

**INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS
CAMPUS SÃO JOÃO EVANGELISTA**

FERNANDA FERREIRA DA SILVA

**ÍNDICES MORFOMÉTRICOS DA COPA DE OITI ESTIMADOS POR REGRESSÃO
LOGÍSTICA E MÁQUINAS VETOR DE SUPORTE**

SÃO JOÃO EVANGELISTA

2019

FERNANDA FERREIRA DA SILVA

**ÍNDICES MORFOMÉTRICOS DA COPA DE OITI ESTIMADOS POR REGRESSÃO
LOGÍSTICA E MÁQUINAS VETOR DE SUPORTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Minas Gerais - Campus São João Evangelista como exigência parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Dr. Bruno Oliveira Lafetá

SÃO JOÃO EVANGELISTA

2019

FERNANDA FERREIRA DA SILVA

**ÍNDICES MORFOMÉTRICOS DA COPA DE OITI ESTIMADOS POR REGRESSÃO
LOGÍSTICA E MÁQUINAS VETOR DE SUPORTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Minas Gerais - Campus São João Evangelista como exigência parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador (a): Dr. Bruno Oliveira Lafetá

Aprovada em / /

BANCA EXAMINADORA

Orientador Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá

Instituto Federal de Minas Gerais- Campus São João Evangelista

Prof. Dr. Natália Risso Fonseca

Instituto Federal de Minas Gerais- Campus São João Evangelista

Prof. Me. Ivan Ilhéus Fontan

Instituto Federal de Minas Gerais- Campus São João Evangelista

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela sabedoria, força e coragem durante todos os dias da minha vida, por nunca ter me desamparado e por ser a peça principal para a realização desse sonho.

Agradeço a minha mãe Elizabeth, que abriu mão de seus sonhos pelos meus, ao meu pai Walter pelo apoio e pelo exemplo de garra que tenho ao meu filho Gabriel que sempre foi a minha maior motivação, a minha irmã Maria Eduarda que me ajudou bastante nas coletas de dados do TCC.

Aos amigos e familiares que estiveram ao meu lado, dando força e apoio.

Ao meu professor e orientador Bruno Oliveira Lafetá, um grande exemplo de profissional e ser humano a ser seguido, uma pessoa de essência inigualável.

Aos demais mestres da graduação que fizeram parte desta conquista, aos meus colegas de sala de aula onde conquistei alguns grandes amigos, à galera que comprava meus doces me ajudando de certa forma a chegar ao fim.

Ao IFMG – *Campus* São João Evangelista, minha segunda casa, uma verdadeira mãe, que além do ensino, me agregou muito conhecimento humano.

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a eficiência da modelagem de relações morfométricas interdimensionais da copa de *L. tomentosa* empregando regressão logística e Máquinas Vetor de Suporte (MVS). O inventário foi conduzido nos municípios de São João Evangelista e Peçanha em Minas Gerais, Brasil. Foram amostradas 116 árvores em 21 vias públicas. Calcularam-se o formal de copa, índice de saliência, índice de abrangência, grau de esbeltez, proporção de copa e área de projeção de copa. Foram testados dois métodos de modelagem para se obter estimativa de altura total, altura do primeiro galho vivo e índices morfométricos de copa ($r, p \leq 0,01$) em função exclusivamente do DAP, (uma por regressão não linear (modelo logístico) e por MVS). A altura total, altura do primeiro galho vivo, formal de copa, índice de abrangência e área de projeção de copa aumentaram à medida que fustes se tornaram mais espessos. O decréscimo com o aumento do DAP foi observado somente para o grau de esbeltez. Mesmo com a grande variabilidade encontrada na forma e dimensão das copas decorrentes do processo de crescimento, as relações morfométricas de *L. tomentosa* podem ser estimadas com precisão por modelos de regressão e máquinas vetor de suporte.

Palavras-chave: Arborização urbana; inteligência computacional; modelagem; regressão não linear.

ABSTRACT

The objective of the present work was to evaluate the efficiency of the modeling of interdimensional morphometric relationships of the *L. tomentosa* crown using logistic regression and Support Vector Machines (MVS). The inventory was conducted in the municipalities of São João Evangelista and Peçanha in Minas Gerais, Brazil. 116 trees were sampled in 21 public roads. The crown formal, salinity index, coverage index, degree of slenderness, crown ratio and crown projection area were calculated. Two modeling methods were tested to estimate total height, height of the first living branch and crown morphometric indices (r , $p \leq 0.01$) as a function of DBH (one by non-linear regression (logistic model) and by MVS). The total height, height of the first living branch, formal canopy, range index and canopy projection area increased as stems became thicker. The decrease with the increase in DBH was observed only for the degree of slenderness. Even with the great variability found in the shape and size of the crowns resulting from the growth process, the *L. tomentosa* morphometric relationships can be accurately estimated by regression models and support vector machines.

Keywords: Urban afforestation; computational intelligence; modeling; nonlinear regression.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. REVISÃO DE LITERATURA	9
2.1. ARBORIZAÇÃO URBANA	9
2.2. MÁQUINAS VETOR DE SUPORTE.....	9
3. MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL.....	10
3.2. MÉTODOS DE MODELAGEM E AVALIAÇÃO	11
4. RESULTADOS	12
5. DISCUSSÃO	18
6. CONCLUSÕES	21
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22

1. INTRODUÇÃO

Arborizar ruas e avenida das cidades constitui um dos maiores desafios para silvicultores urbanos e gestores das cidades. A arborização urbana desempenha funções sociais e ambientais essenciais para o cotidiano em centros urbanos, proporcionando benefícios psicológicos, melhor efeito estético, sombra para os pedestres e veículos proteção e direcionamento de vento, reduz a erosão hídrica proveniente do impacto da água da chuva e seu escoamento superficial, atenua o a sensação térmica e refresca o ambiente, filtra poluentes do ar e preservação de fauna (PIVETTA e SILVA FILHO, 2002).

