16 ***
β_1	0,09858	0,02005	4,917	4,17e-06 ***
β_2	0,13412	0,02714	4,941	3,79e-06 ***
β_3	-0,03205	0,00521	-6,151	2,35e-08 ***

Significância: '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1,0

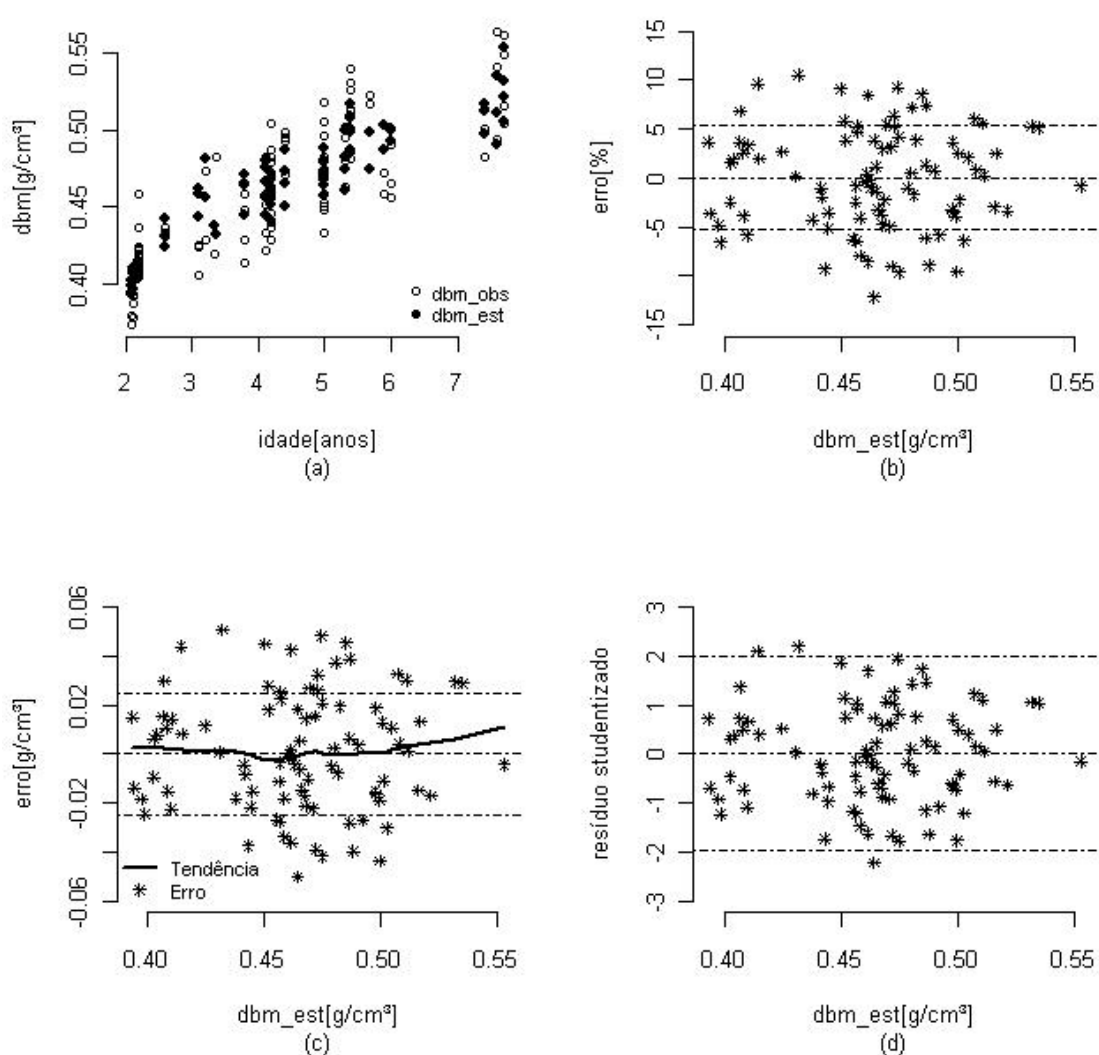


Figura 9. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em percentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos “studentizados”, para a equação linear múltipla selecionada para o clone C4 (equação 2 da Tabela 3).

Tabela 11- Estimativa dos parâmetros da equação linear múltipla selecionada para o clone C4 (equação 3 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	-0,377443	0,125169	-3,015	0,00339 **
β_1	0,005635	0,001114	5,059	2,45e-06 ***
β_2	1,055221	0,477797	2,209	0,02993 *
β_3	-8,359632	2,463950	-3,393	0,00106 **
β_4	-0,045061	0,021618	-2,084	0,04016 *
β_5	-0,038352	0,019657	-1,951	0,05438 .

Significância: '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1,0

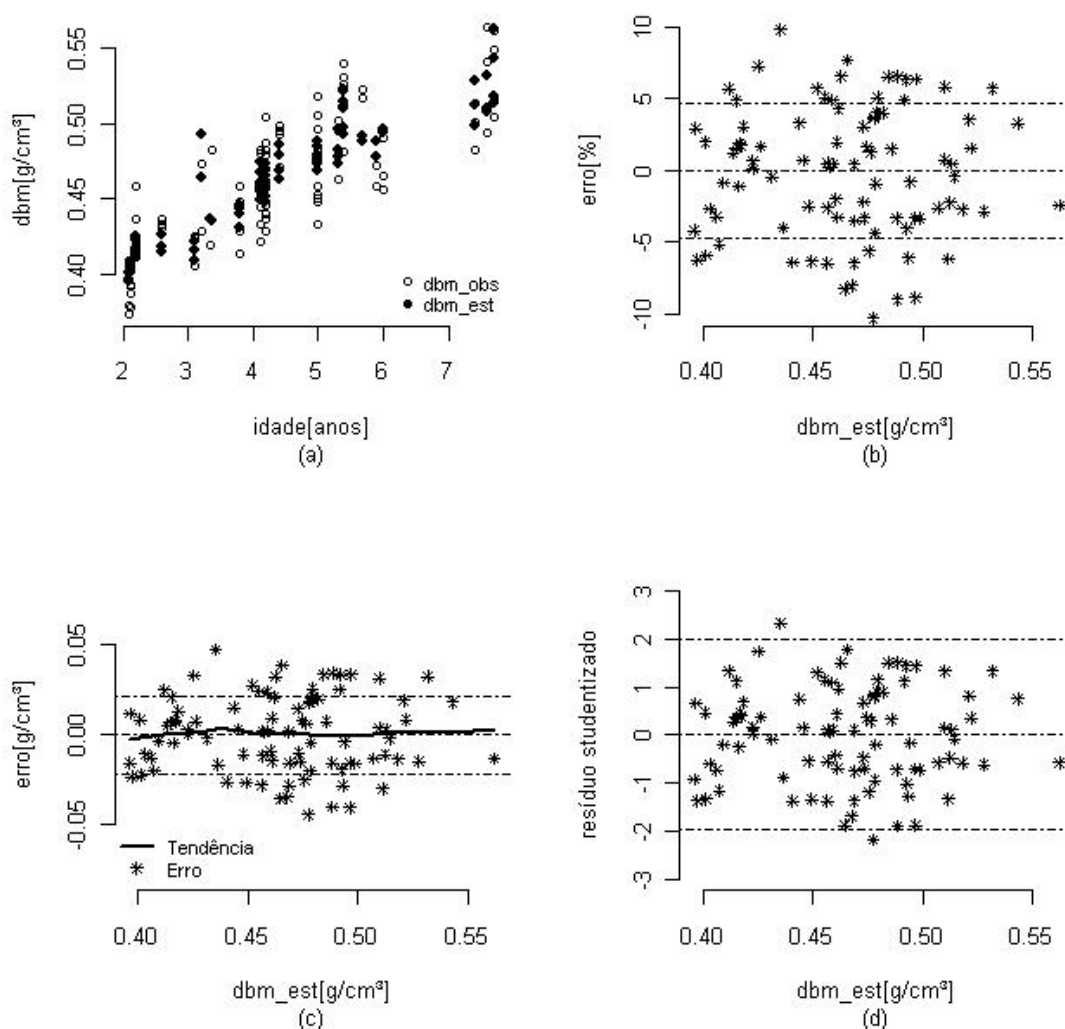


Figura 10. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em porcentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos

“studentizados”, para a equação linear múltipla selecionada para o clone C4 (equação 3 da Tabela 3).

