



Uso do Pilodyn para estimativa das propriedades físicas de madeiras produzidas em sistema agroflorestal

Use of Pilodyn to estimate the physical properties of woods produced in agroforestry systems

Uso de Pilodyn para estimar las propiedades físicas de maderas producidas en sistemas agroforestales

Adriano Reis Prazeres Mascarenhas

Doutor em Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, Minas Gerais, Brasil.

Professor, Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Rolim de Moura, Rondônia, Brasil.

<http://lattes.cnpq.br/7050276331020244>

<https://orcid.org/0000-0002-7554-3590>

Fernando Luíz de Oliveira Corrêa

Doutor em Agronomia, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Viçosa, Minas Gerais, Brasil

Auditor Fiscal Federal Agropecuário, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA)/Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC), Ouro Preto do Oeste, Rondônia, Brasil

<http://lattes.cnpq.br/0711539042462723>

<https://orcid.org/0000-0002-4664-0340>

Rafael Rodolfo de Melo

Doutor em Ciências Florestais, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Distrito Federal, Brasil

Professor, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil

<http://lattes.cnpq.br/6281797821607307>

<https://orcid.org/0000-0001-6553-4204>

Marta Silvana Volpato Scotti

Doutora em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

Professora, Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Rolim de Moura, Rondônia, Brasil

<http://lattes.cnpq.br/8802033326043600>

<https://orcid.org/0000-0001-5979-3218>

Emanuel Fernando Maia de Souza

Doutor em Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Minas Gerais, Brasil

Professor, Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Rolim de Moura, Rondônia, Brasil

<http://lattes.cnpq.br/4742387914768064>

<https://orcid.org/0000-0002-5493-2183>

Emmanoella Costa Guaraná Araujo

Doutora em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil

Professora, Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Rolim de Moura, Rondônia, Brasil

<http://lattes.cnpq.br/1659011614593700>

<https://orcid.org/0000-0002-4493-904X>

Thiago Cardoso Silva

Doutor em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil
Professor, Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Rolim de Moura, Rondônia, Brasil

<http://lattes.cnpq.br/8962087913561252>

<https://orcid.org/0000-0001-6553-4204>

Resumo

Introdução: Com o propósito de avaliar a qualidade da madeira com métodos não destrutivos, este trabalho visa estimar a densidade e parâmetros de retratibilidade de madeiras tropicais produzidas em sistemas agroflorestais (SAF) na Amazônia. O objetivo é compreender a relação entre as propriedades da madeira e as medições realizadas por meio do Pilodyn. **Metodologia:** O SAF avaliado foi implantado em Ouro Preto do Oeste/RO. Foram avaliadas árvores de mogno africano (*Khaya senegalensis*), freijó (*Cordia goeldiana*), paricá (*Schizolobium amazonicum*) e teca (*Tectona grandis*). Essas árvores compõem um SAF com espécies de cultivos agrícolas entre os renques. Nas espécies madeireiras foram realizadas avaliações de penetração utilizando Pilodyn na árvore em pé. Em seguida, essas árvores foram derrubadas para as seguintes avaliações da madeira: densidade básica; contrações linear, tangencial, radial e volumétrica; e coeficiente de anisotropia. Essas propriedades foram correlacionadas com a DRL para modelagem estatística. **Resultados:** Os valores de penetração do Pilodyn são inversamente proporcionais à densidade da madeira. Logo, madeiras mais macias tendem a apresentar valores de penetração mais altos. Essa tendência pode ser observada nos resultados, cuja sequência classifica as madeiras das mais densas para as mais leves: mogno africano > freijó > paricá > teca. Correlacionando a penetração com as propriedades físicas da madeira, foi possível perceber uma baixa correlação com a densidade e os parâmetros de retratibilidade das madeiras produzidas no SAF. **Conclusão:** Modelos globais foram ajustados para prever densidade e retratibilidade da madeira, porém, a variabilidade intra e interespecífica em SAF prejudicou a precisão das estimativas.

