

ESTUDO DAS CORRELAÇÕES E ESTIMATIVAS DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE MADEIRAS BRASILEIRAS COM APTIDÃO AO MANEJO FLORESTAL

STUDY OF THE CORRELATIONS AND ESTIMATES OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BRAZILIAN WOOD WITH CAPACITY TO FOREST MANAGEMENT

Henrique José Borges de Araujo<sup>1</sup>

RESUMO

Este estudo objetivou avaliar as correlações e realizar análises de regressão de propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras, oferecendo recursos matemáticos que permitam estimá-las. O estudo, baseado em uma amostra de dados de 163 espécies, contribui ao melhor conhecimento das madeiras brasileiras no aspecto tecnológico e também auxilia na identificação de espécies alternativas para o manejo florestal sustentável. As propriedades utilizadas foram: densidade básica ( $\rho_{bas}$ ), contração tangencial ( $\epsilon_{r,3}$ ) e radial ( $\epsilon_{r,2}$ ), dureza Janka paralela ( $f_{H0}$ ) e transversal ( $f_{H90}$ ) às fibras, e as relativas à resistência a esforços mecânicos de compressão ( $f_{c0}$  e  $E_{c90}$ ), flexão estática ( $f_M$  e  $E_{M0}$ ), tração ( $f_{wt90}$ ), fendilhamento ( $f_{v0}$ ) e cisalhamento ( $f_{s0}$ ). As propriedades com as mais altas relações funcionais foram  $f_{c0}$ ,  $f_{H90}$ ,  $\rho_{bas}$ ,  $f_M$ ,  $f_{H0}$ ,  $E_{M0}$ ,  $f_{s0}$  e  $E_{c90}$  e as com as mais baixas foram  $\epsilon_{r,3}$ ,  $\epsilon_{r,2}$ ,  $f_{wt90}$  e  $f_{v0}$ . As análises de regressão possibilitaram a obtenção de equações satisfatórias para estimativas das propriedades físicas e mecânicas de madeiras de espécies brasileiras com as mais altas relações funcionais.

**Palavras-chave:** madeira tropical, propriedades físicas da madeira, propriedades mecânicas da madeira, manejo florestal.

ABSTRACT

This study is intended to evaluate the correlations and make the regression analysis of physical and mechanical properties of Brazilian tropical wood and to offer mathematical tools that allow the estimation of them. The study, based on data from a sample of 163 species, contributes to better knowledge of Brazilian wood in the technological aspect and also help in the identification of species alternatives for sustainable forest management. The properties used were: basic density ( $\rho_{bas}$ ), tangential ( $\epsilon_{r,3}$ ) and radial ( $\epsilon_{r,2}$ ) shrinkages, Janka hardness parallel ( $f_{H0}$ ) and crossection ( $f_{H90}$ ) to the grain, and those properties related to the resistance to mechanical efforts of compression ( $f_{c0}$  and  $E_{c90}$ ), static bending ( $f_M$  and  $E_{M0}$ ), traction ( $f_{wt90}$ ), cleavage ( $f_{v0}$ ) and shear ( $f_{s0}$ ). The properties with the highest functional relationships were  $f_{c0}$ ,  $f_{H90}$ ,  $\rho_{bas}$ ,  $f_M$ ,  $f_{H0}$ ,  $E_{M0}$ ,  $f_{s0}$  and  $E_{c90}$  and the lowest were  $\epsilon_{r,3}$ ,  $\epsilon_{r,2}$ ,  $f_{wt90}$  and  $f_{v0}$ . The regression analyses made possible the obtaining of satisfactory equations for estimates of the physical and mechanical properties of Brazilian tropical wood species with the highest functional relationships.

**Key words:** tropical wood, physical properties of the wood, mechanical properties of the wood, forest management.

INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades físicas e mecânicas das madeiras (PFMM) é fundamental para definir adequadamente as aplicações a que serão destinadas e dimensionar, com segurança, as partes componentes de uma estrutura com esse material. Restrito às PFMM, a indicação de uma madeira para determinada aplicação considera atributos referentes ao seu peso, ao comportamento frente às condições ambientais (umidade, principalmente) e, também, aos limites de resistência mecânica correspondentes aos esforços a que estarão sujeitas nas situações de uso.

Embora já se tenha ensaiado um grande número de espécies de madeira, ainda restam muitas a serem estudadas. Araujo (2002), ao realizar extenso levantamento na literatura acerca das PFMM de 197 espécies ocorrentes em uma floresta no Acre, na Região Amazônica, encontrou o nome científico completo (gênero e espécie) de apenas 74 (37,5%) delas, sendo que 113 (57,4%) espécies foram localizadas somente ao nível de gênero, e 10 (5,1%) não foram encontradas na literatura.