A implantação de um sistema de arborização urbana, fundamentado no estabelecimento de árvores bem distribuídas nas vias públicas, aproveitando os benefícios das mesmas para o meio é importante para a qualidade de vida e bem-estar humano (MILLER, 1997). Segundo dados do (IBGE, 2010) mais de 80% da população brasileira vivem em centros urbanos e para estruturar e ordenar o crescimento das cidades, ocasionado pela procura de bens e serviços, as prefeituras buscam promover o planejamento urbano, que faz parte de diretrizes de uso e ocupação do solo.

Licania tomentosa (Benth) Fritsch, pertencente à família Chrysobalanaceae e é conhecida popularmente como oiti, é uma espécie amplamente empregada em projetos paisagísticos e programas de arborização urbana no Brasil (FERREIRA; GASPAROTTO; LIMA, 2001)). Ocorre na floresta pluvial Atlântica, desde Pernambuco ao norte do Espírito Santo e Minas Gerais. Sua madeira é pesada ($0,98\text{g cm}^{-3}$), resistente, grã direita, textura média para grossa, grande durabilidade, com alburno praticamente indistinto (LORENZI (2008). Suas folhas são simples, tomentosas em ambas as faces, de 7 a 14 cm de comprimento por 3 a 5 cm de largura. Floresce entre os meses de junho-agosto e seus frutos amadurecem de janeiro a março (LORENZI, 2008). Devido sua copa exuberante e conforto térmico por sombreamento, o oiti é geralmente selecionado para plantios em praças, jardins, ruas e avenidas (LORENZI, 2008; RIZZINI e MORS, 1995; SOUZA e LORENZI, 2005), também podendo ser utilizada para a recuperação de áreas degradadas (LORENZI, 2008).

A morfometria de árvores é um tema muito explorado para a análise da forma, dimensões e as relações interdimensionais de copa das árvores, com o intuito de melhor se compreender o espaçamento e o grau de competição entre as plantas. Atualmente, o diâmetro à altura do peito (DAP), a área basal, a altura (total, comercial e dominante), a área de

projeção da copa são conceitos bem conhecidos. Outras métricas também podem ser utilizadas na análise morfométrica da copa, como a proporção da copa, o grau de esbeltez, o índice de saliência, o índice de abrangência e o formal de copa (TONINI et al., 2008).

Segundo Bobrowski (2015), através da proporção de copa em árvores urbanas é possível determinar a qualidade de benefícios em função da quantidade de massa verde foliar, o grau de esbeltez pode ser utilizado para a escolha de ações de avaliação de árvores propícias à queda, já através do índice de saliência é possível planejar o espaçamento adequado para cada espécie de maneira que se obtenha o máximo crescimento e benefícios daquela espécie, o índice de abrangência pode ser utilizado como um indicativo para o planejamento da substituição gradativa das árvores, já o índice formal de copa possibilita expressar numericamente a característica estética da forma de copa das árvores e suas alterações.

Pesquisas que contemplem a modelagem da vegetação urbana fornecem subsídios para a otimização de uso do espaço urbano. Enfatiza-se que tais pesquisas são escassas e/ou, ainda, em fase de desenvolvimento. A maioria das pesquisas desenvolvidas e publicadas sobre relações interdimensionais da copa de árvores adotam modelos de regressão lineares. No entanto, o avanço de recursos computacionais tem permitido a modelagem não linear via regressão e inteligência computacional de forma precisa e com realismo biológico. Para modelagem não linear via regressão, tem se destacado setor florestal o modelo logístico pela facilidade de interpretação dos parâmetros e simplicidade de ajuste.

Segundo Vapnik (1995), Máquinas Vetores de Suporte (MVS) constituem um algoritmo de aprendizagem de máquina supervisionado na busca de relações entre variáveis dependentes e independentes (preditoras). Apesar de bastante incipiente nos sistemas de gestão florestal, as Máquinas Vetor de Suporte (MVS) diferenciam das redes neurais artificiais pelo princípio de minimização de risco estrutural da teoria de aprendizagem computacional, que sempre converge para um ótimo global.

Mediante o exposto, as seguintes hipóteses foram testadas: i) as MVS são eficientes para a estimativa de índices morfométricos da copa de árvores e ii) a regressão logística fornece estimativas de índices morfométricos não enviesados. Logo, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a eficiência da modelagem de relações morfométricas interdimensionais da copa de *L. tomentosa* empregando regressão logística e MVS.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. ARBORIZAÇÃO URBANA

Segundo Biondi e Althaus (2005), a arborização urbana, além de ser um serviço público, é um patrimônio que deve ser conhecido e preservado para as futuras gerações, devido às suas inúmeras contribuições. As autoras destacam alguns dos benefícios exercidos pela arborização como: beleza paisagística, equilíbrio do solo, regulação do microclima, promoção de abrigo à fauna, diminuição da velocidade do vento e poluição sonora, redução da temperatura do ar através do aumento da umidade relativa e produção de oxigênio, sensação de bem-estar à população, atuando tanto na saúde física e mental.

Os efeitos positivos da arborização para o bem estar ambiental urbano são indiscutíveis, segundo Miller (1996) e Milano (1987). Em cidades com temperaturas médias diárias acima do considerado ideal, estes efeitos poderão ser mais notáveis, podendo melhorar potencialmente a qualidade de vida da população, como exemplo, as cidades da região norte do Brasil.

A falta de diretrizes e normas para a arborização urbana favorece que iniciativas particulares desprovidas de conhecimento técnico favoreçam plantios irregulares, causando redução dos benefícios proporcionados pelas árvores e ocasionando transtornos para a população (ALMEIDA; RONDON NETO, 2010).

Com isso, conhecer a condição das árvores no ecossistema urbano torna-se imprescindível para um manejo adequado, buscando uma maior eficiência das diversas contribuições por estas ao ambiente.

Portanto, Bobrowski (2011) afirma que prefeituras e instituições de pesquisa devam realizar inventários florestais para verificar a qualidade, compreender o comportamento e detectar prejuízos e problemas advindos da arborização de uma cidade.