Palavras-chave: métodos não destrutivos; qualidade de madeira; madeiras tropicais.

Abstract

Introduction: In order to assess wood quality using non-destructive methods, this study aims to estimate the density and shrinkage parameters of tropical wood produced in agroforestry systems (SAF) in the Amazon. The aim is to understand the relationship between wood properties and Pilodyn measurements. **Methodology:** The SAF evaluated was implemented in Ouro Preto do Oeste/RO. African mahogany (*Khaya senegalensis*), freijó (*Cordia goeldiana*), paricá (*Schizolobium amazonicum*) and teak (*Tectona grandis*) trees were evaluated. These trees make up a SAF with agricultural crop species between the branches. Penetration assessments were carried out on the standing trees using Pilodyn. These trees were then felled for the following wood assessments: basic density; linear, tangential, radial and volumetric shrinkage; and anisotropy coefficient. These properties were correlated with Pilodyn data for statistical modeling. **Results:** Pilodyn penetration values are inversely proportional to wood density. Therefore, softer woods tend to have higher penetration values. This trend can be seen in the results, whose sequence ranks the woods from densest to lightest: African mahogany > freijó > paricá > teak. Correlating penetration with the physical properties of the wood, it was possible to see a low correlation with the density and shrinkage parameters of the wood produced in the SAF. **Conclusion:** Global models were adjusted to predict wood density and shrinkage, but intra- and interspecific variability in SAF hindered the accuracy of the estimates.

Keywords: nondestructive methods; wood quality; tropical wood.

Resumen

Introducción: Con el fin de evaluar la calidad de la madera utilizando métodos no destructivos, este estudio tiene como objetivo estimar los parámetros de densidad y contracción de la madera tropical producida en sistemas agroforestales (SAF) en la Amazonia. El objetivo es comprender la relación entre las propiedades de la madera y las mediciones de Pilodyn. **Metodología:** El SAF evaluado fue implementado en Ouro Preto do Oeste/RO. Se evaluaron árboles de caoba africana (*Khaya senegalensis*), freijó (*Cordia goeldiana*), paricá (*Schizolobium amazonicum*) y teca (*Tectona grandis*). Estos árboles forman un SAF con especies de cultivos agrícolas entre ellos. Se realizaron evaluaciones de penetración en los árboles en pie utilizando Pilodyn. A continuación, estos árboles se talaron para realizar las siguientes evaluaciones de la madera: densidad básica; contracción lineal, tangencial, radial y volumétrica; y coeficiente de anisotropía. Estas propiedades se correlacionaron con las lecturas de Pilodyn para la modelización estadística. **Resultados:** Los valores de penetración de Pilodyn son inversamente proporcionales a la densidad de la madera. Por lo tanto, las maderas más blandas tienden a tener valores de penetración más elevados. Esta tendencia puede observarse en los resultados, cuya secuencia ordena las maderas de más densa a más clara: mogno africano > freijó > paricá > teca. Correlacionando la penetración con las propiedades físicas de la madera, se pudo observar una baja correlación con los parámetros de densidad y contracción de la madera producida en el SAF. **Conclusión:** Se ajustaron modelos globales para predecir la densidad y la contracción de la madera, pero la variabilidad intra e interespecífica en el SAF comprometió la precisión de las estimaciones.

Palabras clave: métodos no destructivos; calidad de la madera; madera tropical.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas agroflorestais (SAF) têm o propósito de conciliar a produção de alimentos com a conservação da biodiversidade por meio da coexistência e manejo integrado de espécies florestais e cultivos agrícolas (Getnet et al., 2023). Nesta perspectiva, os SAFs surgem como alternativa viável para equilibrar as demandas humanas, que são ilimitadas, com os recursos naturais, quase sempre escassos.

