

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

**REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS PARA A ESTIMATIVA DA ALTURA EM
POVOAMENTO DE *Khaya senegalensis* (Desr.) A. JUSS.**

**SAYRAH SOUSA DA SILVA¹ JAQUELINE MACEDO GOMES¹ VITOR HUGO
MACEDO GOMES²**

AFILIAÇÃO

¹Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão– Centro de Ciências Agrárias -
Avenida Agrária, 100, Bairro Colina Park, 65900-001, Imperatriz - MA.

²Universidade Federal do Pará – Instituto de Tecnologia (ITEC) - Programa de pós graduação
- PPGEE (Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica)-R. Augusto Corrêa, 01 -
Guamá, Belém - PA, 66075-110.

RESUMO

Khaya senegalensis (Desr.) A. Juss. é uma espécie de mogno africano que apresenta diversas vantagens, entre elas destacam-se a sua similaridade com o mogno brasileiro, a alta cotação no mercado internacional de madeira, o rápido crescimento e a resistência à broca de ponteiro (*Hypsipyla grandella* Zeller). Quando se trata de estimar a altura dessa espécie, podem ser utilizados dois métodos: a regressão, que é um método tradicionalmente utilizado, e as redes neurais artificiais, que se baseia em um modelo matemático inspirado na organização neural de organismos inteligentes, similar ao cérebro humano. O objetivo do trabalho foi estimar a altura de *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. utilizando dois métodos, redes neurais artificiais e regressão, e comparar os dois métodos para saber qual é o melhor para a espécie. O estudo foi realizado em uma floresta plantada de *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. de 3 anos, com área de 9,8 ha, localizada no Rancho São Lucas, no município de Lajeado Novo – MA. Na área foram instaladas 37 parcelas permanentes circulares, onde foram medidas todos os diâmetros e alturas das árvores, totalizando 671 indivíduos mensurados. Dentre o total de árvores mensuradas foram separados 70% para o ajuste dos modelos e 30% para a validação. Foram ajustadas dez equações hipsométricas e treinadas 8 redes neurais artificiais (RNA), dos modelos ajustados, a equação de Prodan apresentou melhor desempenho estatístico com Coeficiente de Determinação Ajustado (R^2_{aj}) de 0,86, Erro Padrão da Estimativa Ajustado ($Sy_{x_{aj}}$) de 18,65, Desvio Médio Percentual (DMP) de -0,08. Das RNA's treinadas, a RNA 4 apresentou maior Coeficiente de Determinação (R^2) com 0,73, *Root Mean Square Error* (RMSE %) de 8,07% e *Mean Absolute Error* (MAE%) de 5,96%. Os dois métodos testados apresentaram bons ajustes, mas o método de regressão obteve desempenho superior as redes neurais artificiais (RNA), por possuir R^2 de 0,86 e RMSE% de 5,67%.

PALAVRAS-CHAVE: Floresta plantada. Inteligência artificial. Inventário florestal.

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

INTRODUÇÃO

A madeira do mogno africano é reconhecida como nobre, suas principais formas de uso são para fabricação de móveis de luxo, laminados, construção civil e instrumentos musicais, além disso, as espécies de *Khaya spp.* se destacam por possuir a madeira com propriedades físicas e químicas semelhantes ao mogno brasileiro, além de ser resistente a *Hypsipyla grandella* Zeller que inviabiliza a comercialização do mogno brasileiro (Reis; Oliveira; Santos, 2019). Tendo em vista seu elevado potencial econômico, é necessário monitorar as florestas plantadas de mogno africano para saber sua capacidade produtiva. Segundo Floriano (2021), o inventário florestal tem uma grande importância por monitorar as florestas plantadas em seu estoque de madeira ao decorrer dos anos e fornecer informações que ajudam no planejamento da produção, além de auxiliar na manutenção de florestas de conservação e proteção.

Ao estudar uma floresta, a altura das árvores é uma variável importante para conhecer o comportamento de uma espécie em um local ao longo do tempo pois traduz as condições de crescimento da árvore de acordo com o meio em que está instalado o povoamento (Finger, 2006). O estudo das alturas das árvores é um pilar para o cálculo do volume e consequentemente conhecer a capacidade produtiva da floresta. A estimativa da altura das árvores pode ser feita por meio de equações específicas que são estabelecidas de acordo com dados ajustados a partir de modelos hipsométricos, os quais utilizam apenas o diâmetro à altura do peito (DAP) como variável independente (Campos; Leite, 2017).