2.2. MÁQUINAS VETOR DE SUPORTE

Embasada na Teoria da Aprendizagem Estatística, a Máquina de Vetores Suporte, do inglês Support Vectors Machine – MVS foi desenvolvida por (VAPNIK, 1995), com o objetivo de resolver problemas de classificação de padrões. Segundo (HAYKIN, 1999) a máquina de vetores suporte é uma outra classe das redes neurais alimentadas adiante, ou seja, redes cujas saídas dos neurônios de uma camada alimentam os neurônios da camada posterior,

não ocorrendo assim uma realimentação. Esta técnica originalmente produzida para classificação binária, busca a construção de um hiperplano como superfície de decisão de tal forma que a separação entre exemplos seja máxima, isso considerando padrões linearmente separáveis, já para padrões não-linearmente separáveis, busca-se uma função de mapeamento apropriada para tornar o conjunto mapeado linearmente separável. Devido a sua eficiência em trabalhar com dados de alta dimensionalidade e reportada na literatura como uma técnica altamente robusta, muitas vezes comparada as Redes Neurais (SUNG; MUKKAMALA, 2003) e (DING; DUBCHAK, 2001).

Baseado sobre os princípios da teoria de aprendizagem estatística criada por Vapnik e Chervonenkis (1974), posterior a um treinamento de um subconjunto de dados, o algoritmo possui propriedades que permitem uma boa abstração de dados que antes não eram explorados (SMOLA, A. J.; SCHÖLKOPF, 2004).

2.3. REGRESSÃO LOGÍSTICA

Segundo Truett, Cornfield e Kennel (1967), a regressão logística é uma técnica estatística que tem como objetivo modelar, a partir de um conjunto de observações, a relação “logística” entre uma variável resposta dicotômica e uma serie de variáveis explicativas numéricas (contínuas, discretas) e/ou categóricas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

O trabalho foi conduzido nos municípios de São João Evangelista (SJE, altitude de 700m) e Peçanha (PEC, altitude de 690m), inseridos no Vale do Rio Doce em Minas Gerais, Brasil. A distância linear entre os municípios é de 22 Km. O clima da região é do tipo Cwa (temperado chuvoso-mesotérmico) pela classificação do sistema internacional de Köppen, com verão chuvoso e inverno seco. As médias anuais de temperatura e precipitação em SJE são de 20,2° C (médias variando de 16,7°C em julho a 22,8°C em janeiro e fevereiro) e 1.377 mm (médias variando de 10 mm em julho e agosto a 308 mm em dezembro),

respectivamente. Nesta sequência, Peçanha apresenta média de 20,4°C (médias variando de 17,3°C em julho a 23,1°C em janeiro) e 1.339 mm (médias variando de 13 mm em agosto a 287 mm em dezembro). Os dados climáticos foram oriundos de registros anuais de 1982 a 2012, disponibilizados gratuitamente por Climate-data.org (<http://es.climate-data.org/>).

Foram amostradas 116 árvores da espécie *L. tomentosa* distribuídas em 21 vias públicas, sendo 6 vias em SJE e o restante, em Peçanha. As árvores se encontravam sem sinais aparentes de poda, doenças ou ataque de insetos. Mensurou-se a circunferência a 1,30 m de altura do solo (Circunferência a Altura do Peito, CAP, cm) de todos os fustes empregando fita métrica; o diâmetro equivalente foi calculado para as árvores com tronco bifurcado. A altura total (H, m) e altura de inserção da copa (HIC – altura do primeiro galho vivo, caracterizado pela presença de folhas, m) foram tomadas com auxílio de vara telescópica. O comprimento da copa (L, m) foi calculado pela diferença entre H e HIC e o diâmetro da copa (Dc, m), pela média dos diâmetros da copa, obtida da medição de quatro raios nas direções paralela (//) e perpendicular (\perp) à orientação das vias públicas através da projeção vertical da copa.

Os seguintes índices morfométricos baseados no tamanho e na morfologia da árvore, conforme Sterba (1991) e Durlo e Denardi (1998), foram avaliados: Formal de Copa (FC), Índice de Saliência (IS), Índice de Abrangência (IA), Grau de Esbeltez (GE), Proporção de Copa (PC) e Área de Projeção de Copa (APC, m²). Os índices foram assim expressos: $FC = Dc/L$; $IS = Dc/DAP$; $IA = Dc/H$; $GE = H/DAP$; $PC = 100 L/H$ e $APC = DC^2 \cdot \pi/4$.

Os dados foram divididos aleatoriamente em grupos de parametrização (70% das amostras) e validação (30% das amostras), mutuamente exclusivos (técnica *holdout*), adotando método randômico de amostragem sem reposição. Nessa divisão, todos os municípios foram contemplados com árvores. Os dados de altura (H e HIC) e índices morfométricos (FC, IS, IA, GE, PC e APC) foram submetidos à análise de correlação de Pearson (r) com o DAP. A fim de minimizar problemas com a perda de precisão de preditores, assumiu-se a ausência de significância estatística de correlação pelo teste *t* ($r, p > 0,01$) como critério para a exclusão de variáveis durante a fase de parametrização.

3.2. MÉTODOS DE MODELAGEM E AVALIAÇÃO

Foram testados dois métodos de modelagem para a estimativa de alturas e índices morfométricos de copa ($r, p \leq 0,01$) em função exclusivamente do DAP, uma por regressão não linear e outra por MVS. Optou-se pelo DAP como variável preditora por ser facilmente obtida e convencionalmente analisada em inventários florestais. A análise de regressão foi realizada através do método iterativo de Levenberg-Marquardt, com o ajuste do modelo logístico de três parâmetros, $Y = \alpha(1 + \beta e^{-\gamma X})^{-1}$; em que α , β e γ são parâmetros do modelo logístico.

A construção de máquinas de vetores se baseou no processo de aprendizado estatístico descrito em detalhes por Vapnik (1995) e Meyer et al. (2017). As MVS foram implementadas usando o pacote R “e1071” (MEYER et al., 2017) com parâmetro de custo igual a 1, gama de 0,1 e épsilon de 0,1; parâmetros definidos por análise exploratória, com valores oscilando entre 0,001 e 10. Para a parametrização das MVS, foram analisados quatro tipos de funções Kernel (linear, base radial, sigmoide e polinomial). As funções Kernel são algoritmos que melhoram o poder computacional das máquinas de aprendizagem, possibilitando representar fenômenos de maior complexidade. Somente um tipo de função Kernel foi selecionada para compor as MVS nas análises gráficas subsequentes.