Tabela 12- Estimativa dos parâmetros da equação linear múltipla selecionada para o clone C4 (equação 4 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	0,356521	0,032927	10,828	< 2e-16 ***
β_1	0,045001	0,008804	5,112	1,94e-06 ***
β_2	-0,007555	0,002207	-3,423	0,000954 ***
β_3	-0,048039	0,009814	-4,895	4,62e-06 ***
β_4	0,044823	0,010330	4,339	3,92e-05 ***

Significância: '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1,0

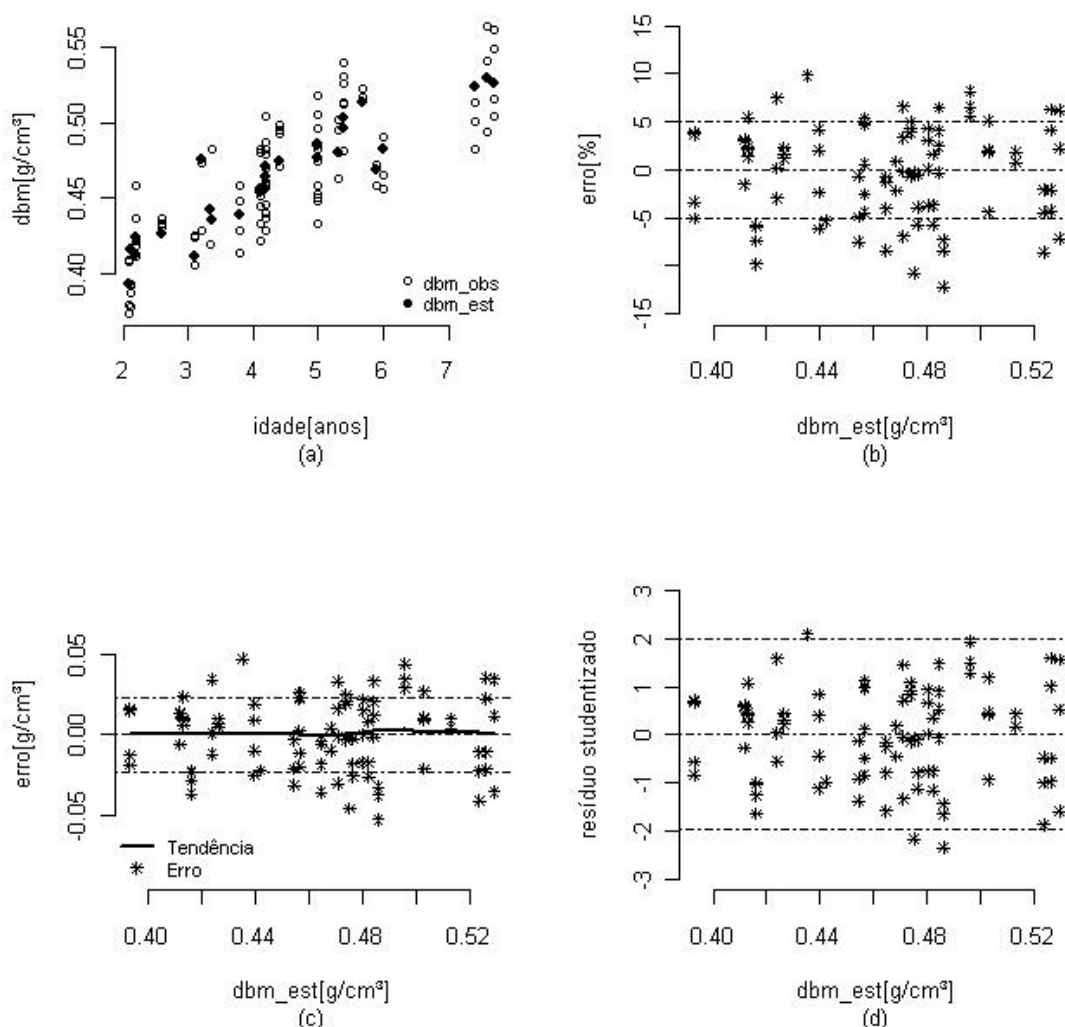


Figura 11. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em porcentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos “studentizados”, para a equação linear múltipla selecionada para o clone C4 (equação 4 da Tabela 3).

Tabela 13- Estimativa dos parâmetros da equação linear simples selecionada para o clone P95 (equação 1 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	-1,03690	0,04188	-24,758	< 2e-16 ***
β_1	0,10837	0,01579	6,861	4,02e-09 ***

Significância: '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1.0

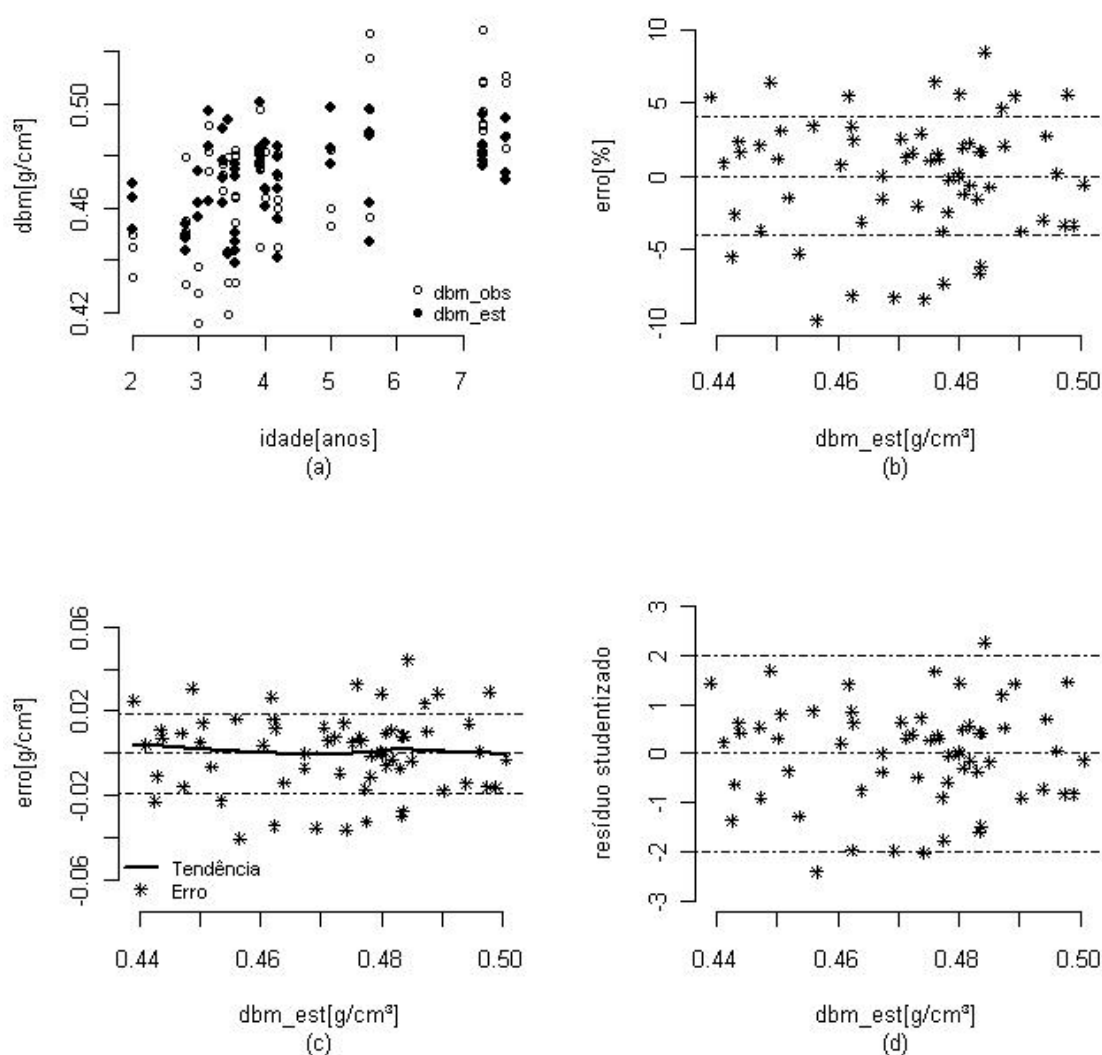


Figura 12. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em porcentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos “studentizados”, para a equação linear simples selecionada para o clone P95 (equação 1 da Tabela 3).