Com isso, tal abordagem pode ajudar a reduzir a pressão sobre os ambientes florestais, ao mesmo tempo em que viabiliza a produção de matéria-prima e alimentos. Ao mesmo tempo, o conhecimento da madeira é fundamental para o seu correto dimensionamento e redução do desperdício. Assim, as propriedades físico-mecânicas são determinantes para esta finalidade, haja vista que estão diretamente correlacionadas com a resistência aos esforços mecânicos, o processamento industrial (desdobro, secagem, colagem, acabamentos e polpação) e suas aplicações (Ramage et al, 2017).

A maior parte das pesquisas realizadas sobre SAFs não verificam aspectos relacionados à qualidade da madeira, concentrando suas avaliações em fatores

socioeconômicos e serviços ecossistêmicos (Thomas et al., 2021). Entretanto, para as pesquisas que avaliam as propriedades tecnológicas da madeira, o método predominantemente utilizado é o destrutivo.

A obtenção de amostras de madeira, intrinsecamente vinculada à condução de análises em laboratórios especializados, deve seguir critérios rigorosos de qualidade e representatividade. Além do mais, as análises destrutivas podem ser dispendiosas, exigindo equipamentos específicos e mão de obra especializada, sem contar no tempo para executar a atividade e impactos ambientais, além de barreiras legais a depender da espécie e do domínio fitogeográfico avaliados.

Dessa forma, a adoção de técnicas não destrutivas para a caracterização da madeira se apresenta como uma alternativa viável superar as limitações mencionadas. Dentre as técnicas utilizadas para a avaliação não destrutiva está o emprego do Pilodyn. O Pilodyn é um instrumento utilizado para medir a penetração de uma agulha na madeira e geralmente se correlaciona bem com a sua densidade, o que pode indicar a qualidade e resistência da madeira (Wu et al., 2010).

Com o propósito de compreender tal correlação, este trabalho visa estimar a densidade e parâmetros de retratibilidade de madeiras tropicais produzidas em sistemas agroflorestais (SAF) na Amazônia. O objetivo é entender a relação entre as propriedades da madeira e as medições realizadas por meio do Pilodyn.

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

2.1 Caracterização da área de estudo e seleção das árvores

O SAF avaliado foi implantado na estação experimental da CEPLAC Rondônia (10°43'6,36"S, 62°13'22,17"W), no município de Ouro Preto do Oeste, em Rondônia/RO. As principais características edafoclimáticas da região são: vegetação natural composta por floresta ombrófila densa submontana aberta, com dossel uniforme e com dossel emergente; solo classificado com argissolo vermelho-amarelo eutrófico; clima tropical úmido ou subúmido (Am); temperatura

anual média de 26 °C; precipitação anual média de 2.300 mm; e umidade relativa entre 80-90% (Alvares et al., 2013; Mascarenhas et al., 2017).

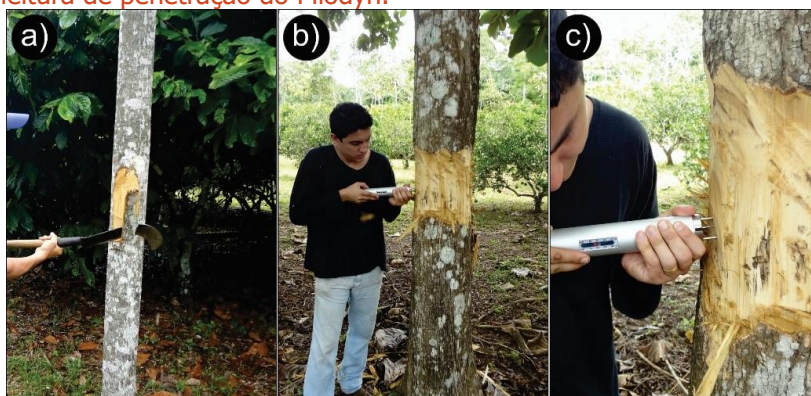
Para realização deste trabalho foram utilizadas árvores das espécies mogno africano (*Khaya senegalensis* A. Juss), freijó (*Cordia goeldiana* Huber), paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber x Ducke) Barneby) e teca (*Tectona grandis* L. f.). As árvores foram cultivadas em renques duplos no espaçamento 5,0 m × 2,5 m (800 árvores.ha⁻¹) em sistema agroflorestal multiestratificado (SAF) com área de 1,0 hectare (80,0 m × 125,0 m), implementado no ano de 1996 utilizando-se mudas seminais. Além das espécies madeireiras, encontram-se cultivos agrícolas de araçá boi (*Eugenia stipitata* McVaugh), cacau (*Theobroma cacao* L.), cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* (Willd. ex Spreng.) K.Schum.), cajá-mirim (*Spondias mombin* L.), coqueiro (*Cocos nucifera* L.), fruta-pão (*Artocarpus altilis* (Parkinson) Fosberg), laranjeiras (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck, mangueiras (*Mangifera indica* L.) e pupunha (*Bactris gasipaes* Kunth).