As técnicas de análises de regressão são comuns no ajuste de equações para estimar a altura de um povoamento florestal, entretanto, técnicas de análise computacional estão sendo empregadas, como as redes neurais artificiais (RNA). A RNA deixa as rotinas de análises de dados de um inventário florestal mais simples, além de reduzir os custos e possuir uma maior precisão nas estimativas das alturas (Campos; Leite, 2017). Segundo Spörl et al. (2011) as Redes Neurais Artificiais (RNAs) são algoritmos computacionais que se fundamentam em um modelo matemático inspirado na organização neural de organismos inteligentes. Podemos interpretar as RNA's como sistemas de processamento capazes de armazenar o conhecimento obtido por meio da experiência e torná-lo acessível para sua aplicação em diversas áreas de conhecimento. Neste contexto, a presente pesquisa teve como objetivo estimar e comparar as estimativas da altura de *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss utilizando redes neurais artificiais com os modelos hipsométricos tradicionais em um plantio no município de Lajeado Novo-MA.

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

METODOLOGIA

Área de Estudo

O estudo foi realizado no Rancho São Lucas (6° 05' 58" S e 46° 58' 40" W), localizado no município de Lajeado Novo - MA, fazendo parte da microrregião de Imperatriz – MA.

Coleta e Análise de Dados

A área plantada de *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss abrange 9,8 hectares, com árvores de 3 anos. Foram instaladas 37 parcelas permanentes circulares, cada uma com uma área de 800 m², distribuídas de acordo com o processo aleatório. Dentro das parcelas, foram medidos os diâmetros e alturas totais de todas as 671 árvores.

Modelagem de Altura Utilizando Regressão

Para o ajuste dos modelos hipsométricos (Tabela 1) foram escolhidas 470 árvores e o restante (201 árvores) foram utilizadas para a validação dos modelos, usando o teste Qui-quadrado (χ^2) ao nível de significância de 5%.

Tabela 1: Modelos de relações hipsométricas para ajuste em plantas de *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss.

Nº	Autores	Modelos Hipsométricos
1	Assmann (1970)	$H = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{DAP} \right) + \varepsilon$
2	Trorey (1932)	$H = \beta_0 + \beta_1(DAP) + \beta_2(DAP)^2 + \varepsilon$
3	Prodan (1965)	$H = \frac{(DAP)^2}{\beta_0 + \beta_1(DAP) + \beta_2(DAP)^2} + \varepsilon$
4	Azevedo et al. (1999)	$Ln(H) = \beta_0 + \beta_1 Ln(DAP) + \beta_2 \left(\frac{1}{DAP} \right) + Ln(\varepsilon)$
5	Curtis (1967)	$Ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{DAP} \right) + Ln(\varepsilon)$
6	Stoffels (1953)	$Ln(H) = \beta_0 + \beta_1 Ln(DAP) + Ln(\varepsilon)$
7	Henricksen	$H = \beta_0 + \beta_1 Ln(DAP) + \varepsilon$
8	Campos et al. (1984)	$H = exp[\beta_0 + \beta_1(DAP)^{-1} + \beta_2 Ln(Hd)] + \varepsilon$
9	Chapmann e Richards	$H = \beta_0(1 - e^{-\beta_1 DAP})^{\beta_2} + \varepsilon$
10	-	$H = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{DAP^2} \right) + \varepsilon$

β_n = coeficientes a serem estimados, H = altura total (m), DAP = diâmetro medido a 1,30 m do solo (cm), Hd = altura dominante da parcela (m), Ln = logaritmo neperiano.

Fonte: Autora (2023).

A escolha da melhor equação foi realizada com base no maior coeficiente de determinação ajustado (R^2 aj.), menor erro padrão da estimativa (Syx%), menor desvio médio percentual (DMP), valor de F significante, menor valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos e análise gráfica dos resíduos

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

Redes Neurais Artificiais (RNA)

Foram treinadas oito Redes Neurais Artificiais-RNA, Multilayer Perceptron (MLP) (Tabela 2) por meio da linguagem de programação Python.

Tabela 2: Redes neurais treinadas e suas características.

RNA	Arquitetura	Algoritmo de Treinamento
1	3-12-1	MLP
2	10-5-1	MLP
3	10-20-1	MLP
4	30-20-1	MLP
5	40-20-1	MLP
6	2-8-5-1	MLP
7	2-8-8-1	MLP
8	2-8-1	MLP

RNA: Rede Neural Artificial; MLP: *Multilayer Perceptron*.

Fonte: Autora (2023).