Tabela 14- Estimativa dos parâmetros da equação linear múltipla selecionada para o clone P95 (equação 2 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	-1,05005	0,03559	-29,500	< 2e-16 ***
β_1	0,07605	0,01487	5,114	3,47e-06 ***
β_2	0,06851	0,01373	4,991	5,46e-06 ***

Significância: '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1,0

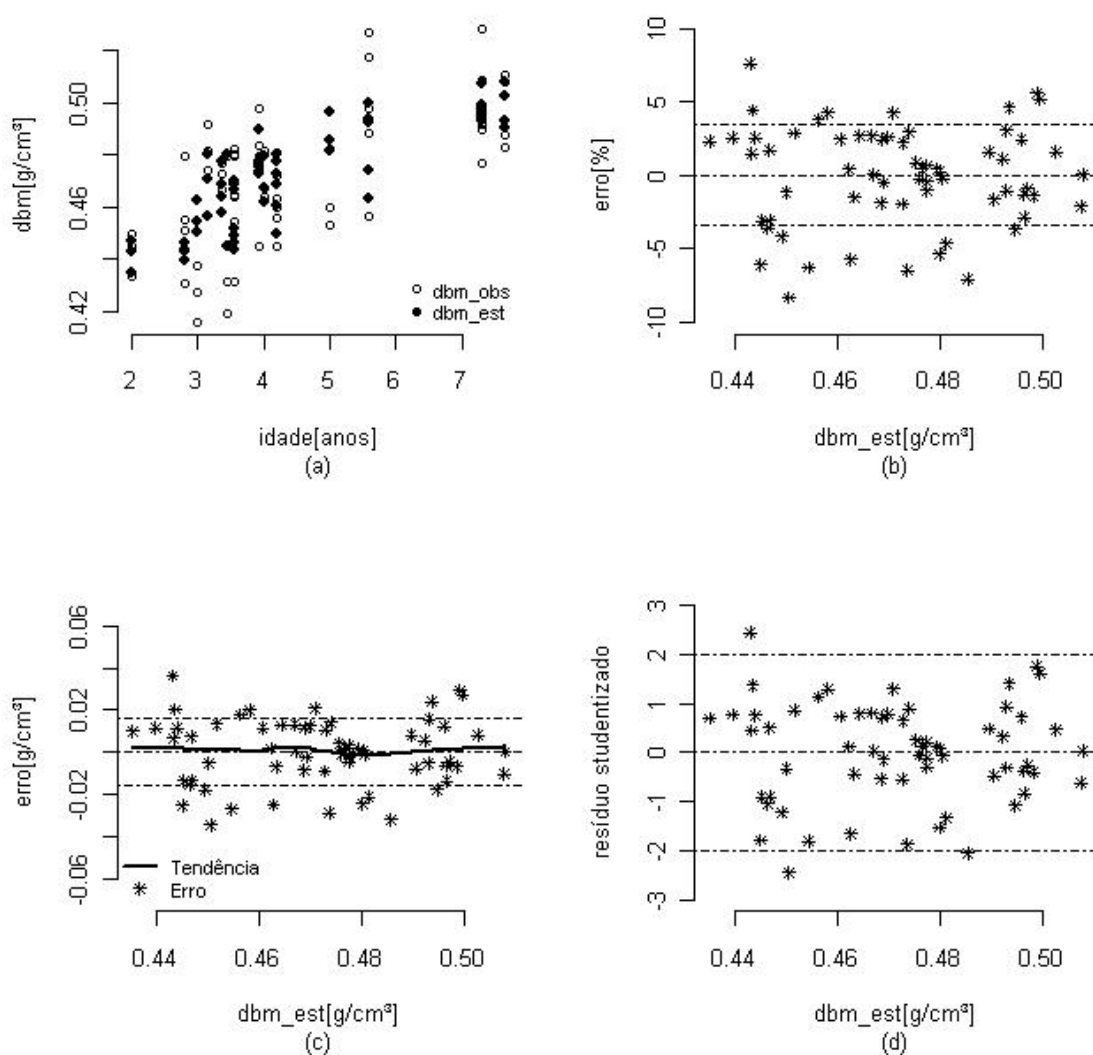


Figura 13. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em porcentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos “studentizados”, para a equação linear múltipla selecionada para o clone P95 (equação 2 da Tabela 3).

Tabela 15- Estimativa dos parâmetros da equação linear múltipla selecionada para o clone P95 (equação 3 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	-0,51398	0,05255	-9,781	8,43e-14 ***
β_1	-0,81993	0,16810	-4,878	9,00e-06 ***
β_2	1,03235	0,38960	2,650	0,010405 *
β_3	-127,49513	32,90895	-3,874	0,000279 ***
β_4	-0,05317	0,01806	-2,944	0,004686 **
β_5	1,54040	1,09956	1,401	0,166659

