



O efeito de rajadas de vento na inclinação da placa de raízes em árvores urbanas

Thamires de Souza Carvalho¹ **Angeline Martini**² **Marina Moura de Souza**³ and
 Ana Claudia Nogueira da Silva⁴

¹ MSc. em Ciência Florestal Prefeitura Municipal de Viçosa - PMV. Viçosa, Minas Gerais –
Brasil. dsc.thamires@gmail.com

² Dra. em Engenharia Florestal. Universidade Federal de Viçosa - UFV. Viçosa, Minas Gerais –
Brasil. martini.angeline@gmail.com

³ Dra. em Ciência Florestal. Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG. Belo Horizonte,
Minas Gerais – Brasil. marina.souza@cemig.com.br

⁴ MSc. em Ciência Florestal. Universidade Federal de Viçosa - UFV. Viçosa, Minas Gerais –
Brazil. anac.nogueira@ufv.br

Notas dos autores

Os autores não têm conflitos de interesse a declarar.

A correspondência relacionada a este artigo deve ser dirigida para Angeline Martini -
martini.angeline@gmail.com

Agradecimentos: Os autores gostariam de agradecer à Companhia Energética de Minas Gerais -
Distribuição (CEMIG) por emprestar o equipamento que permitiu o desenvolvimento desta pesquisa, bem
como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Código de
Financiamento 001).

Cite como - American Psychological Association (APA)

Carvalho, T. S., Martini, A., Souza, M. M., & Silva, A. C. N. (2024). O efeito de rajadas de vento na inclinação da placa de
raízes em árvores urbanas. *J. Environ. Manag. & Sust.*, 13(1), 1-28, e23715.

<https://doi.org/10.5585/2024.23715>





Resumo

Objetivo: Analisar o efeito de rajadas de vento na inclinação da placa de raízes em árvores urbanas e identificar as variáveis dendrométricas que mais interferem na resposta das árvores quanto à inclinação da placa de raízes, de modo a contribuir com a gestão do planejamento urbano direcionado a cidades sustentáveis.

Metodologia: Os dados de inclinação foram coletados pelo *Tree Motion Sensors* (TMS), que registra a inclinação real da placa de raízes de árvores. A inclinação máxima, média e o número de ocorrências de inclinação foram relacionados com a rajada de vento máxima e com as características dendrométricas dos indivíduos arbóreos.

Originalidade/Relevância: A Floresta Urbana é fundamental para a melhoria da qualidade ambiental e habitacional das cidades. Contudo, no ambiente urbano, as árvores encontram condições estressantes que podem comprometer sua estrutura e estabilidade, aumentando o risco de queda. Pesquisas que analisam os efeitos das cargas exercidas por elementos naturais nas árvores urbanas podem fornecer informações relevantes para a previsão dos riscos à queda.

Resultados: O vento foi o fator responsável por aproximadamente 51% das ocorrências de inclinação da placa de raízes e a maioria das árvores apresentou tendência de oscilação no sentido sudoeste/nordeste. *Lagerstroemia speciosa* (L.) Pers. foi a espécie com maior ângulo de inclinação. O DAP e o diâmetro de copa foram as variáveis que apresentaram uma correlação significativamente forte com a inclinação da placa de raízes.

Contribuições para a gestão: Estes resultados podem auxiliar a elaboração de medidas preventivas à queda de árvores, contribuindo com a gestão efetiva da silvicultura urbana em vista do estabelecimento de cidades mais sustentáveis e resilientes, de modo a amparar ações de sustentabilidade aplicadas ao planejamento urbano.

Palavras-chaves: estabilidade de árvores, floresta urbana, mitigação de risco, queda de árvores.





THE EFFECT OF WIND GUSTS ON ROOT PLATE INCLINATION IN URBAN TREES

Abstract

Objective: To analyze the effect of wind gusts on the root plate inclination in urban trees and to identify the dendrometric variables that most interfere with the trees' response regarding the root plate inclination in order to contribute to the management of urban planning aimed at sustainable cities.

Methodology: The inclination data was collected by Tree Motion Sensors (TMS), which record the actual inclination of the tree root plate. The maximum and average slope and the number of slope occurrences were related to the maximum wind gust and the dendrometric characteristics of the trees.

Originality/Relevance: The Urban Forest is fundamental for improving the environmental and housing quality of cities. However, trees encounter stressful conditions in the urban environment which can compromise their structure and stability, increasing the risk of falling. Research that analyzes the effects of loads exerted by natural elements on urban trees can provide relevant information for predicting fall risks.

Results: Wind was the factor responsible for approximately 51% of the occurrences of root plate tilting and most of the trees showed a tendency to sway in a southwest/northeast direction. *Lagerstroemia speciosa* (L.) Pers. was the species with the greatest inclination angle. DBH and crown diameter were the variables which showed a significantly strong correlation with root plate inclination.