A fim de avaliar as relações funcionais existentes entre as PFMM de espécies tropicais brasileiras, procedeu-se o estudo de suas correlações e de suas dependências funcionais (análises de regressão). Este estudo, baseado em uma amostra de dados de 163 espécies, tem como objetivo conhecer o grau de correspondência entre essas propriedades e, ao mesmo tempo, oferecer recursos matemáticos (equações de regressão) que possibilitem estimativas para espécies ainda não estudadas.

As informações apresentadas contribuem para o melhor conhecimento de nossos recursos florestais madeireiros tanto no aspecto tecnológico como também auxiliando na identificação de espécies alternativas em substituição àquelas tradicionais em via de escassez. Tal conhecimento é fundamental para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de sistemas de manejo florestal sustentável, em especial na região amazônica.

<sup>1</sup>. Engenheiro Florestal, Pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA Acre; Rodovia BR-364, km 14, CEP 69908-970, Rio Branco, AC; E-mail: henrique@cpafac.embrapa.br

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Entre as PFMM, a massa específica (densidade) é a que mais se destaca. Essa propriedade tem relação direta com a composição química da madeira e revela a quantidade do material lenhoso da parede celular, estando, dessa maneira, estreitamente relacionada com outras propriedades (NAHUZ, 1974; RICHTER; BURGER, 1978).

Neste trabalho, a massa específica é representada pela densidade básica. Segundo Brown et al (1949), a densidade básica da madeira é definida pela relação entre seu peso absolutamente seco e seu volume saturado (umidade acima do Ponto de Saturação das Fibras – PSF) e expressa em  $\text{g.cm}^{-3}$ .

A densidade básica é de fácil obtenção e um dos principais parâmetros para aferir a qualidade da madeira, sendo um excelente índice para indicar seu emprego nas diversas finalidades. Em termos gerais, as variações da densidade básica entre espécies estão relacionadas às suas características anatômicas, a exemplo do comprimento e largura da célula, espessura da parede celular, diâmetro do lume e proporção e distribuição dos tecidos no lenho (PANSHIN; ZEEUW, 1970).

Como material estrutural, a madeira possui a desvantagem de ser heterogêneo. Sequer amostras de uma mesma árvore apresentam valores das PFMM absolutamente iguais (BROWN et al., 1949). Segundo Rocha (1994), a heterogeneidade da madeira se deve aos diversos tipos de células com funções específicas, por ser constituída de uma série de compostos químicos, orgânicos e inorgânicos, e, também aos fatores que afetam o desenvolvimento das árvores, tais como clima, solo, local de crescimento e genéticos.

Ainda que as PFMM tenham estreita relação com a massa específica, há outros importantes fatores de influência, tais como as proporções e arranjos dos seus componentes estruturais anatômicos (fibrilar, parenquimatosos, etc.) e aos elementos não estruturais, como extrativos e água (PANSHIN; ZEEUW, 1970; WANGAARD, 1950). Garcia e Quirino (1993), constataram que a remoção de apenas 1,9% de extrativos da madeira de ipê (*Tabebuia* sp.) ocasionou um decréscimo de 17,3% na resistência de ruptura à compressão paralela às fibras.

A presença da água afeta sobremaneira a resistência da madeira. As variações na umidade produzem diferenças na massa específica, e, portanto, resultando em variações na resistência aos esforços mecânicos. Segundo Panshin e Zeeuw (1970), a resistência mecânica se altera inversamente com o conteúdo de umidade abaixo do PSF. Acima do PSF, têm-se evidenciado na literatura que as propriedades mecânicas da madeira permanecem estáveis quando ocorrem variações da umidade.

Além dos fatores mencionados, ainda há outros relevantes que influenciam as PFMM, podendo-se citar as proporções dos elementos da parede celular (celulose, hemiceluloses e lignina); disposição dos vasos e porosidade; posição da amostra no tronco da árvore; direção das fibras (longitudinal e transversal) onde são aplicadas as forças externas e idade da árvore (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968; PANSHIN; ZEEUW, 1970; FOREST, 1974; RICHTER; BURGER, 1978; JANKOWSKY, 1979; SIAU, 1984; ROCHA et al., 1988; EVANS et al., 2000).

## MATERIAL E MÉTODOS

## Propriedades físicas e mecânicas utilizadas

Para o presente estudo foram utilizadas doze PFMM (Tabela 1).