Significância: '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1,0

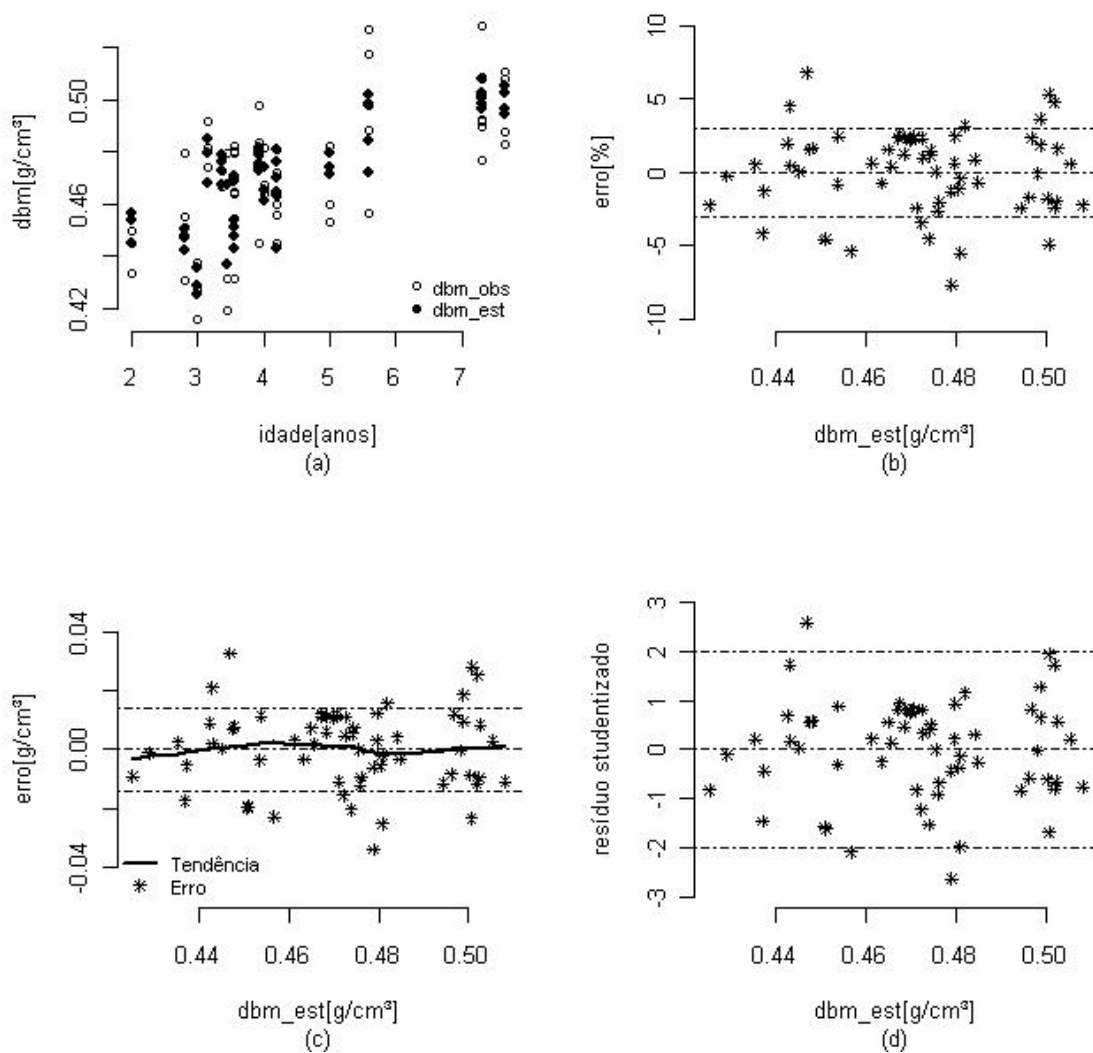


Figura 14. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em percentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos

“studentizados”, para a equação linear múltipla selecionada para o clone P95 (equação 3 da Tabela 3).

Tabela 16- Estimativa dos parâmetros da equação linear múltipla selecionada para o clone P95 (equação 4 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	0,050871	0,253113	0,201	0,841455
β_1	-0,016848	0,004076	-4,134	0,000123 ***
β_2	0,043759	0,012639	3,462	0,001044 **
β_3	15,756850	3,306321	4,766	1,42e-05 ***
β_4	-21,719118	3,891114	-5,582	7,55e-07 ***
β_5	0,103751	0,036577	2,836	0,006373 **
β_6	-0,069141	0,021992	-3,144	0,002687 **
β_7	0,019075	0,010895	1,751	0,085571 .

Significância: ‘****’ 0,001 ‘***’ 0,01 ‘**’ 0,05 ‘.’ 0,1 ‘.’ 1,0

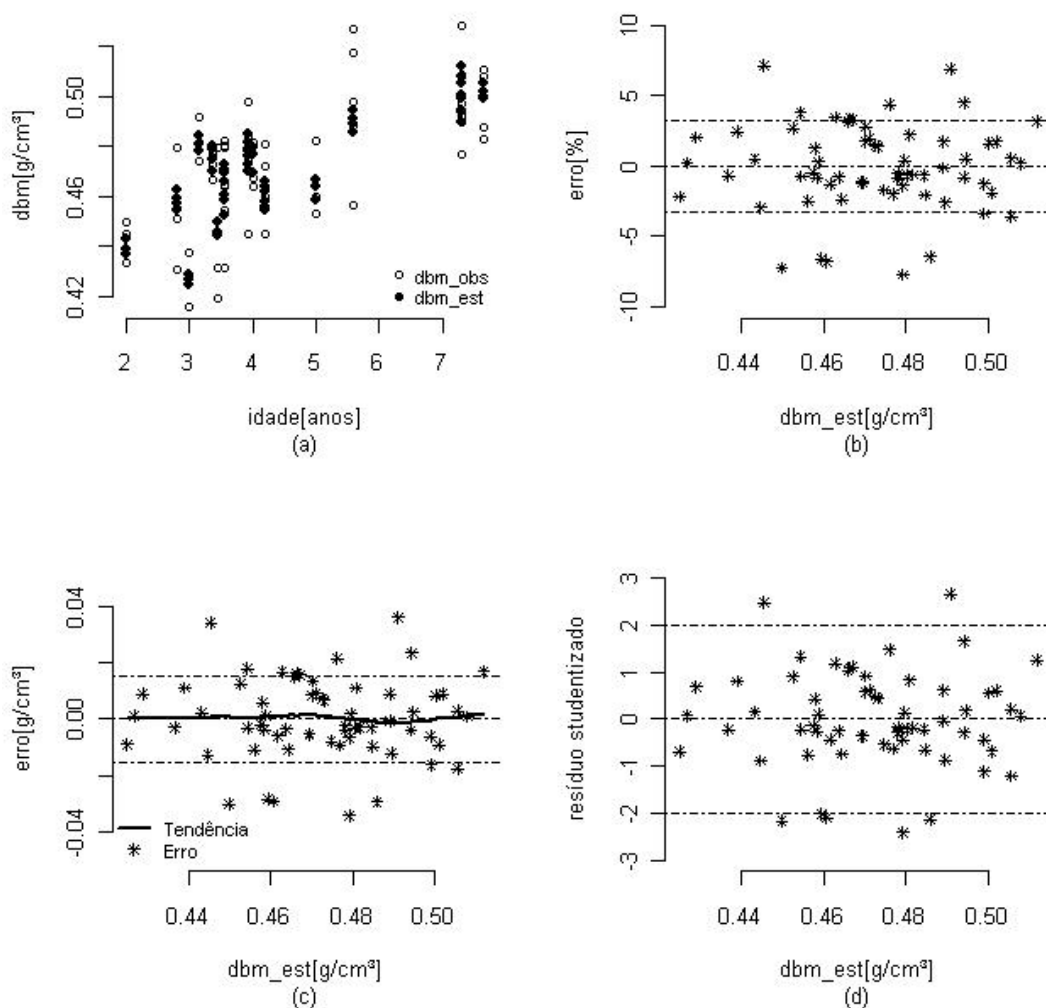


Figura 15. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em porcentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos “studentizados”, para a equação linear múltipla selecionada para o clone P95 (equação 4 da Tabela 3).

Tabela 17- Estimativa dos parâmetros da equação linear simples selecionada para o clone V3 (equação 1 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	-0,6877	0,0242	-28,416	< 2e-16 ***
β_1	-1,0586	0,2688	-3,938	0,000220 ***

Significância: ‘***’ 0.001 ‘**’ 0,01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1.0