Contributions to management: These results can help to develop preventive measures against tree falls, contributing to the effective management of urban forestry in order to establish more sustainable and resilient cities, so as to support sustainability actions applied to urban planning.

Keywords: tree stability, urban forestry, risk mitigation, falling trees.





EFFECTO DE LAS RÁFAGAS DE VIENTO EN LA INCLINACIÓN DE LA PLACA RADICULAR DE LOS ÁRBOLES URBANOS

Resumen

Objetivo: Analizar el efecto de las rachas de viento sobre el vuelco de la placa radicular en árboles urbanos e identificar las variables dendrométricas que más interfieren en la respuesta de los árboles respecto al vuelco de la placa radicular.

Metodología: Los datos de inclinación se recogieron mediante sensores de *Tree Motion Sensors* (TMS), que registran la inclinación real de la placa radicular. El máximo, la media y el número de inclinaciones se relacionaron con la ráfaga de viento máxima y las características dendrométricas de los individuos arbóreos.

Originalidad/Relevancia: El bosque urbano es fundamental para mejorar la calidad medioambiental y de la vivienda de las ciudades. Sin embargo, en el entorno urbano, los árboles se enfrentan a condiciones de estrés que pueden comprometer su estructura y estabilidad, aumentando el riesgo de caída. Las investigaciones que analizan los efectos de las cargas ejercidas por los elementos naturales sobre los árboles urbanos pueden aportar información relevante para la predicción de los riesgos de caída.

Resultados: El viento es el factor responsable de aproximadamente el 51% de los casos de inclinación de la placa radicular y la mayoría de los árboles mostraron una tendencia a oscilar en dirección suroeste/noreste. *Lagerstroemia speciosa* (L.) Pers. fue la especie con el mayor ángulo de inclinación. El DAP y el diámetro de la copa fueron las variables que mostraron una correlación significativamente fuerte con la pendiente de la placa radicular.

Aportaciones para la gestión: Estos resultados pueden ayudar al desarrollo de medidas preventivas para la caída de árboles, contribuyendo a la gestión eficaz de la silvicultura urbana con vistas a establecer ciudades más sostenibles y resilientes.

Palabras-clave: estabilidad de los árboles, silvicultura urbana, mitigación de riesgos, caída de árboles





Introdução

A floresta urbana é um componente essencial para manter a qualidade ambiental e a sustentabilidade dos ecossistemas urbanos (Yang et al., 2021). Promove diversos benefícios, como estabilizar e melhorar a temperatura, minimizar os efeitos decorrentes da poluição, proporcionar alimento e abrigo para a fauna, além de contribuir para o lazer e bem estar da população (Leitão, 2016; De Melo, De Lira Filho & Júnior, 2019). No entanto, todas as árvores têm potencial de apresentar certo grau de risco para as pessoas, edifícios e instalações públicas, principalmente aquelas mais antigas, fragilizadas com ataque de pragas e manejadas inadequadamente (Li et al., 2022).

A condição estressante do ambiente imposta ao desenvolvimento das árvores contribui ainda mais para este agravante nas cidades. As árvores ficam frequentemente sujeitas a severos estresses ambientais e danos mecânicos, especialmente no sistema radicular, devido à compactação do solo, más condições de plantio e poluição (Ghani, Stokes & Fourcaud, 2009). Ficam restritas a espaços críticos impostos pelos projetos de paisagismo, o que conseqüentemente diminui a prestação de serviços que podem oferecer (Mullaney, Lucke & Trueman, 2015). É por isso que precisam de um manejo cuidadoso em áreas urbanas, pois a queda de parte ou de toda sua estrutura pode resultar em acidentes e danos graves (James, Haritos & Ades, 2006). É indiscutível, no entanto, que a probabilidade de um incidente de segurança tende a ser mínimo se comparado aos benefícios ecológicos, sociais e econômicos das árvores (Li et al., 2022).

A força da ancoragem das raízes é essencial para a estabilidade das árvores, o que exige espaço adequado. A ancoragem é feita pelas raízes mais grossas e lignificadas da planta, a partir dos nós mais próximos ao nível do solo (Dupont et al., 2018) e diversos fatores influenciam nesta força, dentre eles a arquitetura da raiz, profundidade, propriedades físicas e analíticas do solo, forma e peso da placa radicular e a localização do eixo rotacional (Rahardjo et al., 2014). A compreensão da forma como ocorre esse processo pode ajudar a evitar o



desenraizamento da árvore quando submetidas a certas adversidades (Dupont et al., 2018). No entanto, faltam informações sobre o volume estrutural da placa radicular que é necessária e as características em relação à resistência das árvores ao vento (Krišāns et al., 2020).