As seleções do método de modelagem e da função Kernel para compor as MVS para as estimativas de altura e índices morfométricos de copa se basearam na Média dos Desvios Absolutos (MDA), Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM), e coeficiente de correlação (r) entre valores observados e estimados. As análises gráficas consistiram na inspeção estatística da dispersão dos resíduos padronizados e dos valores observados em relação àqueles estimados.

Os pontos que extrapolaram a tendência geral dos dados não foram eliminados das análises estatísticas a fim de se verificar a capacidade da regressão logística VMS em lidar com *outliers* ou ruídos. Para diagnóstico de efeito estatístico, empregou-se 1% de significância em todas as análises. Estas foram efetuadas com auxílio dos softwares Curve Expert 1.4 e R versão 3.5.2 (R CORE TEAM, 2018).

4. RESULTADOS

Na fase de parametrização, a correlação positiva significativa ($p \leq 0,01$) do DAP foi evidenciada com a altura ($r = 0,8733$), altura do primeiro galho vivo ($r = 0,8733$), formal de copa ($r = 0,3550$), índice de abrangência ($r = 0,7269$) e área de projeção da copa ($r = 0,8973$). Somente o grau de esbeltez exibiu correlação negativa ($r = -0,6588$, $p \leq 0,01$). Logo, estes atributos foram selecionados para as modelagens de relação interdimensional (tabela1). As correlações do índice de saliência e proporção de copa foram inferiores a $|0,1|$ e não significativas ($p > 0,01$).

No grupo de parametrização, as árvores de menor e maior DAP apresentaram 23 e 74cm em São João Evangelista e 4 e 41cm em Peçanha, respectivamente. Na validação, as variações de DAP foram de 28 a 61cm no primeiro município e de 9 a 55cm no segundo.

As relações interdimensionais estabelecidas foram do DAP com a altura total, altura do primeiro galho vivo, formal de copa, índice de abrangência, grau de esbeltez e área de projeção da copa (Tabela 1). Como esperado, a assíntota, representada pelo parâmetro “ α ”, foi positiva em todos os ajustes realizados com o modelo logístico. A modelagem via regressão apresentou poucos desvios nas fases de parametrização e treinamento, com baixos valores de MDA e RQEM. A precisão das estimativas aumentou com o grau de associação entre variáveis resposta e preditoras.

Tabela 1. Coeficientes e qualidade de ajuste do modelo logístico para a estimativa de alturas e índices morfométricos da copa em função do DAP de árvores de *L. tomentosa*, da arborização urbana de São João Evangelista e Peçanha, em Minas Gerais, Brasil.

Atributos	H	HIC	FC	IA	GE	APC
α	10,212522	4,479086	2,809875	1,459569	0,188298	130,274676
β	3,472545	4,271139	4,041158	2,480117	-0,988345	86,138257
γ	0,062083	0,114873	0,123407	0,049854	0,072739	0,108048
----- Parametrização -----						
MDA	0,7202	0,8381	0,7028	0,1480	0,0341	8,5471
RQEM	0,9063	1,0460	1,1204	0,1930	0,0459	13,7012
r	0,8914**	0,6406**	0,4084**	0,7387**	0,8710**	0,9200**
----- Validação -----						
MDA	0,9827	1,0208	1,1341	0,2146	0,0379	14,2209
RQEM	1,2998	1,2558	1,5993	0,2660	0,0477	23,1088
r	0,7932**	0,5326**	0,5382**	0,5052**	0,7063**	0,7805**

H = altura total; HIC = altura do primeiro galho vivo; FC = formal de copa; IA = índice de abrangência; GE = grau de esbeltez; APC = área de projeção de copa; α , β e γ = parâmetros do modelo logístico; MDA = média dos desvios absolutos; RQEM = raiz quadrada do erro médio e; r = coeficiente de correlação de Pearson. **significativo a 1% de probabilidade pelo

teste *t*.

Dentre as funções Kernel, as MVS de base radial tiveram melhor desempenho na estimativa de alturas e índices morfométricos de *L. tomentosa* nas fases de parametrização e validação (Tabela 2). Em termos gerais, no que se refere às estatísticas utilizadas para avaliar a qualidade preditiva dos métodos de modelagem, a regressão se mostrou um pouco melhor do que as MVS na fase de validação. Nesta fase de processamento, a correlação entre os valores observados e estimados para o formal de copa pela regressão foi 2,4 vezes maior que aquela via MVS.

Tabela 2. Estatísticas das aproximações por máquinas de vetores de suporte construídas para a estimativa de alturas e índices morfométricos da copa em função do DAP de árvores de *L. tomentosa*, da arborização urbana de São João Evangelista e Peçanha, em Minas Gerais, Brasil.

Kernel	Atributos	H	HIC	FC	IA	GE	APC
----- Parametrização -----							
Linear	MDA	0,7800	0,8842	0,6866	0,1522	0,0402	11,2206
	RQEM	0,9900	1,0857	1,1636	0,1984	0,0748	15,6543
	r	0,8733**	0,6070**	0,3550**	0,7269**	0,6588**	0,8973**
Radial	MDA	0,7045	0,8631	0,6799	0,1495	0,0384	8,5115
	RQEM	0,9188	1,0635	1,1587	0,1934	0,0708	13,8007
	r	0,8901**	0,6251**	0,3947**	0,7404**	0,7086**	0,9196**
Sigmoide	MDA	0,7990	0,8912	0,6877	0,1534	0,0405	11,3654
	RQEM	0,9926	1,0847	1,1640	0,2025	0,0749	16,5234
	r	0,8692**	0,6065**	0,3574**	0,7229**	0,6548**	0,8970**
Polinomial	MDA	1,3764	1,0473	0,7305	0,2023	0,0531	21,0932
	RQEM	1,8486	1,2763	1,2171	0,2626	0,0903	29,9144
	r	0,5284**	0,4053**	0,2108 ^{ns}	0,4431**	0,4327**	0,6537**
----- Validação -----							
Linear	MDA	1,0167	1,1154	0,8250	0,2128	0,0339	13,8358
	RQEM	1,3708	1,3570	1,9820	0,2650	0,0433	19,1133
	r	0,7708**	0,4447**	0,1542 ^{ns}	0,4951**	0,7651**	0,7950**
Radial	MDA	0,9374	1,0673	0,8067	0,2115	0,0348	13,7848
	RQEM	1,3218	1,3005	1,9658	0,2617	0,0427	21,9901
	r	0,7894**	0,4947**	0,2268 ^{ns}	0,5039**	0,7716**	0,7845**
Sigmoide	MDA	1,0414	1,1050	0,8203	0,2132	0,0335	12,8383
	RQEM	1,3251	1,3295	1,9810	0,2657	0,0433	17,9268