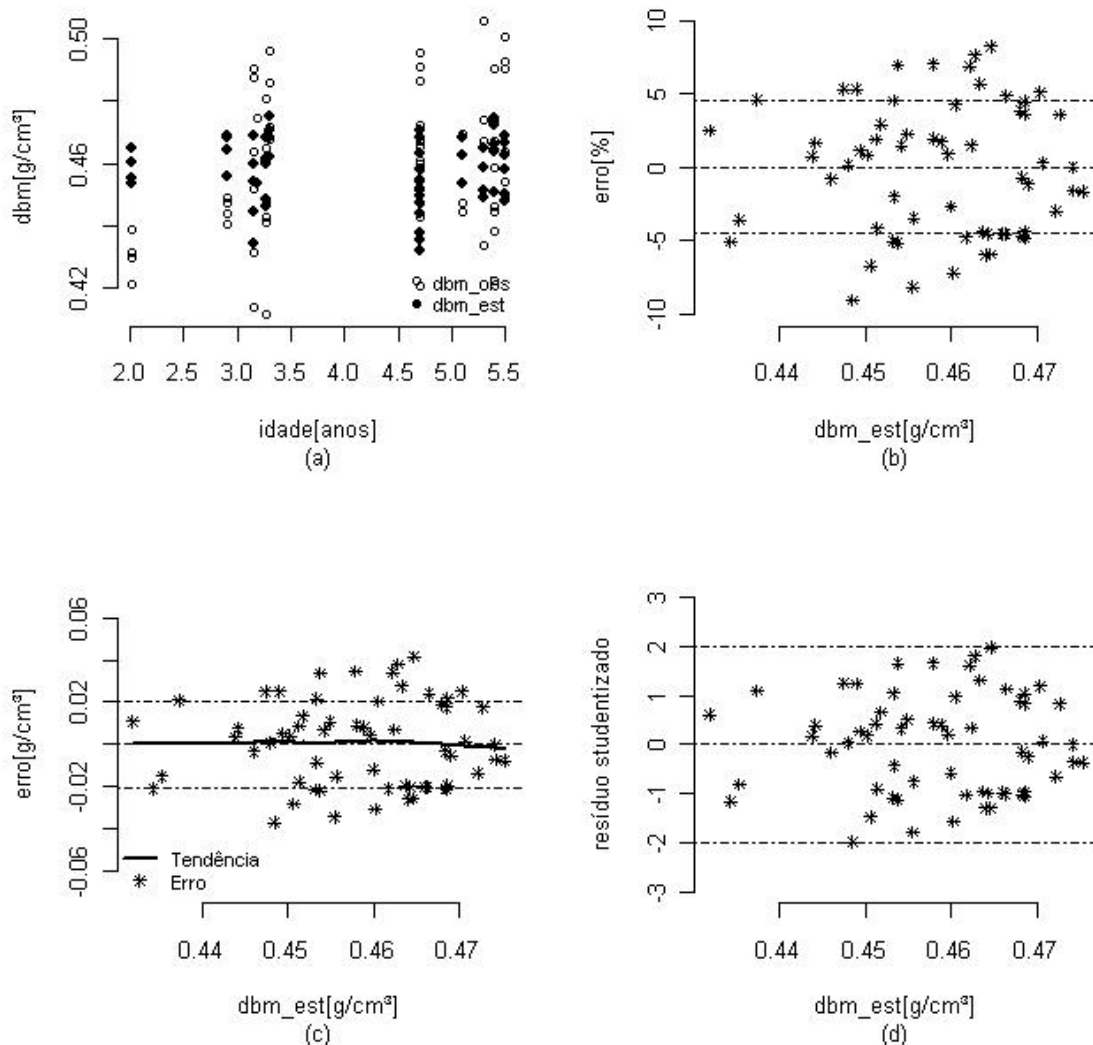


Figura 16. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em porcentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos “studentizados”, para a equação linear simples selecionada para o clone V3 (equação 1 da Tabela 3).

Tabela 18- Estimativa dos parâmetros da equação linear múltipla selecionada para o clone V3 (equação 2 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	-0,65615	0,03181	-20,624	< 2e-16 ***
β_1	-0,48395	0,22226	-2,177	0,0351 *
β_2	-0,29566	0,04866	-6,075	3,09e-07 ***
β_3	-1,44171	0,67332	-2,141	0,0381 *
β_4	2,33154	1,29409	1,802	0,0788 ,

Significância: '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1,0

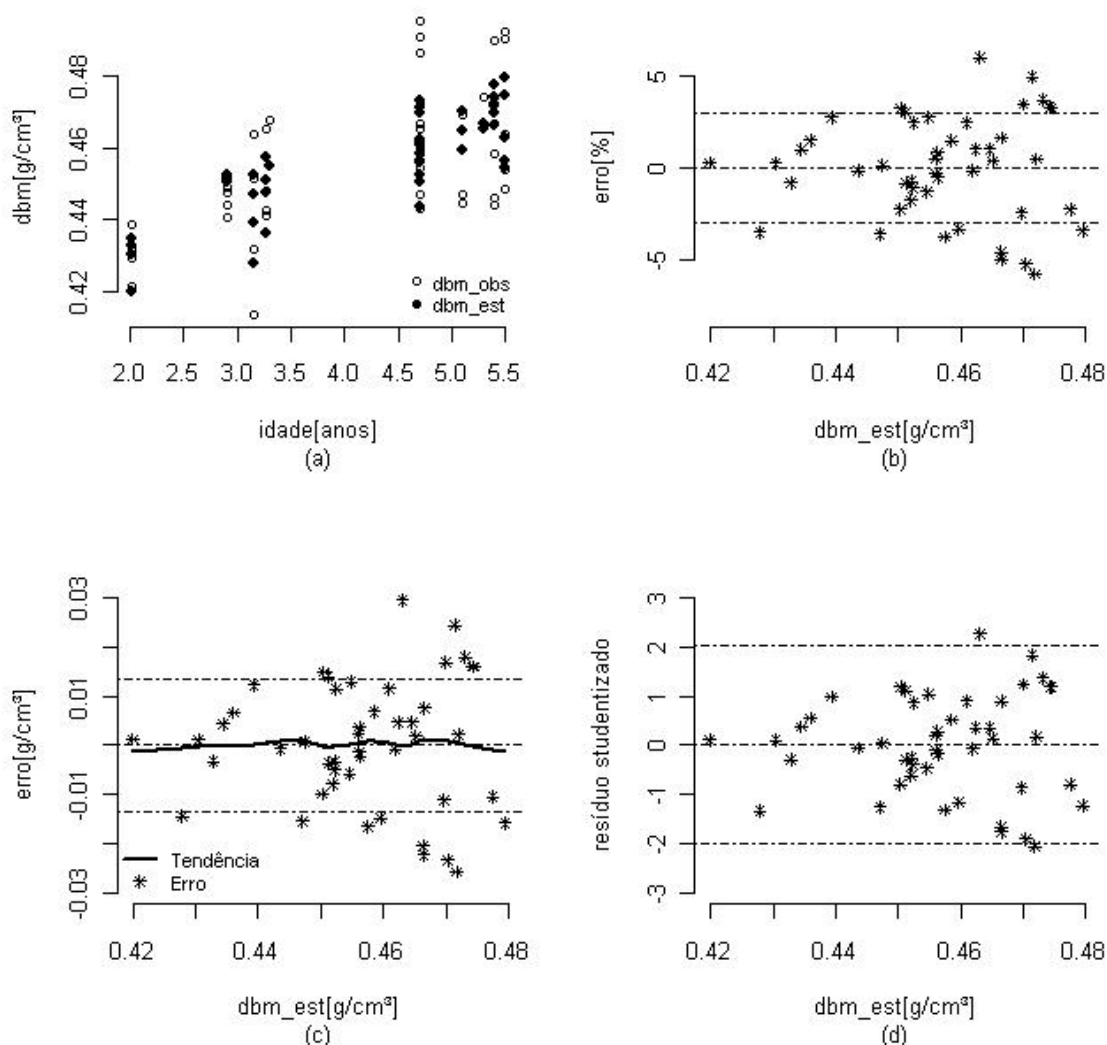


Figura 17. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em porcentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos “studentizados”, para a equação linear múltipla selecionada para o clone V3 (equação 2 da Tabela 3).

Tabela 19- Estimativa dos parâmetros da equação linear múltipla selecionada para o clone V3 (equação 3 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	0,52184	0,29911	1,745	0,08873 ,
β_1	0,11468	0,04812	2,383	0,02201 *
β_2	-0,43698	0,20061	-2,178	0,03534 *
β_3	-0,38803	0,08869	-4,375	8,46e-05 ***
β_4	-0,47451	0,07826	-6,063	3,85e-07 ***
β_5	-1,91687	0,67271	-2,849	0,00689 **
β_6	-0,11268	0,06473	-1,741	0,08940 ,