Para as árvores suportarem os esforços advindos do ambiente, precisam desenvolver fatores de segurança confiáveis mecanicamente em seu sistema radicular, tronco e copa (Brazolin, 2009). Para isso ocorrer são necessárias as modificações das propriedades mecânicas das árvores, criando tensões internas e otimizando sua forma e estrutura por meio do crescimento adaptativo, a fim de manter um estado de tensão mecânica constante, evitando a ruptura (Mattheck & Vorberg, 1991; Sone, Noguchi & Terashima, 2006).

A maior carga, dentre as forças naturais a que uma árvore é submetida, é causada pelo vento que pode vir como rajadas de eventos rápidos, periódicos e dinâmicos (James, Haritos & Ades, 2006). Em resposta aos ventos que incidem horizontalmente, as árvores balançam dinamicamente em consequência da combinação de torques por torção e flexão em sua base, podendo ocorrer a derrubada deste exemplar em situações onde o torque ultrapassa a resistência do sistema de enraizamento da árvore (Ataíde et al., 2015; Yang et al., 2021). Assim, a falha da árvore, sob ação do vento, ocorre quando esta inclina além do seu limite estabelecido pelo ângulo de rotação (James, Hallam & Spencer, 2013a).

A suscetibilidade individual das árvores aos danos causados pelo vento depende das espécies de árvores, propriedades do solo, saúde das árvores e volume da placa radicular (Krišāns et al., 2020). O que torna a compreensão completa das interações vento-árvore ser de suma importância para minimizar perdas econômicas e danos à vida humana (Yang et al., 2021).

Está pesquisa possibilita preencher uma lacuna das ações de planejamento urbano sustentável, que enfatiza constantemente a necessidade de acrescentar árvores nas cidades, mas pouco avança no desenvolvimento de ferramentas capazes de promover isso de maneira segura e eficiente. Estudos sobre os efeitos das cargas exercidas por elementos naturais,





como ventos e chuvas, nas árvores, podem fornecer uma base melhor para gerar modelos simplificados de cálculo para previsão dos riscos associados a determinado evento (Ferreira, 2017).

Medidas preventivas e de proteção apropriadas podem ser tomadas para evitar efetivamente a ocorrência de queda, uma vez que o risco é detectado com antecedência (Li et al., 2022). Portanto, parte-se da hipótese de que o vento é um dos principais fatores de interferência na estabilidade das árvores urbanas e que características dendrométricas específicas podem proporcionar maior resistência às árvores.

Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi analisar o efeito de rajadas de vento na inclinação da placa de raízes em árvores urbanas e identificar as variáveis dendrométricas que mais interferem na resposta das árvores quanto a inclinação da placa de raízes.

Material e Métodos

Seleção dos exemplares na área de estudo

A pesquisa foi desenvolvida no *campus* da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais. O clima é do tipo Cwa, clima subtropical úmido com invernos secos (Koppen), mesotérmico, com temperaturas anuais média, máxima e mínima de 19, 26,1 e 14 °C, respectivamente. A precipitação média anual é de 1.314,2 mm, apresentando *déficit* hídrico no período de maio a setembro e um excedente entre dezembro e março (Soares Júnior, 2000). A direção predominante dos ventos para a cidade de Viçosa é Nordeste, seguida da direção Norte (INMET, 2019).

A topografia é acidentada com vales estreitos e úmidos, os solos da região têm predominância de latossolos no topo e nas encostas das elevações, e argissolo vermelho-amarelo nos terraços. O município se enquadra no bioma Mata Atlântica, na região fitogeográfica denominada de Floresta Estacional Semidecidual, no qual ocorre repouso fisiológico e queda parcial da folhagem durante os períodos de inverno (IBGE, 2019).



Os exemplares arbóreos foram selecionados com base nos seguintes critérios de prioridades: proximidade entre os exemplares, condições físicas adequadas (sem injúrias aparentes nas raízes e troncos), ausência de tortuosidade do tronco, boa condição fitossanitária (ausência aparente de pragas e doenças), semelhança nos valores de diâmetro na altura do peito, semelhança nas características ambientais do entorno, condições semelhantes de canteiro e similaridade nos valores de altura total. Com isso, a amostragem foi composta por nove espécies comumente utilizadas na arborização das cidades brasileiras, com três indivíduos por espécie, totalizando 27 árvores.