TABELA 1: Propriedades físicas e mecânicas das madeiras (PFMM) utilizadas no estudo.

Propriedade		Notação <sup>1</sup>	Unidade de medida	Teor de umidade <sup>2</sup>
Físicas	1. Densidade básica	$\rho_{bas}$	$\text{g.cm}^{-3}$	-
	2. Contração tangencial	$\epsilon_{r,3}$	%	-
	3. Contração radial	$\epsilon_{r,2}$	%	-
Mecânicas	4. Módulo de ruptura à flexão estática	$f_M$	MPa	12%
	5. Módulo de elasticidade à flexão estática	$E_{M0}$	MPa	12%
	6. Resistência à compressão paralela às fibras	$f_{c0}$	MPa	12%
	7. Resistência no limite proporcional à compressão perpendicular às fibras	$E_{c90}$	MPa	12%
	8. Dureza Janka paralela às fibras	$f_{H0}$	N	12%
	9. Dureza Janka transversal às fibras	$f_{H90}$	N	12%
	10. Resistência à tração perpendicular às fibras	$f_{wt90}$	MPa	12%
	11. Resistência ao fendilhamento	$f_{v0}$	MPa	12%
	12. Resistência ao cisalhamento	$f_{s0}$	MPa	12%

MPa = MegaPascal; N = Newton; <sup>1</sup> = conforme norma NBR 7190 (ABNT); <sup>2</sup> = refere-se ao teor de umidade do corpo de prova do respectivo ensaio

### Amostragem

Os dados básicos foram obtidos a partir de uma amostra, composta por informações de 163 espécies de madeiras tropicais brasileiras, procedente de quatro publicações do Laboratório de Produtos Florestais/Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (LPF/IBAMA) (IBAMA, 1997; INSTITUTO, 1981; INSTITUTO, 1988; SOUZA et al., 1997). Tais dados foram determinados utilizando-se as normas da COPANT, as quais são praticamente iguais as da ASTM (INSTITUTO, 1988), sendo que as propriedades mecânicas foram obtidas com corpos de prova a um teor de umidade de 12%.

### Software estatístico

As análises estatísticas foram realizadas através do programa computacional SAS (SAS INSTITUTE INC., 1993).

### Correlações

As correlações das PFMM deste estudo são expressas pelo coeficiente de correlação linear de Pearson ( $\alpha$ ). O  $\alpha$  é adimensional e dado pela expressão:

$$\alpha = \frac{1}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

Onde:  $\alpha$  = coeficiente de correlação linear de Pearson;  $n$  = número de observações de cada variável;  $x_i$  e  $y_i$  = valores  $i$ -ésimos das variáveis  $x$  e  $y$ , respectivamente;  $\mu_x$  e  $\mu_y$  = médias das variáveis  $x$  e  $y$ , respectivamente;  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  = desvios padrão das variáveis  $x$  e  $y$ , respectivamente

### Análises de regressão (equações de regressão)

Foi utilizado  $\rho_{bas}$  como variável independente para o ajuste das equações de regressão de todas as outras propriedades. Essa opção foi adotada em razão de sua já destacada importância e também por ser a propriedade mais freqüente (menos ausente) nas fontes de dados consultadas.

Os cálculos foram feitos utilizando o procedimento Guided Data Analysis (“análise de dados guiada”) do programa SAS. Tal procedimento, além da análise de regressão propriamente dita, proporciona a avaliação de suposições estatísticas dos dados sob análise, permitindo identificar e corrigir as imperfeições ou violações estatísticas, tais como: a) escala dos dados da variável a ser estimada (efetua transformação logarítmica, raiz quadrada, inversa, etc.); b) indicação do modelo de equação mais apropriado (linear, quadrático ou cúbico); e, c) identificação e exclusão de *outliers* (valores discrepantes).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Estatística simples da amostra

O coeficiente de variação percentual (Cv%), revelou uma variabilidade acentuada das propriedades, sendo que o menor Cv% foi o de  $\epsilon_{r,3}$  (17,9%) e o maior o de  $f_{H90}$  (52,4%). Sob a ótica de representação da variação natural existente entre as espécies de madeira, a alta variabilidade dos dados da amostra utilizada pode ser interpretada como um aspecto positivo, pois significa que abrangeu espécies com boa proximidade da amplitude natural que as PFMM podem assumir, o que pode ser verificado pelos seus valores máximos e mínimos.

Os parâmetros estatísticos simples dos dados da amostra são mostrados na Tabela 2. A variação do número de dados verificada se deve à falta de informação nas fontes consultadas (por exemplo: para  $\rho_{bas}$ , duas espécies, das 163, não apresentaram a informação dessa propriedade, o que totalizou 161 observações efetivas).