Significância: '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1,0

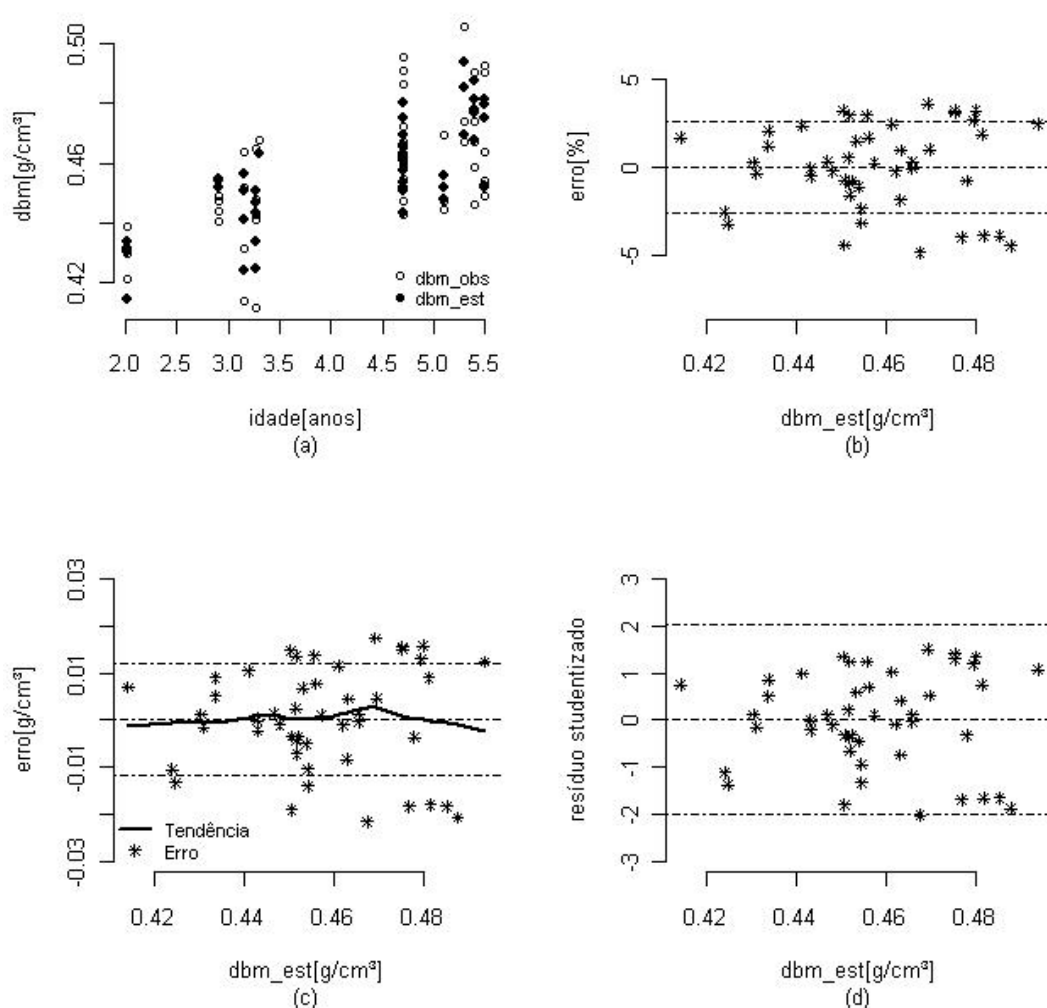


Figura 18. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em porcentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos “studentizados”, para a equação linear múltipla selecionada para o clone V3 (equação 3 da Tabela 3).

Tabela 20- Estimativa dos parâmetros da equação linear múltipla selecionada para o clone V3 (equação 4 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	0,023264	0,245791	0,095	0,925054
β_1	0,549124	0,218877	2,509	0,016161 *
β_2	-0,127101	0,026635	-4,772	2,33e-05 ***
β_3	0,025834	0,007945	3,252	0,002298 **
β_4	-2,540784	0,628426	-4,043	0,000227 ***
β_5	-0,151850	0,064422	-2,357	0,023273 *

Significância: '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1,0

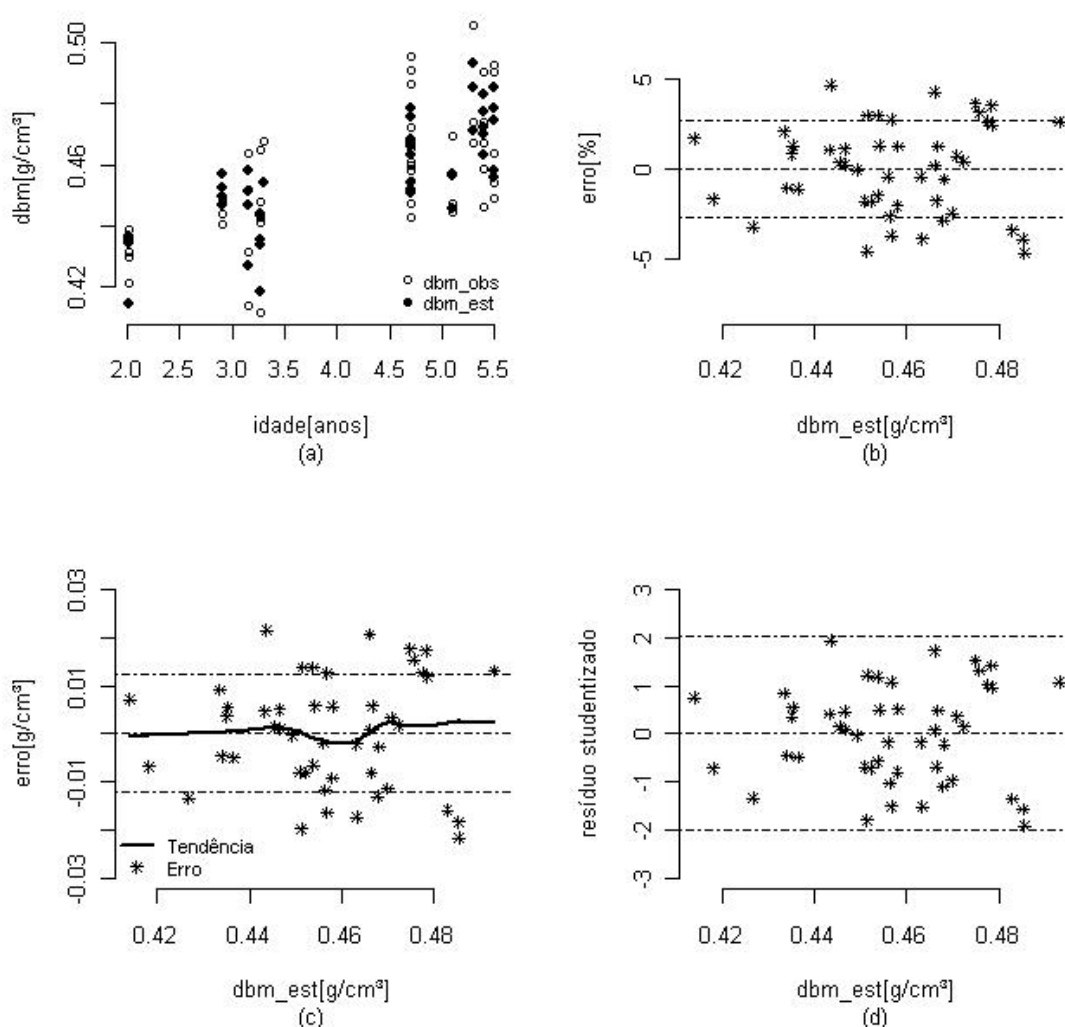


Figura 19. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em porcentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos

“studentizados”, para a equação linear múltipla selecionada para o clone V3 (equação 4 da Tabela 3).

Tabela 21- Estimativa dos parâmetros da equação linear simples selecionada para os 4 clones (equação 1 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	-1,144325	0,025809	-44,34	<2e-16 ***
β_1	0,146185	0,009866	14,82	<2e-16 ***