As espécies analisadas foram: *Cenostigma pluviosum* (DC.) Gagnon & G.P.Lewis (Sibipiruna), *Ceiba speciosa* (A.St.-Hil.) Ravenna (Paineira), *Delonix regia* (Bojer ex Hook.) Raf. (Flamboyant), *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos (Ipê-roxo), *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.Grose (Ipê-amarelo), *Lagerstroemia speciosa* (L.) Pers. (Escumilha), *Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L.P.Queiroz (Pau-ferro), *Moquilea tomentosa* Benth. (Oitizeiro) e *Spathodea campanulata* P. Beauv. (Espatódea).

Coleta de dados

A definição do período de coleta de dados foi estabelecida a partir de uma análise histórica prévia das condições locais, com os meses do ano e as horas dos dias de maior incidência de vento para a região. Deste modo, a coleta de dados foi realizada entre os meses de fevereiro e março de 2019, entre 13 e 17 horas. Foi consultada diariamente a previsão do tempo pela *The Weather Company* para evitar a realização da coleta de dados em dia com baixa disponibilidade de vento.

A coleta de dados sobre a inclinação da placa das raízes foi realizada com o *Tree Motion Sensors*, TMS (Figura 1). O equipamento, que registra o movimento dinâmico da árvore, é do fabricante Argus Electronic GMBH, uma tecnologia alemã que permite obter a inclinação de registros na zona de raiz da árvore nas direções X, Y e Z (Norte/Sul, Leste/Oeste e vertical), com precisão de 0,01°, fazendo 20 leituras por segundo (20 Hz). O TMS funciona de forma



autônoma, programável e armazena dados em função do tempo. Assim, ao final de cada período de monitoramento, o sensor foi removido da árvore e os dados transferidos para um computador, por meio do *software Treesensor*.

Os sensores, pequenos, portáteis e não invasivos (Figura 1A), foram fixados às árvores usando dois parafusos (Parafuso para Madeira, cabeça chata, 2,5 x 20 mm). Um par de sensores TMS foi utilizado em cada árvore selecionada, onde um sensor foi fixado na base do tronco da árvore, entre 5 e 10 centímetros acima do nível do solo, denominado de “sensor de base” (Figura 1C) e o segundo, chamado de “controle” (Figura 1C), foi instalado no tronco da árvore a dois metros de altura acima do solo, conforme as recomendações de Gocke, Rust e Rust (2018).

Figura 1

Tree Motion Sensors (TMS). A) Sensor TMS; B) Bolha de nível no sensor; C) Sensores de base e controle instalados na árvore



Fonte: Elaboração própria



A necessidade da utilização de dois sensores em um mesmo indivíduo serve para certificar que ocorreu algum evento (vento) na árvore e também eliminar ruídos, através da comparação dos dados dos sensores de controle e base. O sensor de controle registra a inclinação devido à rotação da base, a inclinação adicional devido à flexão do tronco e uma aceleração devido ao deslocamento do tronco à medida que a árvore oscila de um lado para o outro. O sensor de base mede apenas a inclinação no nível do solo. Os dados registrados pelo sensor da base são, portanto, os valores de inclinação da placa de raízes, o que permite compreender sobre a ancoragem da árvore.

Com a ajuda de uma bússola, os aparelhos foram posicionados sempre na direção norte e alinhados horizontalmente utilizando uma bolha de nível (Figura 1B). Após a instalação dos equipamentos e acionamento do processo de registro, a duração de cada coleta foi de três horas, disponibilizando neste período, um total de 216.000 dados por árvore. O período de três horas foi considerado suficiente em pesquisa similar para analisar a estabilidade das espécies *Populus x canadensis* Moench, *Quercus robur* L. e *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. na Alemanha (Esche, Detter & Rust, 2018).

Quanto à informação de vento, esta foi obtida por meio dos dados horários da estação automática oficial do INMET em Viçosa. Esta estação está posicionada dentro do limite da UFV, próximo aos exemplares avaliados, distante a menos de 2 km da amostra mais afastada. Deste modo, os valores da rajada de vento ocorrida entre as 13 e 17 horas dos dias de coleta, foram armazenados.

Caracterização dendrométrica

Após a seleção, os indivíduos arbóreos foram devidamente caracterizados. Para isso foram coletadas as seguintes informações: altura da árvore (m), estimada com auxílio de uma vara retrátil; diâmetro na altura do peito – DAP (m), medido com fita métrica a 1,30 m do solo; diâmetro de copa (m), medido com uma trena, tendo como base a projeção da copa ao solo, no





qual se obteve duas medidas perpendiculares de diâmetro; e altura do início da copa (m), referente a distância entre o solo e a parte baixa da copa, com uso da vara retrátil.

Com os valores de diâmetro da copa obtidos em campo, foi possível estipular a área da copa para cada indivíduo, pela fórmula tradicional de área da circunferência.