### Correlações

Para a maior parte das propriedades houve expressiva correlação. O máximo valor de  $\alpha$  encontrado foi o de  $f_{H0}$  vs.  $f_{H90}$  (0,9724), e o mínimo valor, estatisticamente significativo, foi o de  $\epsilon_{r,2}$  vs.  $f_{v0}$  (0,1849), mostrando quase inexistência de correlação. A correlação menos expressiva, além de ser a única sem significância estatística, foi a de  $\epsilon_{r,2}$  vs.  $f_{wt90}$  (0,0733). Em termos de propriedades físicas *versus* mecânicas, o maior valor de  $\alpha$  foi o de  $\rho_{bas}$  vs.  $f_{c0}$  (0,9416), e o menor, estatisticamente significativo, foi o mencionado para  $\epsilon_{r,2}$  vs.  $f_{v0}$ .

TABELA 2: Parâmetros estatísticos simples dos dados da amostra das propriedades físicas e mecânicas das madeiras (PFMM) do estudo.

Propriedade	n	Média	Desvio padrão	Cv%	Valor mínimo	Valor máximo
$\rho_{bas}$	161	0,63	0,15	24,3	0,29	1,01
$\epsilon_{r,3}$	140	8,78	1,57	17,9	4,50	12,60
$\epsilon_{r,2}$	140	4,92	1,10	22,3	2,40	8,20
$f_M$	158	120,25	36,95	30,7	29,32	222,51
$E_{M0}$	159	13318	2809	21,1	4413	18927
$f_{c0}$	159	63,67	17,63	27,7	23,73	100,13
$E_{c90}$	154	10,56	5,00	47,3	1,86	26,97
$f_{H0}$	158	8773,8	3958,4	45,1	2079	17603
$f_{H90}$	157	7730,15	4048,96	52,4	1196	17936
$f_{wt90}$	154	4,10	1,09	26,6	1,86	7,65
$f_{v0}$	115	5,71	1,33	23,3	2,94	8,83
$f_{s0}$	157	13,10	4,24	32,4	3,73	23,14

$\rho_{bas}$  = densidade básica, em  $g.cm^{-3}$ ;  $\epsilon_{r,3}$  = contração tangencial, em %;  $\epsilon_{r,2}$  = contração radial, em %;  $f_M$  = módulo de ruptura à flexão estática, em MPa;  $E_{M0}$  = módulo de elasticidade à flexão estática, em MPa;  $f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras, em MPa;  $E_{c90}$  = resistência no limite proporcional à compressão perpendicular às fibras, em MPa;  $f_{H0}$  = dureza Janka paralela às fibras, em N;  $f_{H90}$  = dureza Janka transversal às fibras, em N;  $f_{wt90}$  = resistência à tração perpendicular às fibras, em MPa;  $f_{v0}$  = resistência ao fendilhamento, em MPa;  $f_{s0}$  = resistência ao cisalhamento, em MPa; n = número de dados; Cv% = coeficiente de variação percentual

Os  $\alpha$  da densidade básica com as propriedades mecânicas, que variaram de 0,5087 ( $\rho_{bas}$  vs.  $f_{wt90}$ ) a 0,9416 ( $\rho_{bas}$  vs.  $f_{c0}$ ), mostraram-se, com exceção de  $f_{wt90}$  e  $f_{v0}$ , bastante altos, todos acima de 0,87. Esses resultados são compatíveis com os descritos por Paula et al. (1986) e Nascimento (1993), que encontraram, por regressão linear simples, para madeiras amazônicas secas a um teor de umidade (t.u.), valores do  $R^2$ , entre  $\rho_{bas}$  e as propriedades mecânicas  $f_M$ ,  $E_{M0}$ ,  $f_{c0}$ ,  $E_{c90}$  e  $f_{s0}$ , variando de 0,58 a 0,77 e 0,56 a 0,88, respectivamente. Vale lembrar que o valor do  $R^2$  em regressão linear simples é o quadrado do valor do  $\alpha$ . A matriz dos coeficientes de correlação ( $\alpha$ ) das PFMM consta na Tabela 3.

TABELA 3: Matriz dos coeficientes de correlação ( $\alpha$ ) das propriedades físicas e mecânicas das madeiras (PFMM) do estudo.