	r	0,7687**	0,4436**	0,1576 ^{ns}	0,4933**	0,7632**	0,7963**
Polinomial	MDA	1,4813	1,1940	0,8208	0,2400	0,0451	17,5365
	RQEM	1,6575	1,3874	2,0076	0,2908	0,0574	25,3893
	r	0,5768**	0,3186 ^{ns}	0,0417 ^{ns}	0,3710 ^{ns}	0,6294**	0,6433**

H = altura total; HIC = altura do primeiro galho vivo; FC = formal de copa; IA = índice de abrangência; GE = grau de esbeltez; APC = área de projeção de copa; MDA = média dos desvios absolutos; RQEM = raiz quadrada do erro médio e; r = coeficiente de correlação de Pearson. **,^{ns} significativo e não significativo a 1% de probabilidade pelo teste *t*, respectivamente.

O comportamento homocedástico dos resíduos padronizados foi evidente para ambos os métodos de modelagem avaliados, exceto nas ocasiões em que se avaliaram a altura do primeiro galho vivo e o grau de esbeltez (Figura 1). As MVS concentraram os resíduos padronizados mais próximos ao eixo das abscissas. A maioria dos índices morfométricos cresceram de forma sigmoide com o aumento do DAP das árvores, tendendo a uma estabilização (Figura 2). Apenas o grau de esbeltez decresceu no formato sigmoide.

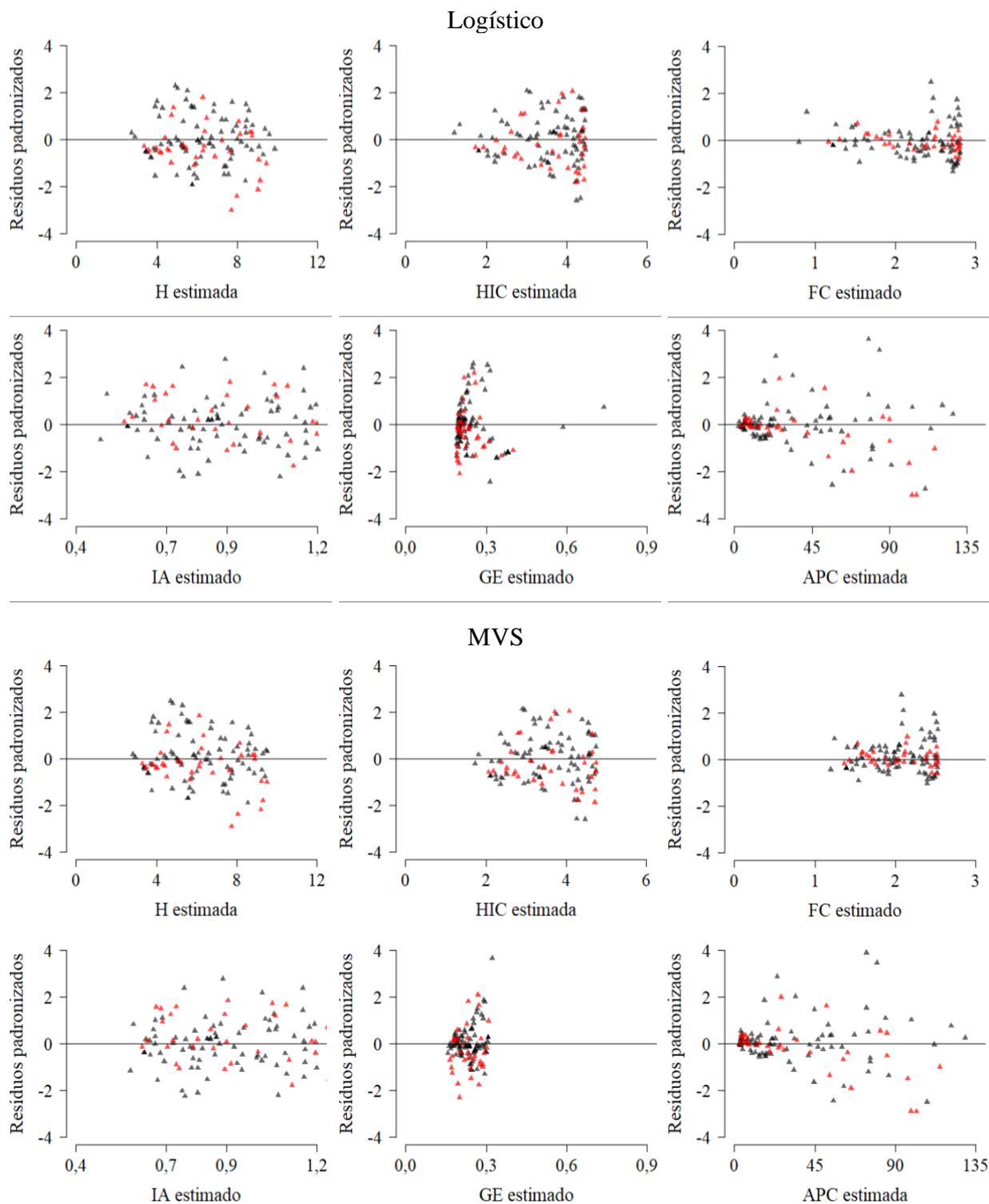


Figura 1. Gráficos de resíduos padronizados gerados a partir do ajuste do modelo logístico no canto superior e máquinas de vetores de suporte com função Kernel de base radial no canto inferior. H = altura total (m); HIC = altura do primeiro galho vivo (m); FC = formal de copa; IA = índice de abrangência; GE = grau de esbeltez; APC = área de projeção de copa (m²). Grupos de parametrização e validação em preto e vermelho, respectivamente.