As RNA's utilizadas foram do tipo MLP, utilizando as funções de ativação relu e sigmoidal. Os dados foram divididos aleatoriamente, onde 470 (70%) das árvores foram usadas no treinamento e 201 (30%) para a validação. Como critério de parada foi usado o número de ciclos igual a 1.000. A escolha da melhor RNA foi baseada nas seguintes métricas: *Root Mean Square Error* (RMSE), Coeficiente de determinação (R^2), *Mean Absolute Error* (MAE) e análise de resíduos.

Comparação Entre o Modelo de Regressão e a RNA

Para comparação entre o melhor modelo ajustado e a melhor rede neural foram utilizados os seguintes parâmetros estatísticos: *Root Mean Square Error* (RMSE), coeficiente de determinação (R^2) e gráfico de dispersão de resíduos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Equações Hipsométricas

O maior valor de F (Tabela 3) foi indicado pela equação de Chapmann e Richards. Todas as equações apresentaram F significativo a 5%. Com os valores de F é possível verificar que pelo menos um coeficiente da regressão é significativo, o que indica que existe regressão entre as variáveis dependentes e independentes.

Tabela 3: Coeficientes estimados e estatística de precisão.

Modelo	β_0	β_1	β_2	F	R^2_{aj}	Syx%	Syx _{aj}	DMP	VP
Assmann	8,096494	-15,623854	-	958,02	0,67	23,17	-	7,70	38
Trorey	-0,022773	0,972839	-0,027309	958,99	0,80	17,92	-	8,08	23

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

Prodan	1,619245	0,607597	0,070675	1404,19	0,86	-	18,65	-0,08	9
Azevedo et al.	0,581924	0,626575	-1,037618	608,08	0,72	-	18,37	4,60	28
Curtis	2,263589	-3,911533	-	1022,78	0,69	-	19,42	5,10	33
Stoffels	0,011979	0,832516	-	1192,85	0,72	-	19,10	4,70	28
Henricksen	-1,281681	3,534897	-	1811,94	0,79	18,32	-	6,97	19
Campos et al.	1,153297	-3,279164	0,537325	640,84	0,73	-	17,92	4,23	21
Chapmann e Richards	10,115976	0,132513	1,214154	8327,65	0,80	17,87	-	7,81	14
-	6,252260	-22,575571	-	396,94	0,73	29,75	-	13,17	37

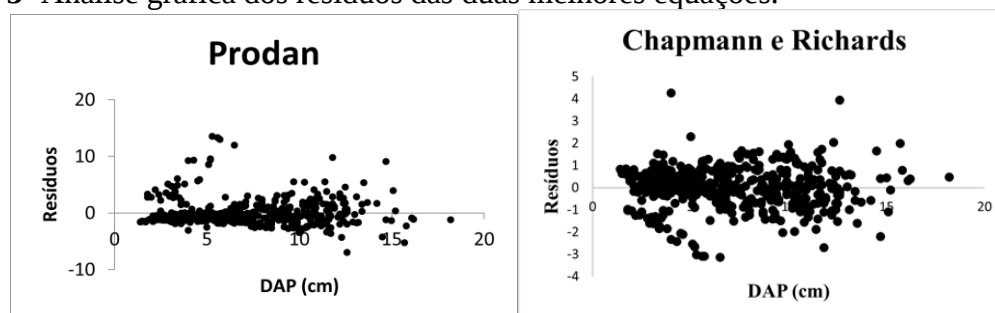
Em que: β_0 , β_1 e β_2 = Coeficientes de regressão; F= valor de F calculado; R^2 = coeficiente de determinação; R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado; Syx%= erro padrão; Syxajust= erro padrão ajustado; DMP= desvio médio percentual; e VP= valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos

Fonte: Autora (2023).

A equação com melhor valor para Coeficiente de Determinação Ajustado (R^2_{aj}) foi a de Prodan com 0,86. Barbosa (2019) encontrou valores de R^2_{aj} para a espécie *Khaya ivorensis*, variando de 0,91 a 0,73, valores que se aproximam do presente estudo. A equação com menor erro padrão foi a de Chapmann e Richards, Sousa et al. (2019), estudando um povoamento de *Khaya senegalensis* A. Juss de 5 anos de idade encontrou o valor de 12,39%, diferente do encontrado no presente estudo.

O Desvio Médio Percentual (DMP) representa a média dos desvios entre os valores reais e estimados, quanto mais próximo de zero menor é a tendência. Das dez equações ajustadas, nove superestima a altura, com exceção da equação de Prodan que subestima a altura em 0,08%. O teste de Qui-Quadrado realizado para validar as equações não revelou diferença estatística significativa nas equações ajustadas. Na análise gráfica é possível observar que os dois melhores modelos apresentam dispersão homogênea.