Propriedade	$\rho_{bas}$	$\epsilon_{r,3}$	$\epsilon_{r,2}$	$f_M$	$E_{M0}$	$f_{c0}$	$E_{c90}$	$f_{H0}$	$f_{H90}$	$f_{wt90}$	$f_{v0}$	$f_{s0}$
$\rho_{bas}$	1 (161)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\epsilon_{r,3}$	0,3634** (138)	1 (140)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\epsilon_{r,2}$	0,4279** (138)	0,6387** (140)	1 (140)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$f_M$	0,9224** (158)	0,3572** (135)	0,4440** (135)	1 (158)	-	-	-	-	-	-	-	-
$E_{M0}$	0,8917** (159)	0,4991** (136)	0,5068** (136)	0,9061** (158)	1 (159)	-	-	-	-	-	-	-
$f_{c0}$	0,9416** (159)	0,3894** (136)	0,4394** (136)	0,9597** (158)	0,9238** (159)	1 (159)	-	-	-	-	-	-
$E_{c90}$	0,9124** (154)	0,2155* (133)	0,3213** (133)	0,8821** (153)	0,7733** (154)	0,8907** (154)	1 (154)	-	-	-	-	-
$f_{H0}$	0,8769** (158)	0,4030** (135)	0,4493** (135)	0,8864** (157)	0,8428** (158)	0,9061** (158)	0,8572** (153)	1 (158)	-	-	-	-
$f_{H90}$	0,9207** (157)	0,3926** (134)	0,4388** (134)	0,9019** (156)	0,8679** (157)	0,9290** (157)	0,8960** (152)	0,9724** (156)	1 (157)	-	-	-
$f_{wt90}$	0,5087** (154)	0,2441* (131)	0,0733 <sup>ns</sup> (131)	0,5024** (153)	0,4717** (154)	0,4946** (154)	0,4481** (150)	0,4887** (153)	0,4717** (152)	1 (154)	-	-
$f_{v0}$	0,6114** (115)	0,3477** (115)	0,1849* (115)	0,6185** (114)	0,6186** (115)	0,6213** (115)	0,5211** (114)	0,5813** (114)	0,5842** (113)	0,6849** (113)	1 (115)	-
$f_{s0}$	0,8820** (157)	0,3109** (134)	0,3393** (134)	0,8613** (156)	0,8443** (157)	0,8777** (157)	0,8342** (152)	0,9032** (156)	0,9110** (155)	0,6324** (153)	0,7191** (114)	1 (157)

$\rho_{bas}$  = densidade básica, em  $g.cm^{-3}$ ;  $\epsilon_{r,3}$  = contração tangencial, em %;  $\epsilon_{r,2}$  = contração radial, em %;  $f_M$  = módulo de ruptura à flexão estática, em MPa;  $E_{M0}$  = módulo de elasticidade à flexão estática, em MPa;  $f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras, em MPa;  $E_{c90}$  = resistência no limite proporcional à compressão perpendicular às fibras, em MPa;  $f_{H0}$  = dureza Janka paralela às fibras, em N;  $f_{H90}$  = dureza Janka transversal às fibras, em N;  $f_{wt90}$  = resistência à tração perpendicular às fibras, em MPa;  $f_{v0}$  = resistência ao fendilhamento, em MPa;  $f_{s0}$  = resistência ao cisalhamento, em MPa; entre parênteses o número de pares de dados utilizados para o cálculo do  $\alpha$ ; \*\* =  $\alpha$  significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $P < 0,01$  de  $H_0$ ); \* =  $\alpha$  significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $P < 0,05$  de  $H_0$ ); ns =  $\alpha$  não significativo ( $P > 0,05$  de  $H_0$ )

Chimelo (1980), estudando 32 espécies amazônicas na condição verde (t.u. saturado), através de regressão linear, obteve um R<sup>2</sup> de 0,02 e 0,09, respectivamente, nas relações entre ε<sub>r,3</sub> e ε<sub>r,2</sub> com ρ<sub>bas</sub>, contra R<sup>2</sup> variando de 0,63 a 0,78 nas relações entre propriedades mecânicas f<sub>M</sub>, E<sub>M0</sub>, E<sub>c90</sub> e f<sub>s0</sub> com ρ<sub>bas</sub>. Rocha (1994), estudando 150 espécies amazônicas, tanto na condição verde como no t.u. de 12%, também por regressão linear, obteve R<sup>2</sup> de 0,08 para ρ<sub>bas</sub> vs. ε<sub>r,3</sub> e 0,22 para ρ<sub>bas</sub> vs. ε<sub>r,2</sub>, enquanto que os R<sup>2</sup> de ρ<sub>bas</sub> com propriedades mecânicas f<sub>M</sub>, E<sub>M0</sub>, E<sub>c90</sub> e f<sub>s0</sub>, variaram entre 0,58 a 0,77.