A subtração dos valores de altura do início da copa dos valores de altura total permitiu conhecer a altura da copa de cada indivíduo, com esse valor e com o valor médio do diâmetro da copa foi possível calcular o volume de copa para cada indivíduo, através da fórmula tradicional do volume do cilindro:

$$V_c = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * H_t$$

Onde:

V_c - volume da copa (m³)

d - diâmetro da copa (m)

H_t - altura da copa (m)

Vale ressaltar que para o cálculo da área e do volume de copa não se levou em conta os formatos de copa característicos de cada espécie.

Para o cálculo do volume do tronco utilizou-se a fórmula advinda de equações volumétricas aplicáveis ao manejo sustentado de florestas nativas no estado de Minas Gerais (CETEC, 1995):

$$V_f = 0.00007423 * (CAP * 100)/\pi^{1,707348} * H_t^{1,16873}$$

Onde:

V_f - volume do fuste (m³)

CAP - circunferência à altura do peito (1,30 m) (m)

H_t - altura total (m)



A obtenção destas variáveis dendrométricas foi necessária para verificar a existência de correlação com os valores de inclinação da placa de raízes.

Processamento dos dados

O *software Treesensor* foi utilizado para gerar um relatório detalhado sobre os registros, em arquivo texto. A variável utilizada para expressar a inclinação da placa de raízes fornecida pelo sensor, denominada no arquivo como inclinação resultante (xy), foi checada após todos os dias de coleta. Isto porque os dados do sensor de controle servem para distinguir a inclinação do ruído de "fundo". Desta maneira, a inclinação do sensor de base só é validada se a inclinação do sensor de controle tiver um valor maior (Gocke, Rust & Rust, 2018). Quando esta condição não foi alcançada, a coleta foi repetida.

A inclinação máxima registrada para uma árvore ao longo do período de monitoramento foi relacionada com a rajada de vento máxima por meio de um diagrama de dispersão, elaborado no *software* Microsoft Office Excel. Este gráfico de dispersão foi elaborado com a variável inclinação máxima da placa de raízes no eixo y e rajada de vento máxima obtida durante o período de monitoramento no eixo x. A partir da equação gerada pelo diagrama de dispersão foi possível avaliar tal relação.

A inclinação máxima tem sido utilizada como o principal critério para avaliar a ancoragem da raiz da árvore em diversos trabalhos, como os realizados por James, Hallan e Spencer (2013b) e Gocke, Rust e Rust (2018). Contudo, segundo os últimos autores, embora esse valor máximo de inclinação seja útil para apontar os picos transitórios que ocorrem durante os ventos e para dar uma indicação da estabilidade da árvore, pode ser uma simplificação excessiva da resposta total da árvore. Sendo assim, além do valor de inclinação máxima, observou-se a necessidade de abordar a média gerada por todo o conjunto de dados, bem como o número de ocorrências de inclinação. Tais informações foram extraídas do gráfico radar gerado partir do *software Treesensor*.



O gráfico radar consiste na plotagem das informações XY, referentes à inclinação norte/sul (Y) e leste/oeste (X) da placa de raiz, indicando a resposta direcional da árvore à ação do vento. Deste modo, permite observar a direção de movimentação. O gráfico radar foi apresentado individualmente para cada espécie, apenas para o sensor da base, que se refere aos valores de inclinação da placa de raízes. Em cada gráfico foi informado também a número de ocorrências de inclinação, expresso em porcentagem de tempo.

A análise dos gráficos, além de indicar a direção de movimentação e a porcentagem de tempo com oscilação, foi utilizada ainda para acompanhar as diferenças de comportamento entre as espécies. Tendo em vista a variabilidade entre os indivíduos de uma mesma espécie, foi realizada uma análise estatística de correlação entre as características dendrométricas dos indivíduos arbóreos e a inclinação da placa de raízes. Os coeficientes de correlação de Pearson (r) foram calculados através do programa computacional *Genes*. Para interpretar os valores encontrados utilizou-se o parâmetro citado por Mukaka (2012), onde $|r| \geq 0,9$, indica uma correlação muito forte; $0,7 \leq |r| < 0,9$, correlação forte; $0,5 \leq |r| < 0,7$, correlação moderada; $0,3 \leq |r| < 0,5$, correlação fraca; e $0 \leq |r| < 0,3$, correlação desprezível.