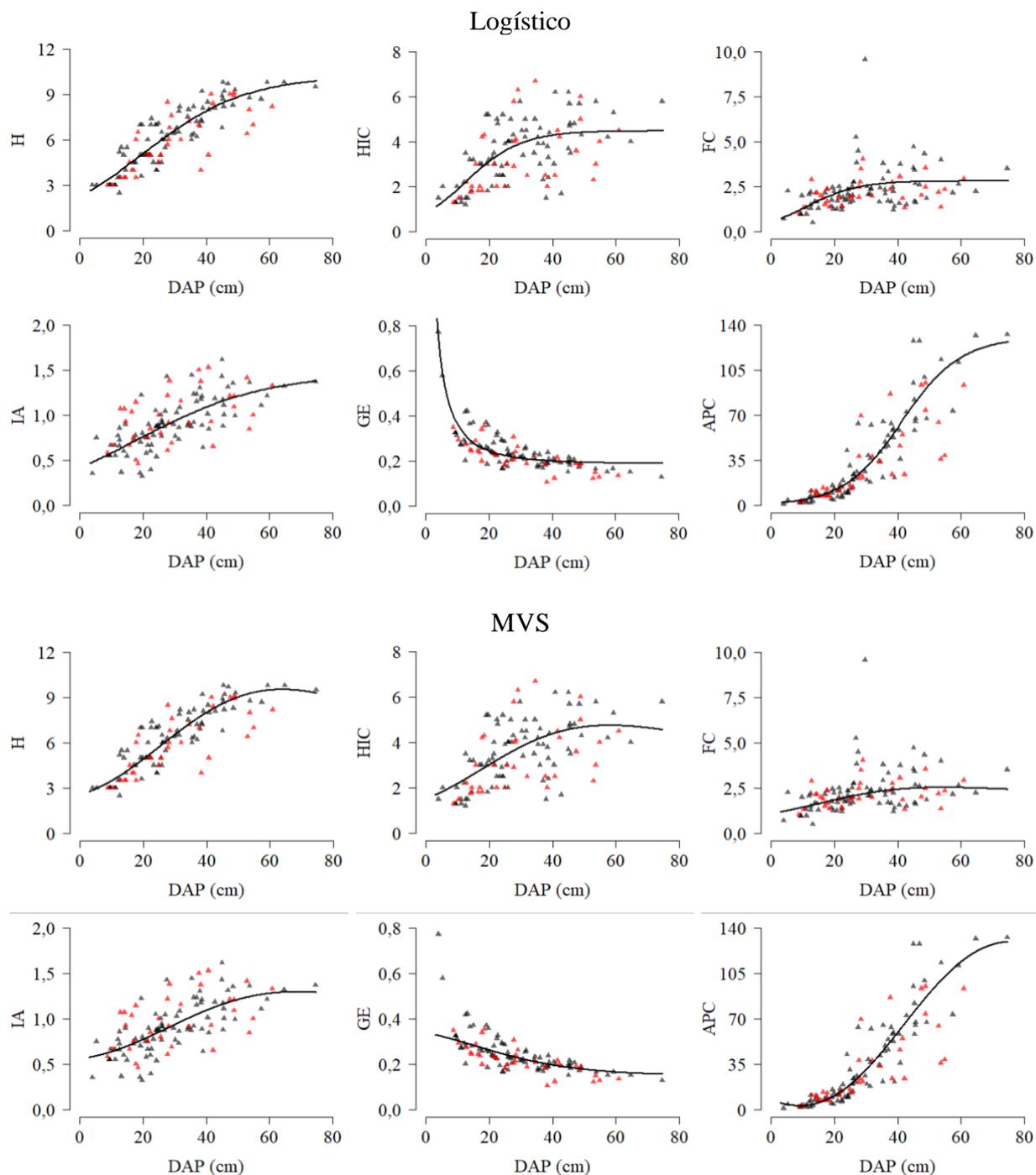


Figura 2. Valores observados e curvas geradas para as alturas e índices morfométricos da copa em função do DAP de árvores de *L. tomentosa*, presentes na arborização urbana de São João Evangelista e Peçanha, em Minas Gerais, Brasil. H = altura total (m); HIC = altura do primeiro galho vivo (m); FC = forma de copa; IA = índice de abrangência; GE = grau de esbeltez; APC = área de projeção de copa (m²). Grupos de parametrização e validação em preto e vermelho, respectivamente.

5. DISCUSSÃO

A análise da arborização urbana de dois municípios próximos geograficamente ampliou a amplitude de variação de DAP da *L. tomentosa* e contribuiu para a melhoria da qualidade preditiva dos métodos de modelagem, justificando o uso da técnica *holdout* de validação.

Definiram-se relações interdimensionais para a estimativa de duas alturas e quatro índices morfométricos da copa de árvores de *L. tomentosa*, que apresentaram correlação significativa com o DAP. O aumento da altura total e das dimensões da copa com o acréscimo diamétrico do tronco já era biologicamente esperado para árvores sem limitações espaciais de crescimento (COSTA; FINGER, 2017). Salienta-se que correlações negativas de índices morfométricos da copa com o DAP devido ao contato entre copas e estabelecimento de competição podem ocorrer no âmbito de povoamentos florestais equiâneos (TRINDADE et al., 2019). A forte correlação ($r \geq |0,60|$), segundo classificação de (CAMPBELL, 2006), e negativa entre o grau de esbeltez e o DAP pode ser explicada pela própria expressão matemática do índice, que se relaciona inversamente com o diâmetro.