Neste estudo, os baixos valores de α das propriedades de contração com ρ<sub>bas</sub>, que foram 0,3634 (ε<sub>r,3</sub> vs. ρ<sub>bas</sub>) e 0,4279 (ε<sub>r,2</sub> vs. ρ<sub>bas</sub>), bem como os altos α entre ρ<sub>bas</sub> e as propriedades f<sub>M</sub>, E<sub>M0</sub>, E<sub>c90</sub> e f<sub>s0</sub>, que variaram entre 0,8820 (ρ<sub>bas</sub> vs. f<sub>s0</sub>) e 0,9224 (ρ<sub>bas</sub> vs. f<sub>M</sub>), confirmam as pesquisas de Chimelo (1980) e Rocha (1994), demonstrando que, de fato, as relações de ρ<sub>bas</sub> com ε<sub>r,3</sub> e ε<sub>r,2</sub> são fracas, enquanto que com as propriedades mecânicas f<sub>M</sub>, E<sub>M0</sub>, E<sub>c90</sub> e f<sub>s0</sub> são, ao contrário, bastante consistentes.

**Análises de regressão (equações de regressão)**

Para as análises de regressão, os dados básicos foram submetidos ao procedimento Guided Data Analysis do programa SAS, tendo ρ<sub>bas</sub> como variável independente em relação às outras PFMM. De acordo com as características dos dados (distribuição, escala, etc.), a análise guiada do SAS indicou a necessidade de transformação das variáveis dependentes, identificou e eliminou os outliers e apontou o modelo de equação mais apropriado a cada conjunto de observações.

As equações ajustadas com seus respectivos coeficientes de regressão (da equação) e de determinação (R<sup>2</sup>), bem como o número de observações (após a eliminação dos outliers) que geraram cada equação, são apresentadas na Tabela 4.

As modificações propostas pelo procedimento Guided Data Analysis promoveram um ganho substancial no ajuste das equações de regressão, o que as tornam melhores quanto às estimativas. Para efeito de comparação, efetuaram-se, com os mesmos dados, os cálculos de regressão linear simples (modelo genérico y = a + bx), ou seja, sem as correções das imperfeições estatísticas prescritas pelo SAS. Nessa comparação o ganho médio absoluto do R<sup>2</sup> para as PFMM modificadas foi de 0,052, cerca de 7,9%, e, em termos individuais, os ganhos mais expressivos foram de f<sub>wt90</sub>, f<sub>v0</sub> e ε<sub>r,2</sub>, que tiveram seus R<sup>2</sup> aumentados em 41,3%, 27,5% e 20,2%, respectivamente.

TABELA 4: Equações de regressão ajustadas para estimativas das propriedades físicas e mecânicas das madeiras (PFMM) utilizando a densidade básica (ρ<sub>bas</sub>) como variável independente.

Propriedade	Equação ajustada **	R <sup>2</sup>	n
ε <sub>r,3</sub>	ε <sub>r,3</sub> = 6,4526 + 3,6368 ρ <sub>bas</sub>	0,132	138
ε <sub>r,2</sub>	ε <sub>r,2</sub> = 12,021 - 43,633 ρ <sub>bas</sub> + 76,073 ρ <sub>bas</sub> <sup>2</sup> - 39,532 ρ <sub>bas</sub> <sup>3</sup>	0,220	138
f <sub>M</sub>	√f <sub>M</sub> = 1,4169 + 19,844 ρ <sub>bas</sub> - 7,517 ρ <sub>bas</sub> <sup>2</sup>	0,902	156
E <sub>M0</sub>	E <sub>M0</sub> = - 1741,8 + 32414 ρ <sub>bas</sub> - 12889 ρ <sub>bas</sub> <sup>2</sup>	0,810	159
f <sub>c0</sub>	f <sub>c0</sub> = - 5,1558 + 108,55 ρ <sub>bas</sub>	0,907	157
E <sub>c90</sub>	Log E <sub>c90</sub> = - 0,1655 + 2,3153 ρ <sub>bas</sub> - 0,7795 ρ <sub>bas</sub> <sup>2</sup>	0,889	153
f <sub>H0</sub>	√f <sub>H0</sub> = 68,329 - 191,0 ρ <sub>bas</sub> + 553,09 ρ <sub>bas</sub> <sup>2</sup> - 306,32 ρ <sub>bas</sub> <sup>3</sup>	0,814	157
f <sub>H90</sub>	√f <sub>H90</sub> = 44,812 - 129,76 ρ <sub>bas</sub> + 454,44 ρ <sub>bas</sub> <sup>2</sup> - 239,73 ρ <sub>bas</sub> <sup>3</sup>	0,894	156
f <sub>wt90</sub>	Log f <sub>wt90</sub> = - 0,139 + 2,0218 ρ <sub>bas</sub> - 1,2795 ρ <sub>bas</sub> <sup>2</sup>	0,366	154
f <sub>v0</sub>	Log f <sub>v0</sub> = - 0,0103 + 1,9425 ρ <sub>bas</sub> - 1,1534 ρ <sub>bas</sub> <sup>2</sup>	0,477	115
f <sub>s0</sub>	√f <sub>s0</sub> = 0,7111 + 5,7022 ρ <sub>bas</sub> - 1,7949 ρ <sub>bas</sub> <sup>2</sup>	0,814	156