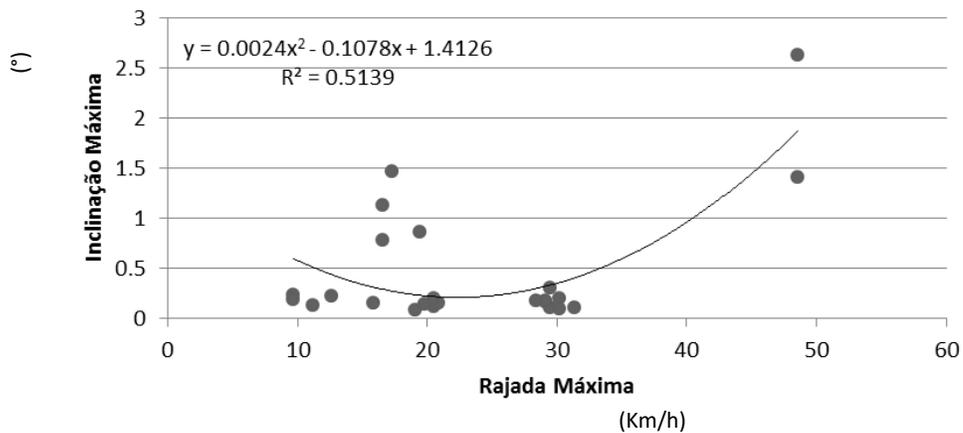
Resultados

Inclinação da placa de raízes

A relação entre a inclinação máxima da placa de raízes dos indivíduos analisados com o valor máximo de rajada de vento, obtida com a elaboração do diagrama de dispersão, resultou em uma equação polinomial de segundo grau, cuja linha de tendência gerou um coeficiente de determinação de 0,5139 (Figura 2).

Figura 2

Diagrama de dispersão entre a inclinação máxima e rajada de vento máxima



Fonte: Elaboração própria

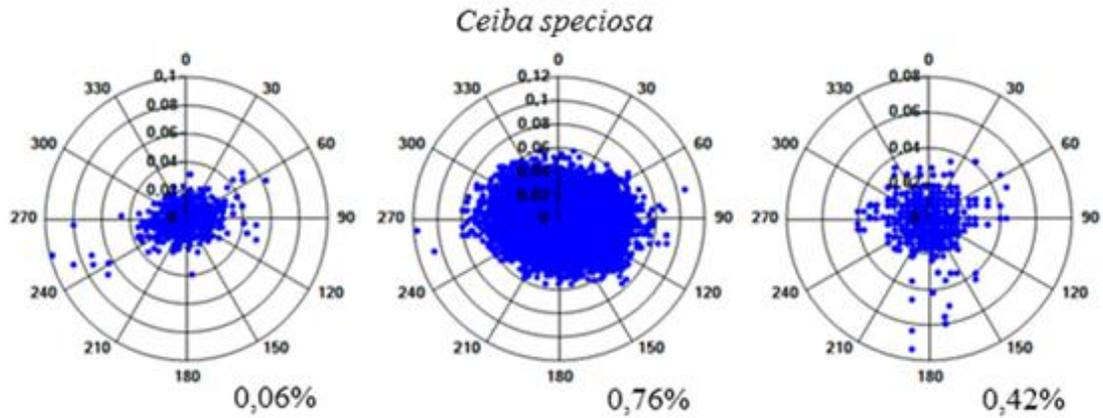
Desta maneira, é possível inferir que 51,39% da variação é explicada pelo modelo de regressão, ou seja, aproximadamente 51% dos fatores que influenciam na inclinação foram devido a rajada de vento apenas. Vale destacar, ainda, que a correlação foi direta, ou seja, quanto maior a rajada de vento, maior a inclinação da placa de raízes.