A amostragem de árvores para realização deste trabalho foi conduzida seguindo as diretrizes apresentadas em ASTM D 5536 (ASTM, 2017). Assim, três árvores de mogno africano, freijó, paricá e teca foram selecionadas utilizando-se como critério de seleção o diâmetro de área basal (Dg) para maior representatividade. Também se considerou as condições fitossanitárias das árvores, verificando-se a ausência de defeitos, bifurcações, tortuosidades ou inclinação. De cada árvore foram retiradas toras de 1,5 m de comprimento a partir da base do fuste, a partir das quais foram obtidos os corpos de prova para determinação das propriedades físicas.

2.2 Leituras com Pilodyn

As medidas de penetração com Pilodyn foram tomadas no tronco das árvores vivas correspondentes à região do diâmetro à altura do peito (DAP). Para isso, as árvores foram descascadas e realizaram-se duas leituras opostas com Pilodyn entre as linhas de plantio (Figura 1), tendo cada ponto seguido a orientação cardinal N e S (Ferreira et al., 2020).

Figura 1 - Avaliação das árvores, sendo: a) Descascamento das árvores, b) aplicação do Pilodyn, c) detalhe da leitura de penetração do Pilodyn.



2.3 Determinação das propriedades físicas da madeira

Para as madeiras estudadas determinaram-se a densidade básica (ρ_b), contração linear (β_l), contração radial (β_r), contração tangencial (β_t), contração volumétrica (β_v) e coeficiente de anisotropia (CA). Estes parâmetros foram obtidos conforme as diretrizes apresentadas na norma ASTM D 143 (ASTM, 2014).

2.4 Análise dos dados

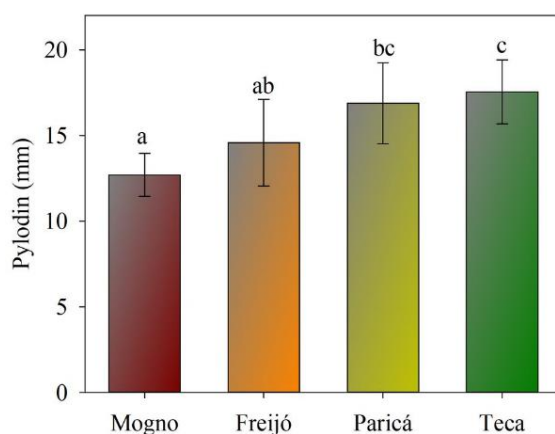
Os valores observados pelas leituras do Pilodyn foram avaliados a partir do teste de Tukey a 95% de probabilidade utilizando o programa Sisvar versão 5.6 (Ferreira, 2014). Em seguida, os dados obtidos a partir das propriedades físicas da madeira de cada espécie foram plotados em função das leituras obtidas no Pilodyn, a fim de se verificar a correlação entre os coeficientes angulares para obtenção de modelos únicos. Estes modelos foram obtidos com objetivo de estimar as propriedades físicas das madeiras (ρ_b , β_r , β_t , β_l , β_v e CA) de forma agrupada.