Figura 3- Análise gráfica dos resíduos das duas melhores equações.



Prodan, Chapmann e Richards: Modelos hipsométricos; DAP: Diâmetro à altura do peito.

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

O valor ponderado (VP) demonstra que a melhor equação para estimar a altura de *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. é a de Prodan, por obter um menor VP. Stolle et al. (2018), ajustando 5 modelos hipsométricos para *Khaya ivorensis* A. Chev constatou que o modelo de Curtis foi o melhor para estimar altura. Pereira et al. (2023), ajustando 7 modelos hipsométricos em povoamento de *Eucalyptus sp.* no Cerrado amapaense constatou que o melhor modelo foi o Parabólico e Linha reta.

Redes Neurais Artificiais

A RNA 4, 5 e 8 apresentaram os maiores valores para R^2 , com 0,73, quanto maior o R^2 , melhor a rede se ajusta aos dados (Tabela 4).

Tabela 4: Estatística de precisão das redes neurais artificiais treinadas para estimar altura de *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss.

RNA	Arquitetura	R^2	RMSE%	MAE%
1	3-12-1	0,69	8,46	6,34
2	10-5-1	0,71	8,37	6,25
3	10-20-1	0,70	8,49	6,29
4	30-20-1	0,73	8,07	5,96
5	40-20-1	0,73	8,14	6,06
6	2-8-5-1	0,66	8,69	6,49
7	2-8-8-1	0,70	8,33	6,07
8	2-8-1	0,73	8,13	6,12

RNA: Rede Neural Artificial; RMSE%: *Root Mean Square Error*; MAE: *Mean Absolute Error*.

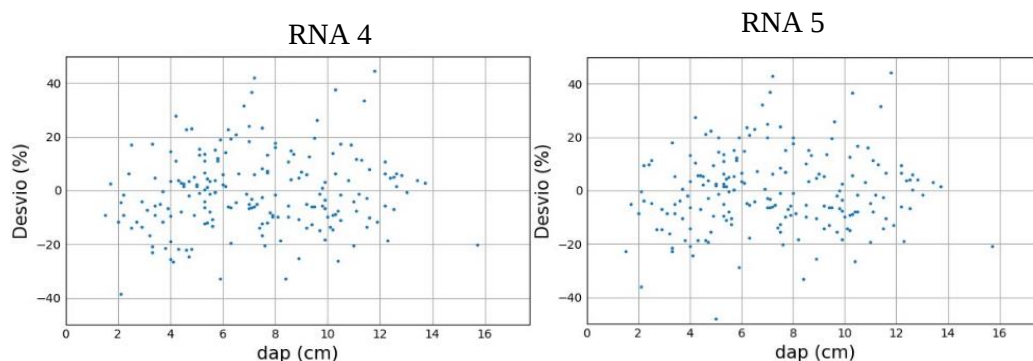
Fonte: Autora (2023).

Em relação a RMSE, todas as redes apresentaram valores semelhantes, quanto menor, melhor o desempenho da rede. Vendruscolo et al. (2017), estimando a altura de *Tectona grandis* L.f, utilizando redes neurais artificiais, obteve RMSE todos inferiores a 10%, valores semelhantes ao presente estudo.

A RNA 4 apresentou menor valor para MAE%, o que significa que as previsões estão feitas de forma mais precisa. De acordo com Bezerra et al. (2011), o MAE é um conjunto de previsões que mede a média do erro. A melhor rede é a RNA 4 por possuir maior R^2 , menor RMSE%, menor MAE% e homogeneidade nos resíduos (Figura 4).

Figura 4- Análise gráfica dos resíduos das três melhores redes neurais artificiais (RNA) testadas.

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA



RNA: Rede neural artificial; DAP: Diâmetro à altura do peito.

Comparação Entre o Modelo de Regressão e a Rede Neural Artificial

Comparando a melhor equação hipsométrica com a melhor RNA, é possível analisar que a equação de Prodan apresentou superioridade em relação ao coeficiente de determinação (R^2). Em termos de RMSE a equação de Prodan obteve 5,67%, sendo o menor valor entre os métodos. Todos os valores estão presentes na Tabela 5.

Tabela 5: Estatística de precisão das redes neurais artificiais (RNA) e equações hipsométricas.

Método	R^2	RMSE%
Prodan	0,86	5,67
RNA 4	0,73	8,07

R^2 : coeficiente de determinação; RNA: Rede Neural Artificial; RMSE%: *Root Mean Square Error*

Fonte: Autora (2023).