ρ<sub>bas</sub> = densidade básica, em g.cm<sup>-3</sup>; ε<sub>r,3</sub> = contração tangencial, em %; ε<sub>r,2</sub> = contração radial, em %; f<sub>M</sub> = módulo de ruptura à flexão estática, em MPa; E<sub>M0</sub> = módulo de elasticidade à flexão estática, em MPa; f<sub>c0</sub> = resistência à compressão paralela às fibras, em MPa; E<sub>c90</sub> = resistência no limite proporcional à compressão perpendicular às fibras, em MPa; f<sub>H0</sub> = dureza Janka paralela às fibras, em N; f<sub>H90</sub> = dureza Janka transversal às fibras, em N; f<sub>wt90</sub> = resistência à tração perpendicular às fibras, em MPa; f<sub>v0</sub> = resistência ao fendilhamento, em MPa; f<sub>s0</sub> = resistência ao cisalhamento, em MPa; \*\* = todos os modelos apresentaram, pelo teste F, significância ao nível de 1% de probabilidade (P<0,01 de Ho); R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; n = número de pares de dados (observações) que gerou a equação; Log = logaritmo de base 10

A maioria das equações de regressão apresentou um R<sup>2</sup> que pode ser considerado satisfatório, ou seja, acima de 0,8. O maior valor encontrado foi o da equação para estimar f<sub>c0</sub> (R<sup>2</sup> = 0,907), e o menor valor foi o da equação para estimar ε<sub>r,3</sub> (R<sup>2</sup> = 0,132), significando, respectivamente, o melhor e o pior desempenho dessas equações quanto à precisão de estimativas.

Como eram esperados, os R<sup>2</sup> de ρ<sub>bas</sub> com as propriedades físicas de contração (ε<sub>r,3</sub> e ε<sub>r,2</sub>) foram os mais baixos entre todos, e os com as propriedades mecânicas f<sub>wt90</sub> e f<sub>v0</sub> pouco significativas. Assim, as equações de ρ<sub>bas</sub> com ε<sub>r,3</sub>, ε<sub>r,2</sub>, f<sub>wt90</sub> e f<sub>v0</sub> podem ser consideradas inviáveis para efeito de estimativas.

Com relação aos *outliers*, foram seis os conjuntos de dados em que ocorreram. Dois conjuntos ( $f_M$  e  $f_{c0}$ ) tiveram a exclusão de duas observações e quatro ( $E_{c90}$ ,  $f_{H0}$ ,  $f_{H90}$  e  $f_{s0}$ ) tiveram a exclusão de uma observação. Em geral, a ocorrência de *outliers* foi nos conjuntos de dados que apresentaram os maiores coeficientes de variação percentual ( $Cv\%$ ), concluindo-se que contribuíram para o valor desse coeficiente.

### CONCLUSÕES

Para as propriedades que apresentaram altos valores nas relações funcionais ( $\alpha$  e  $R^2$ ), ou seja,  $\rho_{bas}$ ,  $f_M$ ,  $E_{M0}$ ,  $f_{c0}$ ,  $E_{c90}$ ,  $f_{H0}$ ,  $f_{H90}$  e  $f_{s0}$ , as análises de regressão possibilitaram a obtenção de equações satisfatórias para fins de estimativas dessas, sobretudo para PFMM de espécies brasileiras ainda não ensaiadas, mas que possuem boas qualidades tecnológicas e, portanto, potencialmente aptas ao manejo florestal sustentável.