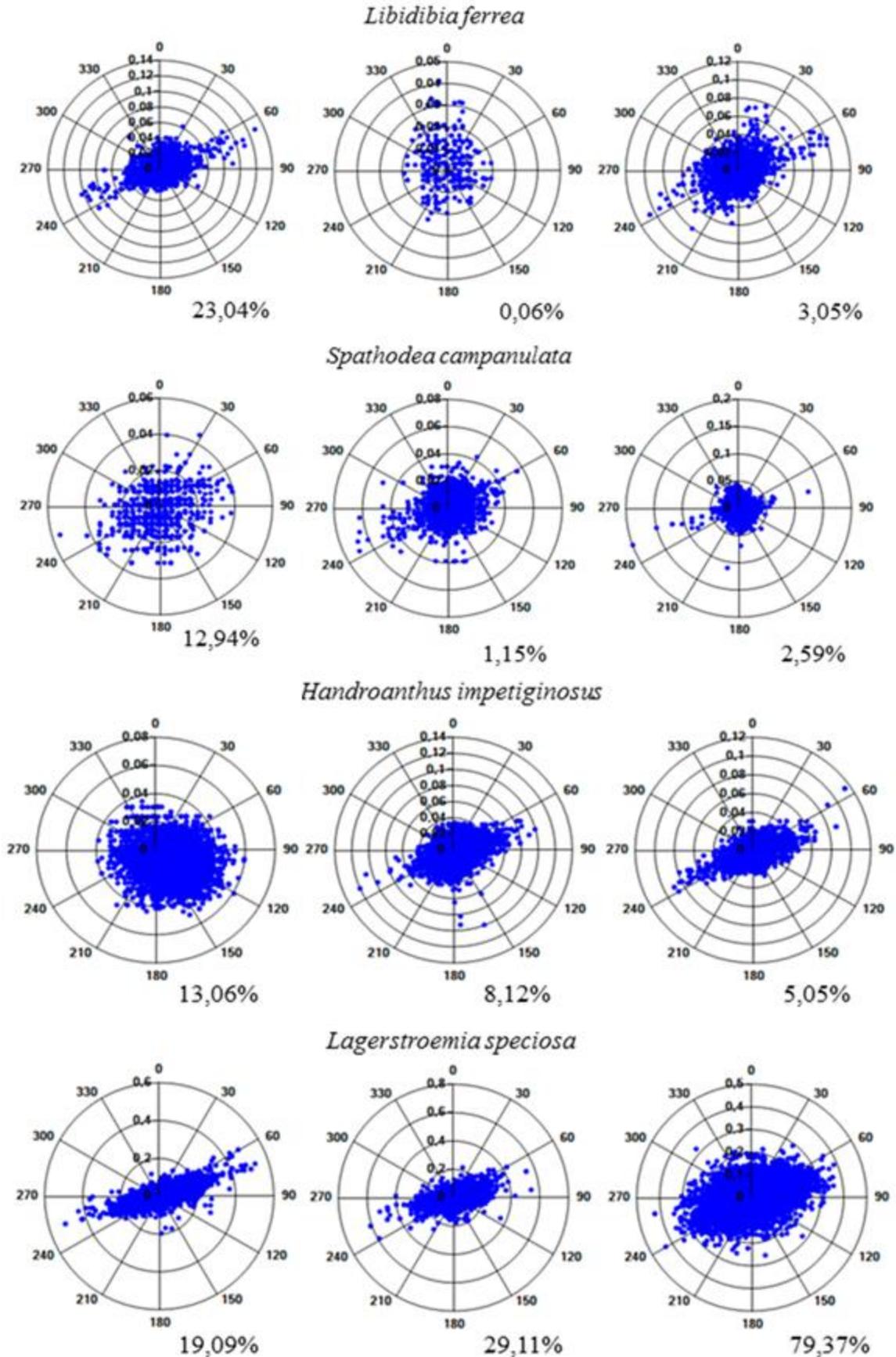
Tendo em vista que a inclinação da placa de raízes ocorre diretamente em resposta às rajadas de vento, foi realizada uma análise detalhada para cada indivíduo em busca de identificar tendências entre as espécies. A contabilização de ocorrências de inclinação permitiu constatar quantas vezes cada árvore reagiu a episódios de vento em um determinado intervalo de tempo e assim informar a porcentagem de tempo monitorado em que a árvore apresentou oscilação. Além disso, o registro pontual da inclinação dado pelo gráfico radar possibilita uma análise do sentido geográfico predominante de ocorrências (Figura 3).