Significância: ‘***’ 0,001 ‘**’ 0,01 ‘*’ 0,05 ‘.’ 0,1 ‘ ’ 1,0

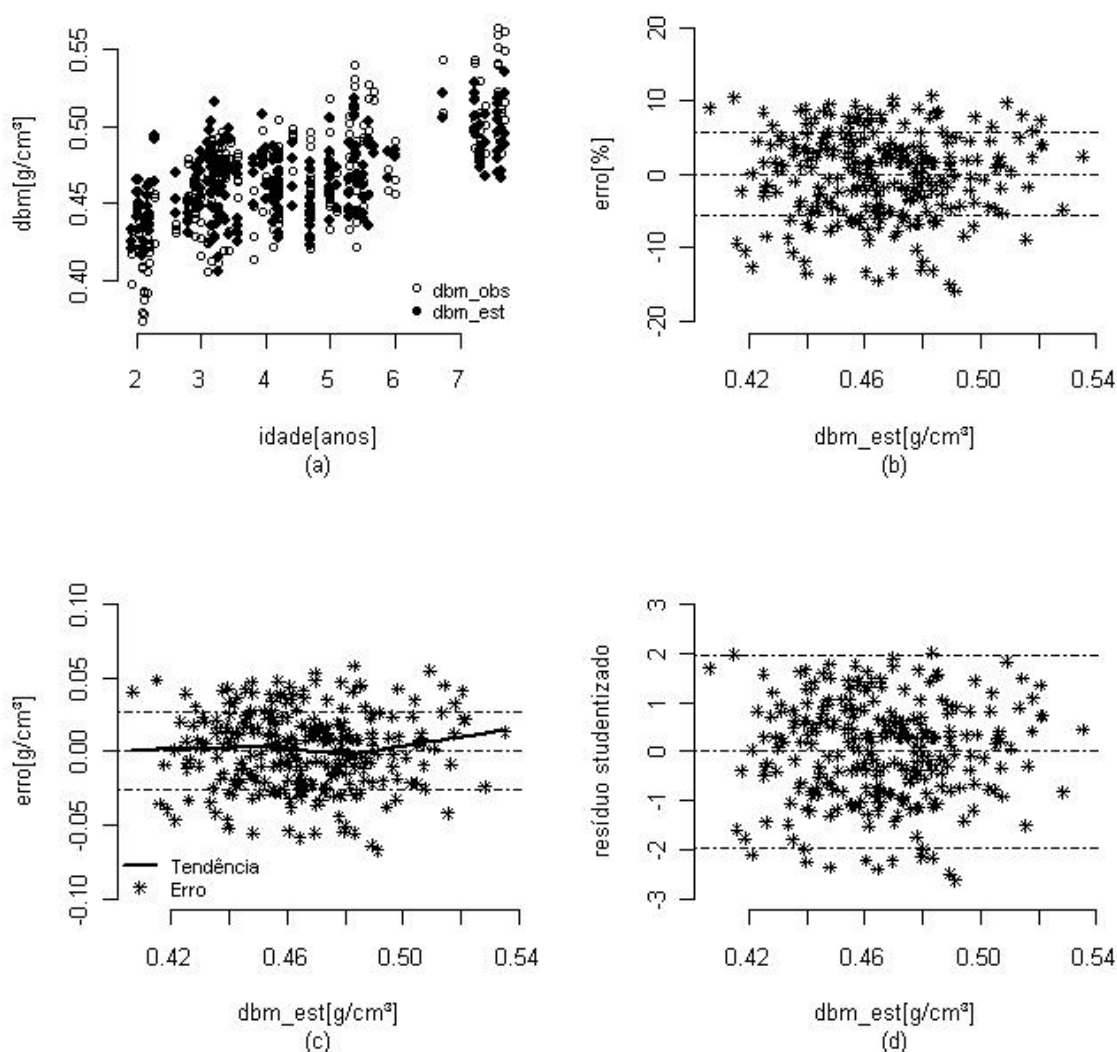


Figura 20. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em percentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos “studentizados”, para a equação linear simples selecionada para os 4 clones (equação 1 da Tabela 3).

Tabela 22- Estimativa dos parâmetros da equação linear múltipla selecionada para os 4 clones (equação 2 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	-0,757045	0,015340	-49,35	<2e-16 ***
β_1	0,006296	0,000628	10,03	<2e-16 ***
β_2	-0,370420	0,032103	-11,54	<2e-16 ***

Significância: '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1,0

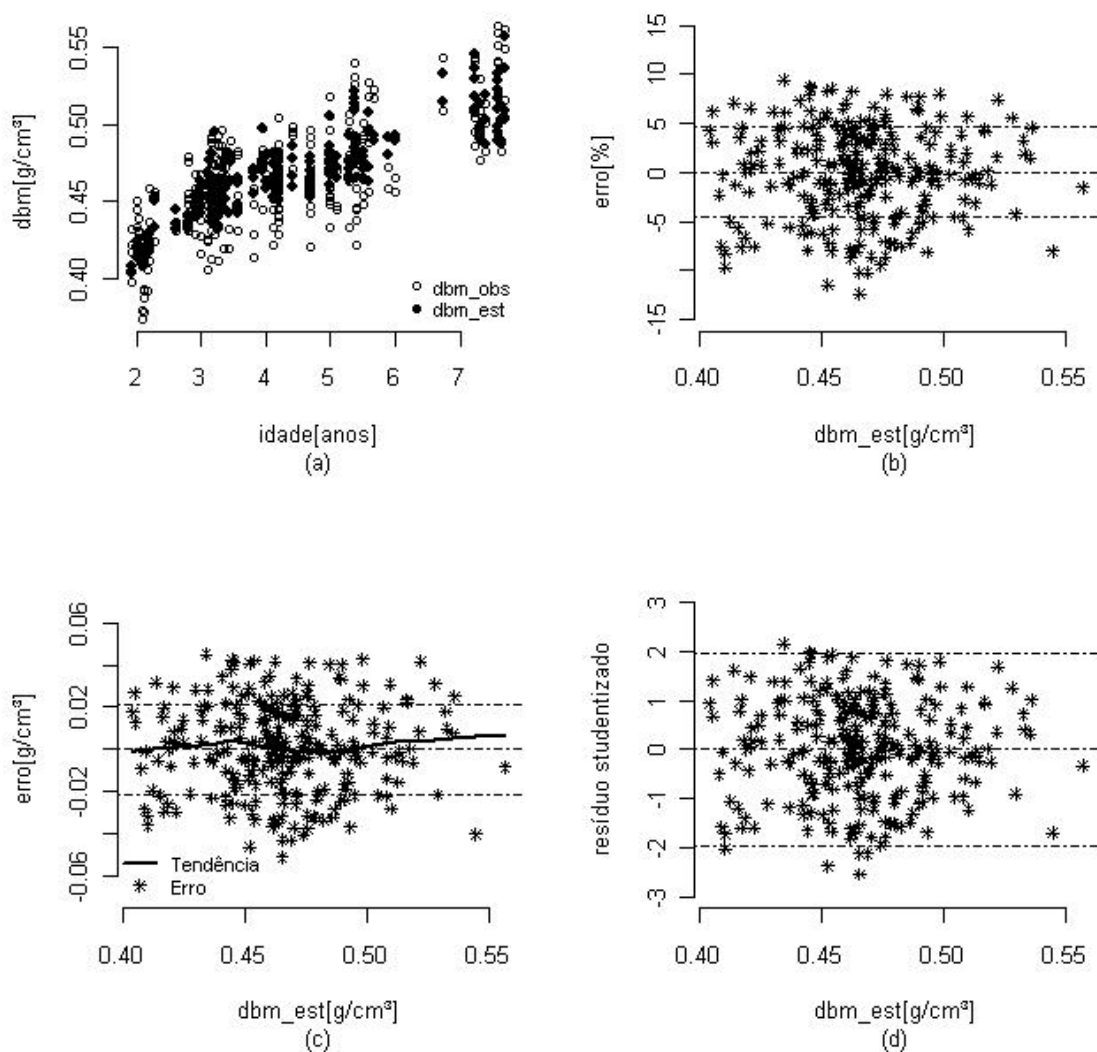


Figura 21. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em porcentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos “studentizados”, para a equação linear múltipla selecionada para os 4 clones (equação 2 da Tabela 3).