Os resultados foram analisados por meio de regressão, com modelagem dos parâmetros utilizando-se o método dos mínimos quadrados. As variáveis dependentes (Y – propriedades físicas) foram avaliadas em função das variáveis independentes obtidas com Pilodyn (X – penetração). Para cada propriedade avaliada, selecionou-se os melhores modelos com base na significância estatística da equação, maiores coeficientes de determinação (R^2) e menor erro padrão da estimativa (S_{yx}). As avaliações foram realizadas utilizando o programa Microsoft Office Excel 2022.

3 RESULTADOS

Quanto à penetração observada com Pilodyn, os maiores valores foram observados para as árvores de teca (17,5 mm), seguida de paricá, freijó e mogno africano (Figura 2). O coeficiente de variação médio foi de 12,9%.

Figura 2 - Valores para leituras de Pilodyn para árvores de mogno africano (*Khaya senegalensis*), freijó (*Cordia goeldiana*), paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*) e teca (*Tectona grandis*) produzidas em sistemas agroflorestal multiestratificado em Ouro Preto do Oeste, Rondônia.



Médias seguidas de mesma letra são estatisticamente não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Os valores de penetração do Pilodyn são inversamente proporcionais à densidade da madeira. Logo, madeiras mais macias tendem a apresentar valores de penetração mais altos. Essa tendência pode ser observada nos resultados, cuja sequência classifica as madeiras das mais densas para as mais leves: mogno africano > freijó > teca > paricá. Mesmo a madeira de teca apresentando densidades mais elevadas que a de paricá, a proximidade dos valores de penetração observada com Pilodyn se explica pela alta variação dos valores e pelo tipo de porosidade que a espécie apresenta (anel semi-circular), que resulta em redução da densidade no sentido medula-casca e causando maiores amplitudes nos valores de densidade básica (Panshin e De Zeeuw, 1980).

Correlacionando a penetração com as propriedades físicas da madeira, foi possível perceber uma baixa correlação com a densidade e os parâmetros de

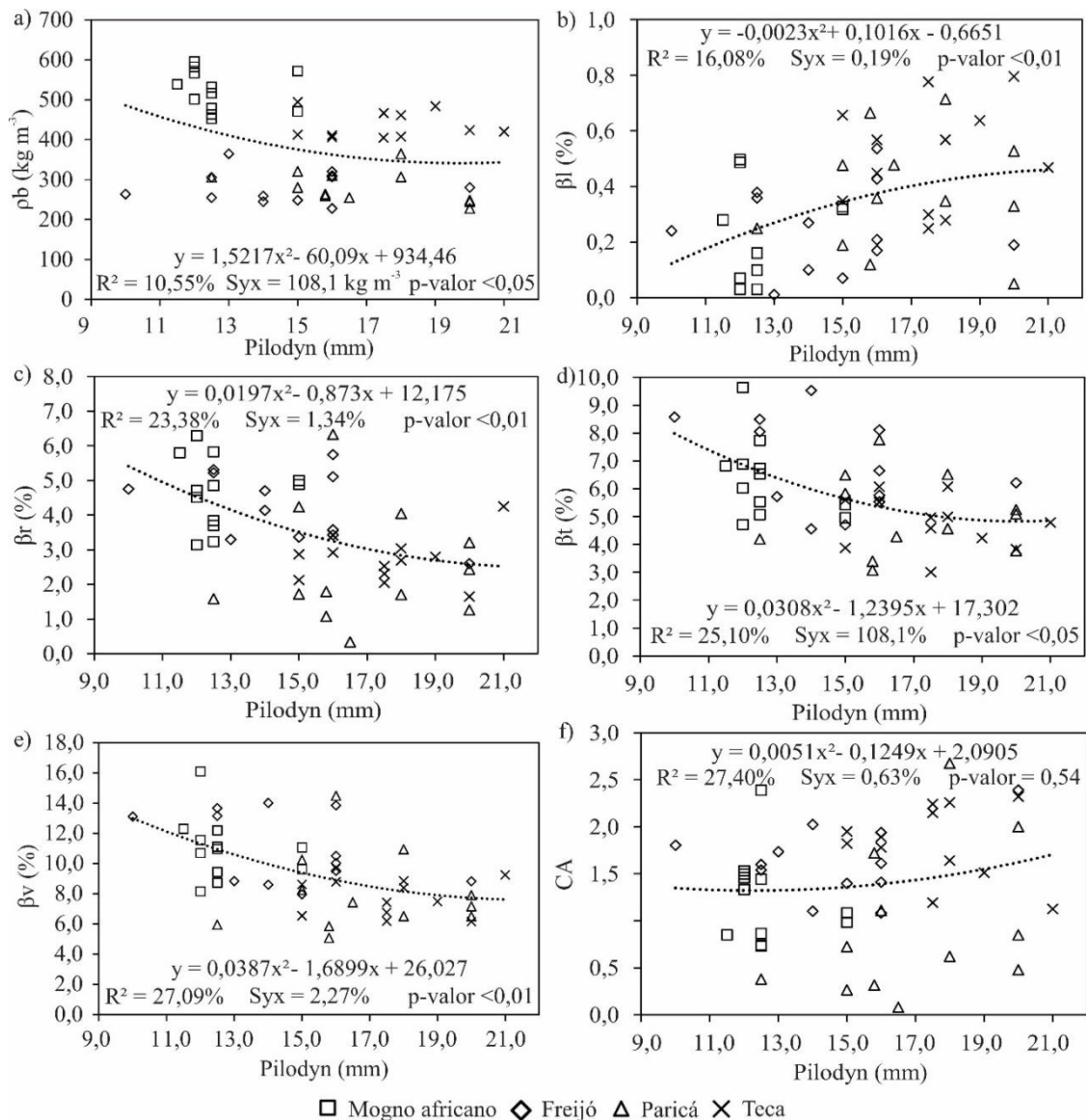
retratibilidade das madeiras produzidas no SAF. Em alguns casos, a correlação fica efetivada na estimativa de densidade aparente (Alves et al., 2016), não básica.