Apesar da ampla variabilidade genética da produção seminal de mudas e comum indeterminação da idade de árvores no paisagismo de municípios brasileiros, a altura total, altura do primeiro galho vivo, forma de copa, índice de abrangência e área de projeção da copa foram estimados de maneira satisfatória pela regressão logística (Tabela 1). A qualidade preditiva destes atributos foi confirmada visualmente nas Figuras 1 e 2. Entretanto, mesmo com coeficiente de correlação superior a $|0,7|$ nas fases de parametrização e validação (Tabela 1), as estimativas da equação do grau de esbeltez foram tendenciosas para árvores de maior DAP, perdendo a precisão (Figura 2). Enfatiza-se que a diminuição do grau de esbeltez à medida que aumentou o DAP é um indicativo importante de estabilidade contra a ação eólica (COSTA; FINGER, 2017; COSTA et al., 2016), reduzindo riscos de acidentes a transeuntes e veículos. Apesar de o grau de esbeltez representar um indicativo de estabilidade, ainda, recomenda-se o monitoramento qualitativo e quantitativo contínuo de árvores para maior segurança e sucesso da arborização urbana.

A assíntota positiva das equações geradas evidenciou um potencial uso para delinear o comportamento biológico de troncos mais grossos. A estimativa de máxima altura das árvores de *L. tomentosa* para as condições edáficas e climáticas de São João Evangelista e Peçanha são de 10,21m, condizente com o apresentado por Lorenzi (2008), que descreve uma variação

de 6 a 15m para espécie. Informações tradicionalmente encontradas na literatura florestal relatam variações mínimas e máximas apenas de altura e DAP, subsidiando parte do planejamento da seleção de espécies e locais adequados para a implementação de projetos paisagísticos.

A altura de inserção da copa esperada para indivíduos de maior porte da espécie em estudo é de 4,48m, o que favorece o trânsito de transeuntes e pequenos veículos em segurança, corroborando com a realidade observada em ambos os municípios. A expectativa é a de que as árvores alcancem uma área de projeção de copa foi de 130,27 m², ou seja, 77 árvores sem limitações de crescimento forneceriam, aproximadamente, 1 hectare de área sombreada. Este resultado possui grande importância prática, social e ambiental, pois o sombreamento aumenta a vida útil do asfalto, reduz a erosão e promove conforto térmico para a instalação de áreas de lazer e convivência em centros urbanos.

Mudanças na forma da copa de árvores foram evidenciadas, indivíduos de menor DAP, tenderam a exibir copas mais achatadas e aqueles de maior dimensão, copas de maior comprimento vertical. É provável que as árvores de *L. tomentosa* invistam inicialmente mais recursos na expansão lateral da copa do que no seu comprimento vertical. Este evento, também, pode ser comprovado na análise de tendência da relação entre diâmetro de copa e altura total, expressa pelo índice de abrangência, que tendeu ao aumento à medida que os fustes se tornaram mais grossos. Tais características devem ser vista com cautela na arborização urbana, pois implica em necessidade de espaço para o pleno desenvolvimento da espécie, reduzindo a área para transeuntes em calçadas.

O emprego da função Kernel de base radial melhorou o desempenho das MVS, apresentando um ganho considerável em precisão quando comparada, principalmente, à função polinomial. Essa diferença é evidente quando se analisa as estatísticas da Tabela 2. Tal progresso em qualidade preditiva está de acordo com o relatado em diversas pesquisas, envolvendo o uso de funções Kernel na solução de problemas de alta complexidade (GHITESCU *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2017).

A eficiência computacional, simplicidade e adaptação para otimização são características que favorecem a implementação de MVS com função Kernel de base radial (SILVA *et al.*, 2017). Embora as estimativas do grau de esbeltez com aplicação dessa MVS tenha apresentado perda de precisão em fustes de menor DAP, não se observou perda acentuada de qualidade preditiva (Figura 2).

As curvas da Figura 2 mostraram que ambos os métodos de modelagem estabeleceram relações interdimensionais com realismo biológico, com clara tendência de acréscimo da altura total, altura do primeiro galho vivo, formal de copa, índice de abrangência e área de projeção de copa. Trata-se de um acréscimo comprovado pelos valores positivos e significativos ($p \leq 0,01$) dos coeficientes de correlação.

Diante da dificuldade supracitada no estabelecimento de relações interdimensionais com a copa de *L. tomentosa*, os métodos de modelagem apresentaram relativamente poucas estimativas discrepantes (resíduos padronizados fora do intervalo de -3 a 3) (Figura 1). A qualidade preditiva dos métodos de modelagem não foi influenciada pela presença de valores atípicos.

A aplicação de MVS com função Kernel do tipo base radial para estimativa de altura e índices morfométricos apresentou desempenho preditivo similar à regressão logística. No caso específico do grau de esbeltez, a MVS modelou com maior precisão fustes mais grossos, permitindo melhor análise de tendência assintótica. Esta similaridade possui grande importância prática pois o uso das equações logísticas é simples, rápida e de fácil aplicação. Ressalta-se que uma constante aferição nos valores dos índices morfométricos é necessária, pois variações podem ocorrer para um mesmo genótipo em função das condições edáficas e climáticas (COBLE *et al.*, 2014; SAPIJANSKAS *et al.*, 2014).

Os métodos de modelagem demonstraram capacidade em representar informações biológicas, sendo promissoras para reduzir o esforço amostral em levantamentos de copa em inventários florestais e aumentar a precisão de estimativas. Os resultados obtidos fornecem subsídios para o desenvolvimento de futuras pesquisas sobre a modelagem de relações morfométricas interdimensionais da copa de árvores. A modelagem mostrou-se uma eficiente técnica estatística capaz de representar indiretamente índices morfométricos a partir de medições rotineiras de campo, como DAP.

O sucesso da gestão da arborização urbana depende do detalhamento de informações disponíveis. O interesse do setor florestal no uso de inteligência computacional aliada a aplicabilidade da modelagem de relações morfométricas interdimensionais de copa contribuem para a fundamentação de decisões silviculturais e compreensão da dinâmica de crescimento vegetal em áreas urbanizadas. As limitações em se ajustar modelos não lineares ou MVS têm sido solucionadas devido a avanços tecnológicos da informática, facilitando parametrizações e a escolha da melhor alternativa de modelagem.