Tabela 23- Estimativa dos parâmetros da equação linear múltipla selecionada para os 4 clones (equação 3 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	0,3990	0,01818	21,944	< 2e-16 ***
β_1	0,00008129	0,000008111	10,022	< 2e-16 ***
β_2	-21,55	2,221	-9,704	< 2e-16 ***
β_3	0,2159	0,03717	5,808	1,89e-08 ***
β_4	0,7264	0,2395	3,033	0,00267 **

Significância: '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1,0

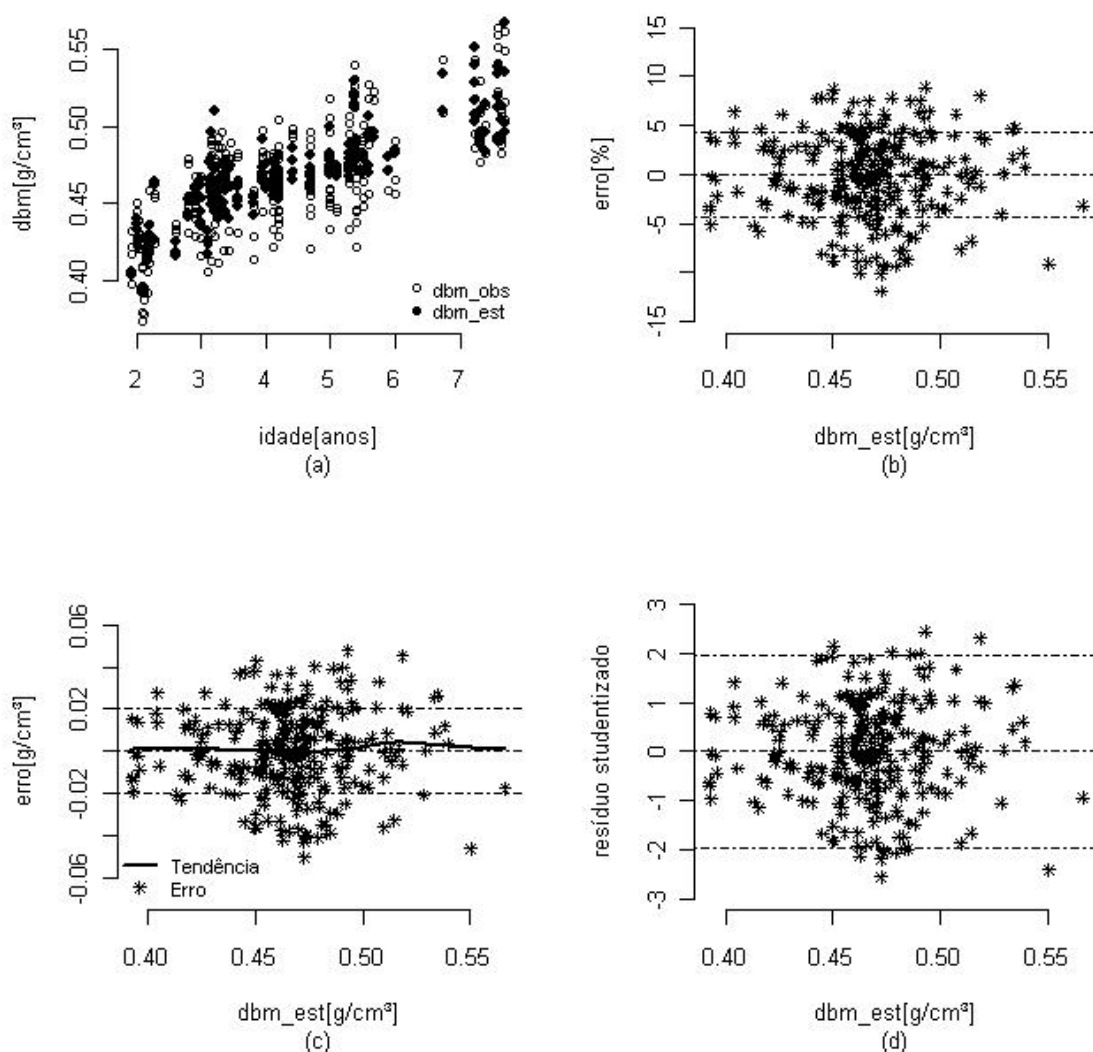


Figura 22. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em porcentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos “studentizados”, para a equação linear múltipla selecionada para os 4 clones (equação 3 da Tabela 3).

Tabela 24- Estimativa dos parâmetros da equação linear múltipla selecionada para os 4 clones (equação 4 da Tabela 3)

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
β_0	2,14976	0,56190	3,826	0,000164 ***
β_1	0,08492	0,01543	5,504	9,18e-08 ***
β_2	-0,58907	0,12968	-4,542	8,65e-06 ***
β_3	-0,44046	0,10259	-4,293	2,52e-05 ***
β_4	-0,05974	0,01445	-4,133	4,88e-05 ***
β_5	-16,29842	2,76306	-5,899	1,18e-08 ***
β_6	0,04346	0,01608	2,703	0,007343 **

Significância: '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1,0

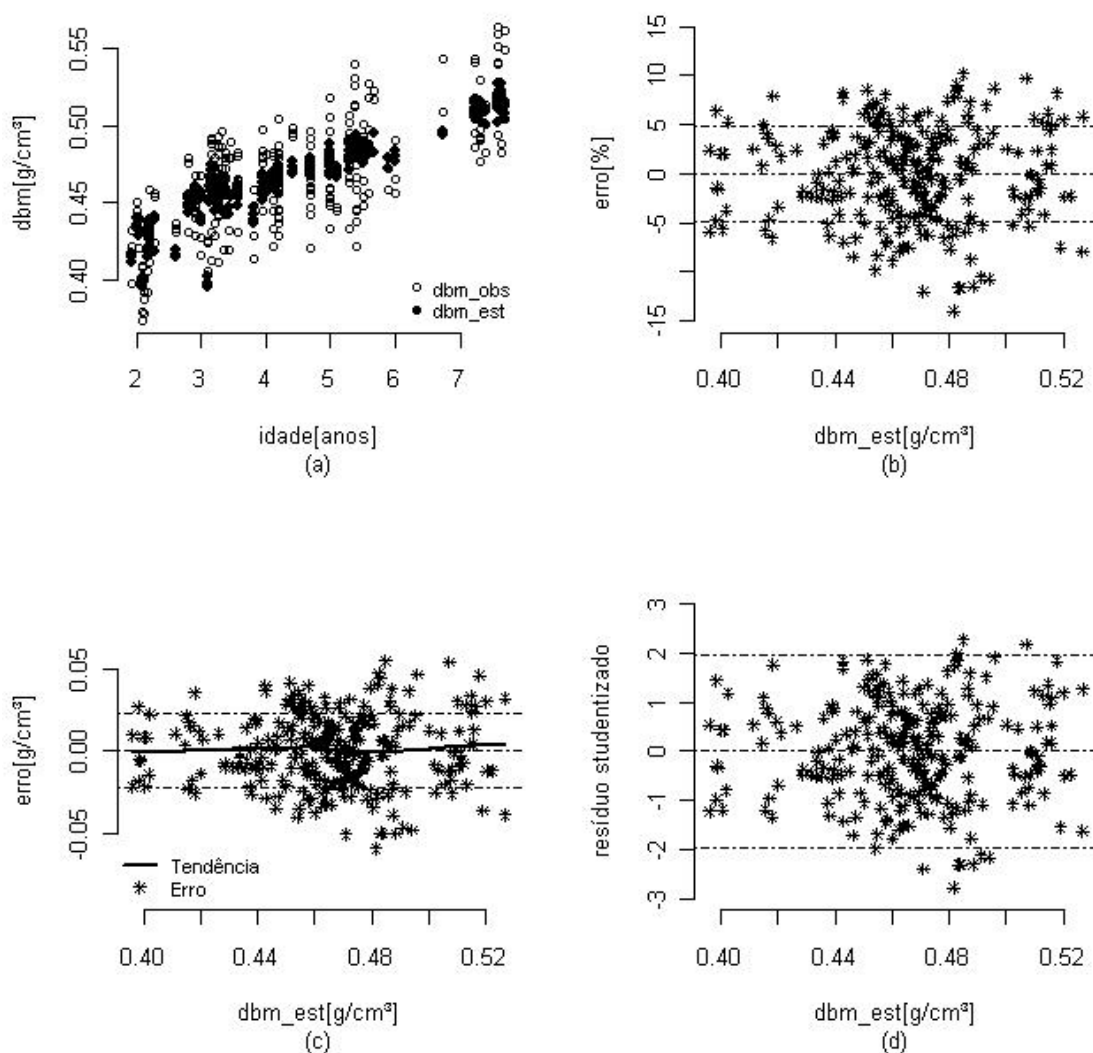


Figura 23. (a) densidade estimada versus observada, (b) dispersão dos resíduos em percentagem, (c) dispersão dos resíduos em g/cm³ e (d) dispersão dos resíduos

“studentizados”, para a equação linear múltipla selecionada para os 4 clones (equação 4 da Tabela 3).