Os modelos ajustados, considerando as variáveis dependentes densidade básica (Figura 3A), contração longitudinal (Figura 3B), contração radial (Figura 3C), contração tangencial (Figura 3D) e contração volumétrica (Figura 3E) apresentaram coeficientes significativos e os valores de R^2 variaram numa faixa entre 10% e 28%, e o erro padrão da estimativa (Syx) apresentou elevada variabilidade, tendo em vista a diversidade de espécies. Por outro lado, para o coeficiente de anisotropia (Figura 3F), não foram obtidos coeficientes significativos, devido à elevada dispersão dos dados.

Alguns estudos indicam uma tendência de não correlação entre as propriedades físicas e o uso do Pilodyn para avaliar a qualidade da madeira de *Eucalyptus* (McKenzie et al., 2003; Gouvêa et al., 2011; Beltrame et al., 2016). Dessa forma, os mesmos erros e questionamentos associados à baixa efetividade do uso desse equipamento pode ser um indicativo de necessidade de melhora da precisão do Pilodyn para estimar propriedades físicas em madeiras tropicais.

Por outro lado, vale ressaltar que este estudo é preliminar e que a realização de pesquisas visando levantar mais informações para melhor compreensão das variáveis que afetam os estimadores matemáticos pode subsidiar o desenvolvimento de modelos com maior precisão para avaliar a qualidade da madeira, especialmente para condições de cultivo de árvores estabelecidas em SAF na Amazônia.

Figura 3 - Modelos ajustados com base em leituras de Pilodyn para estimativa das propriedades físicas da madeira de mogno africano (*Khaya senegalensis*), freijó (*Cordia goeldiana*), paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*) e teca (*Tectona grandis*) produzidas em sistemas agroflorestal multiestratificado em Ouro Preto do Oeste, Rondônia.



4 CONCLUSÕES

Foi possível obter a densidade e os parâmetros de retratibilidade da madeira, com relativa precisão, por meio de modelos ajustados com dados do Pilodyn.