Por outro lado, os baixos valores de  $\alpha$  e  $R^2$  das propriedades de contração ( $\epsilon_{r,3}$  e  $\epsilon_{r,2}$ ), bem como das propriedades de resistência a forças de tração ( $f_{wt90}$ ) e fendilhamento ( $f_{v0}$ ), inviabilizam vínculos matemáticos correlatos com a maioria das outras propriedades, e indicam que estas são influenciadas predominantemente por outros fatores, afora a quantidade do material lenhoso da madeira ( $\rho_{bas}$ ), a exemplo dos relacionados à anatomia e à presença de extrativos.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, H. J. B. **Agrupamento das espécies madeiras ocorrentes em pequenas áreas sob manejo florestal do Projeto de Colonização Pedro Peixoto (AC) por similaridade das propriedades físicas e mecânicas.** 2002. 168p. Dissertação (Mestrado em Recursos florestais). Piracicaba, ESALQ, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7190:** Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107p.

BROWN, H. P.; PANSHIN, A. J.; FORSAITH, C. C. **Textbook of wood technology:** structure, identification, defects, and uses of the commercial wood of the United States. New York: McGraw-Hill, 1949. v. 1, 652p.

CHIMELO, J. P. Development of a probability-based computerization system for identification and for property prediction of selected tropical hardwoods. 1980. 202 f. Thesis (Doutorado) Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute, 1980.

EVANS, J. L. W.; SENFT, J. F.; GREEN, D. W. Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones. **Forest Products Journal**, v.50, n.7/8, p.75-87, 2000.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: wood as an engineering material.** Madison: USDA, 1974. 1v.

GARCIA, J. N.; QUIRINO, W. F. Influência dos extrativos solúveis em água na resistência à compressão paralela da madeira de ipê (*Tabebuia* sp.). In: CONGRESSO FLORESTAL PAN-AMERICANO, 1; CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. **Anais.** Curitiba, 1993. 2 v. p. 647-650.

IBAMA. **Madeiras da Amazônia:** características e utilização. Amazônia Oriental. Brasília, DF, 1997. v. 3. 141p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL. **Madeiras da Amazônia:** características e utilização. Floresta Nacional do Tapajós. Brasília, DF, 1981. v.1. 113p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL. **Madeiras da Amazônia:** características e utilização. Estação Experimental de Curuá-Una. Brasília, DF, 1988. v.2. 236p.

JANKOWSKY, I. P. **Influência da densidade básica e do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira.** 1979, 94 f. Tese (Mestrado). Piracicaba, ESALQ, 1979.

KOLLMANN, F. E. P.; CÔTÉ JUNIOR, W. A. Jr. **Principles of wood science and technology.** Solid Wood. Berlin:Spring-Verlag;New York: Heildeberg, 1968. 1 v. 592 p.

NAHUZ, M. A. R.. **Some aspects of the introduction of lesser-known brazilian species to the European timber market.** 1974. Thesis (Magister). Bangor, Department of Forestry and Wood Science, University College of North Wales, 1974.

NASCIMENTO, C. C. **Variabilidade da densidade básica e de propriedades mecânicas de madeiras da Amazônia.** 1993. 129 f. Tese (Mestrado). Piracicaba, ESALQ, 1993.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. **Textbook of wood technology.** 3.ed., New York: McGraw-Hill, 1970. v.1. 705 p.

PAULA, E. V. C. M.; CABRAL, M. T. F. D.; NASCIMENTO, C. C.; ROCHA, J. S. Propriedades mecânicas de trinta e nove espécies de madeiras do Amazonas. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2., 1986, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1986. 1 v.

RICHTER, H. G.; BURGER, L. M. **Anatomia da Madeira**. 2. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1978. 78 p.

ROCHA, J. S.; PAULA, E. V. C. M.; SIQUEIRA, M. L. Flexão estática em amostras pequenas livres de defeitos. **Acta Amazônica**, v.18, n. 1/2, p.147-162, 1988.

ROCHA, J. S. A segurança de estruturas de madeira determinada a partir da variabilidade da densidade básica e de propriedades mecânicas de madeiras amazônicas. 1994. 160 f. Tese (Mestrado) Piracicaba, ESALQ, 1994.

SAS INSTITUTE INC. SAS/STAT: **User's Guide**. Version 6. 2. ed. Cary: NC: SAS Institute, 1993. 1022 p.

SIAU, J. F. **Transport processes in wood**. Berlim: Spring-Verlag, 1984. 223 p.

SOUZA, M. H.; MAGLIANO, M. M.; CAMARGOS, J. A. A.; SOUZA, M. R. **Madeiras tropicais brasileiras**. Brasília, DF: IBAMA, 1997. 152 p.

WANGAARD, F. F. **The mechanical properties of wood**. New York: J. Wiley, 1950. 377 p.