6. CONCLUSÕES

Mesmo com a grande variabilidade encontrada na forma e dimensão das copas decorrentes do processo de crescimento, as relações morfométricas de *L. tomentosa* podem ser estimadas com precisão por modelos de regressão e máquinas vetor de suporte.

A técnica de máquinas vetor de suporte pode ser recomendada para predição de índices morfométricos da copa de *L. tomentosa* utilizando o DAP como variável preditora.

O modelo logístico se adequou satisfatoriamente ao problema, mais especificadamente, na definição precisa da assíntota da relação do DAP com a altura total, altura do primeiro galho vivo, formal de copa, índice de abrangência e área de projeção de copa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, D.N.; RONDON NETO, R.M. Análise da arborização urbana de duas cidades da região norte do Estado de Mato Grosso. **Revista Árvore**, Viçosa, v.34, n.5, p.899-906, 2010.

BIONDI, D.; ALTHAUS, M. Árvores de rua de Curitiba: cultivo e manejo. Curitiba: FUPEF, 2005.

BOBROWSKI, R. Estrutura e dinâmica da arborização de ruas de Curitiba, Paraná, no período 1984 - 2010. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

CAMPBELL, M. J. **Statistics at square two: understanding modern statistical applications in medicine**. 2. ed. London: BMJ Books – Blackwell Publishing, 2006. 144p.

COBLE, A. P.; AUTIO, A.; CAVALIERI, M. A.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Converging patterns of vertical variability in leaf morphology and nitrogen across seven *Eucalyptus* plantations in Brazil and Hawaii, USA. **Trees**, Berna, v. 28, p. 1-15, 2014.

COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G. Efeito da competição nas relações dimensionais de Araucária. **Floresta e Ambiente**, v. 24, e20150145, 2017.

COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G.; FLEIG, F. D. Influência da posição social nas relações morfométricas de *Araucária angustifolia*, v. 26, n. 1, p. 225-234, 2016.

DING, C. and DUBCHAK, I. (2001). Multi-class protein fold recognition using support vector machines and other kernel-based learning methods. Cambridge University Press, 17(4):349-358.

DURLO, M. A.; DENARDI, L. Morfometria de *Cabralea canjerana*, em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 55-66, 1998.

FERREIRA, F. A.; GASPAROTTO, L.; LIMA, M. I. P. M. Uma ferrugem causada por *Phakopsoratomentosa* sp. em OITI, em Manaus - AM. **Fitopatologia Brasileira**, v. 26, n. 2, p. 206-208, 2001.

GHITESCU, R.; CURTEANU, S.; MIHAILESCU, C.; VOLF, I.; LEON, F.; GILCA, A. I.; POPA, V. I. Support vector machine combined with genetic algorithm for optimization of microwave-assisted extraction of polyphenols from spruce wood bark. **Cellulose Chemistry and Technology**, Bucareste, v. 51, n. 3-4, p. 203-213, 2017.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo demográfico brasileiro, 2010. Disponível em: < <http://7a12.ibge.gov.br/vamos-conhecer-o-brasil/nosso-povo/caracteristicas-da-populacao>>. Acesso em: 21/08/2019.

LORENZI, H. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 5.ed. Nova Odessa: Platarum, 2008. 384p.

MEYER, D.; DIMITRIADOU, E.; HORNIK, K.; WEINGESSEL, A.; LEISCH, F.; CHANG, C.; LIN, C. **e1071**: Misc Functions of the Department of Statistics, Probability Theory Group (Formerly: E1071), TU Wien. R package version 1.6-8, 2017.

MILANO, M. S.; DISPERATI, A. A. Análise da quantidade e distribuição das áreas verdes no município de Curitiba, PR. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE ARBORIZAÇÃO URBANA, 1987, Maringá. Anais...Maringá. V.2, p.165-173, 1987.

MILLER, R. W. Urban Forestry: planning and managing urban greenspaces. Upper Saddle River, New Jersey, USA: Prentice Hall, 1996, 502 p.

PIVETTA, K. F. L.; SILVA FILHO, D. F. Arborização urbana. Jaboticabal: UNESP/FCAV/FUNEP, 2002. 74p. (Boletim Acadêmico. Série Arborização Urbana).

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2018.

SAPIJANSKAS, J.; PAQUETTE, A.; POTVIN, C.; KUNERT, N.; LOREAU, M. Tropical tree diversity enhances light capture through crown plasticity and spatial and temporal niche differences. **Ecology**, Amsterdam, v. 25, n. 9, p. 2479-2492, 2014.

SILVA, M. B. P.; ESCOBEDO, J. F.; SANTOS, C. M.; ROSSI, T. J.; SILVA, S. H. M. G. Performance of the Angstrom-Prescott Model (A-P) and SVM and ANN techniques to estimate the daily global solar irradiation in Botucatu/SP/Brazil. **Journal of Atmospheric and solar-terrestrial physics**, Amsterdam, v. 160, p. 11-23, 2017.

STERBA, H. **Forstliche Ertragslehre**. Wien: Universität für Bodenkultur, 1991. 160p.

SUNG, A. H.; MUKKAMALA, S. Identifying important features for intrusion detection using support vector machines and neural networks. Applications and the Internet, 2003. Proceedings. 2003 Symposium on, p. 209–216, January 2003.

TRINDADE, R. N. R.; LAFETÁ, B. O.; AGUIAR, V. F.; SILVA, A. G.; FERRARO, A. C.; PENIDO, T. M. A.; VIEIRA, D. S. Morfometria da copa de povoamento de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden x *E. urophylla* S. T. Blake em diferentes espaçamentos de plantio. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 121, p. 83-91, 2019.

TRUETT, J. CORNFIELD, J. and KANNEL, W.(1967) A multivariate analysis of the risk of coronary heart disease in Framingham. *Journal of Chronic Diseases*. v. 20, p. 511-524.

VAPNIK, V. N. **The nature of statistical learning theory**. New York: Springer-Verlag, 1995. 188p.