O método de regressão (Prodan) apresentou melhores resultados na estatística de precisão, sendo o melhor método para estimar altura de *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. Leal et al. (2020), estudando uma floresta plantada de *Eucalyptus urophylla*, no estado de Goiás, constatou que tanto as equações ajustadas quanto as redes neurais treinadas eram eficientes para estimar altura, entretanto, as RNA obtiveram maior desempenho em relação as estimativas, o que difere do presente estudo.

Nesta premissa, é importante destacar que neste trabalho foram usadas redes neurais com várias camadas e unidades ocultas, o que demanda um conjunto de dados de maior tamanho para evitar o overfitting (superajustamento). No entanto, o conjunto de dados utilizados para treinar as RNA's neste trabalho foi relativamente pequeno, isso dificulta a identificação de padrões complexos nos dados, então modelos mais simples como de regressão funcionam melhor. Segundo Ambrósio (2002), quando se trata de uma rede neural artificial é necessário um grande volume de dados para o melhor aprendizado da RNA.

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

CONCLUSÕES

No ajuste de equações por meio da regressão a melhor equação foi a de Prodan. Por meio das redes neurais artificiais (RNA), a RNA 4 foi a que obteve melhores coeficientes estatísticos. Tanto as equações ajustadas quanto as redes neurais são eficientes para estimar altura de *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. Entretanto, observando os resultados obtidos os ajustes por meio de regressão foram superiores as redes neurais artificiais.

APOIO FINANCEIRO

Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão- FAPEMA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMBRÓSIO, P. E. Redes neurais artificiais no apoio ao diagnóstico diferencial de lesões intersticiais pulmonares. 2002. Ribeirão Preto – SP. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Filosofia, Universidade de São Paulo.
- BARBOSA, G. P. Crescimento inicial e amostragem de espécies florestais para fins de uso múltiplo em uma propriedade rural. 2019.
- BEZZERRA, E. C.; REGO, M. C. O.; BRAGA, A. P. S.; LEÃO, R. P. S. Comparação entre modelos estatísticos e redes neurais usando persistência como referência para a previsão da velocidade do vento. X SBAI-Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, São Joao Del Rei-MG, v. 10, p. 369-374, 2011.
- CAMPOS, J. C.C.; LEITE, H. G. Mensuração Florestal: perguntas e respostas. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2017.
- FINGER, C.A.G. Biometria florestal. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2006.
- FLORIANO, E. P. Inventário Florestal. Rio Largo: Edição do Autor, 2021. 135 p.
- LEAL, F.A.; LEAL, G. S. A.; DA SILVA, T. C. Redes neurais artificiais e modelos alométricos aplicados para estimativa de volume e altura em *Eucalyptus urophylla* ST Blacke. Advances in Forestry Science, v. 7, n. 3, p. 1181-1188, 2020.
- PEREIRA, A. R. S.; SILVA, J. N. M.; ALMEIDA, M. R. D.; RABELO, F. G.; ABREU, J. C.; CORDEIRO, M. A.; LIMA, R. B.; LIMA, R. S. Ajuste de modelos hipsométricos em povoamento de *Eucalyptus* sp. no Cerrado amapaense. In: ANDRADE, Jaily Kerller Batista (Org.). Estudos em Ciências Biológicas e Florestais. Campina Grande: Licuri, 2023, p. 68-76.
- REIS, C.; OLIVEIRA, E.; SANTOS, A. Mogno-africano (*Khaya* spp.): atualidades e perspectivas do cultivo no Brasil. - Brasília, DF: Embrapa, 2019. 378 p.
- SOUSA, J. M.; JÚNIOR, R. A.; GUERRA, S. P.; EUFRATE-JÚNIOR, H. J. Modelagem de equações hipsométricas em plantio jovem de mogno africano (*Khaya senegalensis* A. Juss.) Botucatu-SP: Fatec, 2019.
- SPÖRL, C.; CASTRO, E. G.; LUCHIARI, A. Aplicação de Redes Neurais Artificiais na construção de modelos de fragilidade ambiental. Revista do Departamento de Geografia, v. 21, n.1. 2011.
- STOLLE, L.; VELOZO, D. R.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, C. R., & BEUTLING, A. Modelos hipsométricos para um povoamento jovem de *Khaya ivorensis* A. Chev. BIOFIX Scientific Journal, v 3, n.2, 2018.
- VENDRUSCOLO, D. G. S.; CHAVES, A. G. S.; MEDEIROS, R. A.; SILVA, R. S.; SOUZA, H. S.; DRESCHER, R.; LEITE, H. G. Estimativa da altura de árvores de *Tectona grandis* L.f. utilizando regressão e redes neurais artificiais. Sinop: Nativa. v.5, n.1, p-52-58, 2017.