A elevada variabilidade intra e interespecífica para os parâmetros avaliados das madeiras produzidas no SAF avaliado prejudicou a performance dos modelos, reduzindo a precisão das estimativas.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Rejane Costa *et al.* K Estimativa da densidade e dureza janka de madeiras tropicais por meio do método de penetração. *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*, Lisboa, v. 26, p. 71-77, 2016. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507. Disponível em: http://www-ext.Inec.pt/APAET/pdf/Rev_26_A9.pdf. Acesso em: 22 fevereiro 2024.
- ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, dez. 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507. Disponível em: https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen_s_climate_classification_map_for_Brazil?af=crossref. Acesso em: 22 fevereiro 2024.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. D 5536: Standard practice for sampling forest trees for determination of clear wood properties. ASTM, 2017.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. D 143: Standard test methods for small clear specimens of timber. ASTM, 2014.
- BELTRAME, Rafael *et al.* Use of dummy variables to predict growth stresses in *Eucalyptus* ssp. Clones. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v. 40, n. 6, p.1131-1139, 2016. DOI: 10.1590/0100-67622016000600019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/PrhWVskJ6hR4RfkJ9NXPYrS/?lang=en#>. Acesso em: 22 fevereiro 2024.
- FERREIRA, Daniel Furtado. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Brazilian Journal of Biometrics*, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. DOI: 10.28951/rbb.v37i4.450. Disponível em: <https://biometria.ufla.br/index.php/BBJ/article/view/450>. Acesso em: 22 fevereiro 2024.
- GETNET, Desalegn *et al.* The potential of traditional agroforestry practices as nature-based carbon sinks in Ethiopia. *Nature-Based Solutions*, *in press*, v. 4, 2023. DOI: 10.1016/j.nbsj.2023.100079. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772411523000319>. Acesso em: 22 fevereiro 2024.
- GOUVÊA, Adriana de Fátima Gomes *et al.* Determinação da densidade básica da madeiras de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v. 35, n. 2, p. 349-358, abr. 2011. DOI: 10.1590/S0100-67622011000200019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/BkzfNKpYb3BmtdTKhJxdH6S/abstract/?lang=pt#>. Acesso em: 22 fevereiro 2024.

MASCARENHAS, Adriano Reis Prazeres *et al.* Characterization of wood from *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* Huber x Ducke trees from a multi-stratified agroforestry system established in the Amazon rainforest. *Agroforestry Systems, in press*, v. 95, p. 475-486, fev. 2021. DOI: 10.1007/s10457-020-00576-5. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rcf/a/7b5L8KfgtzJWYTFRmPsPFPs/?lang=pt>. Acesso em: 22 fevereiro 2024.

MCKENZIE, H. M. *et al.* Processing young plantation-grown *Eucalyptus nitens* for solid-wood products. 2: Predicting product quality from tree, increment core, disc, and 1-M billet properties. *New Zealand Journal of Forestry Science*, Tallinn, v. 33, n. 1, p. 79-113, 2003. Disponível em:

<https://eurekamag.com/research/003/897/003897614.php>. Acesso em: 22 fevereiro 2024.

PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW C. *Textbook of technology*. 4th ed. New York: McGraw Hill; 1980. 705 p.

RAMAGE, Michael H. *et al.* The wood from the trees: the use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 68, part 1, p. 333-359, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.107. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116306050>. Acesso em: 25 março 2024.

THOMAS, Anais *et al.* Growth dynamics of fast-growing tree species in mixed forestry and agroforestry plantations. *Forest Ecology and Management*, v. 480, 118672, 2021. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118672. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112720314419?via%3Dihub>. Acesso em: 22 fevereiro 2024.

WU, Shi-jun *et al.* Use of the pilodyn for assessing wood properties in standing trees os *Eucalyptus* clones. *Journal of Forestry Research, in press*, v. 21, n. 1, p. 68-72, 2010. DOI: 10.1007/s11676-010-0011-5. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-010-0011-5>. Acesso em: 22 fevereiro 2024.