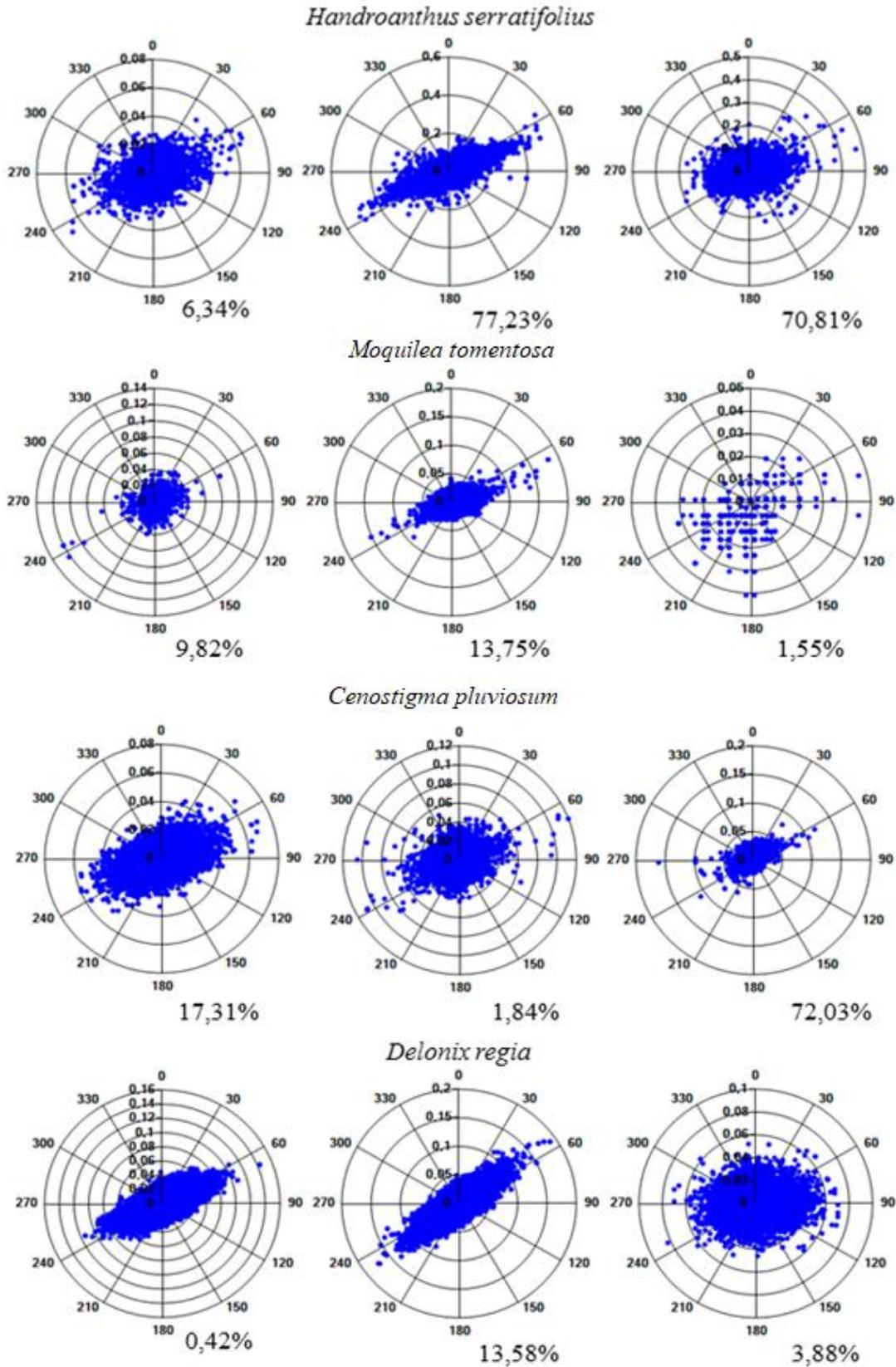
O gráfico radar segue o sentido dos pontos cardeais, onde o 0 representa o norte e cada círculo concêntrico traz os valores do ângulo de inclinação, cuja escala é apresentada na linha vertical. Dessa forma, cada ponto refere-se a um valor do ângulo de inclinação e a direção geográfica dessa ocorrência. A porcentagem relatada abaixo dos gráficos refere-se à porcentagem do tempo de oscilação.

Figura 3

Resultados dos pontos de inclinação para cada indivíduo e porcentagem de tempo monitorado em que a árvore apresentou oscilação







Fonte: Elaboração própria





De maneira geral, é possível observar que a maioria das árvores apresentou tendência de oscilação no sentido sudoeste/nordeste. Os exemplares de *Handroanthus serratifolius* apresentaram inclinação média da placa de raízes em 51,46% do tempo, os de *Lagerstroemia speciosa* 42,53%, *Cenostigma pluviosum* 30,39%, *Handroanthus impetiginosus* 8,74%, *Libidibia ferrea* 8,72%, *Moquilea tomentosa* 8,38%, *Delonix regia* 5,96%, *Spathodea campanulata* 5,56% e os de *Ceiba speciosa* 0,41%.

Ao analisar o valor do ângulo de inclinação, *Lagerstroemia speciosa* foi a espécie com maior destaque, onde os gráficos projetados atingiram a escala máxima de 0,6, 0,8, e 0,5, os maiores dentre todos os exemplares. *Handroanthus serratifolius* aparece na sequência com escalas de 0,08, 0,6 e 0,5. Assim, embora *Lagerstroemia speciosa* tenha apresentado inclinação maior *Handroanthus serratifolius* foi a que apresentou maior ocorrência de eventos, seguida por *Lagerstroemia speciosa* e *Cenostigma pluviosum*.

Influência das variáveis dendrométricas

Os gráficos permitem observar a grande variabilidade entre os indivíduos da mesma espécie. Por esse motivo, buscamos analisar, ainda, a existência de alguma correlação entre as características dendrométricas dos indivíduos arbóreos com a inclinação da placa de raízes (Tabela 1).

Tabela 1

Resultado da correlação de Pearson aplicada entre variáveis dendrométricas e as variáveis de inclinação analisadas

Variáveis dendrométricas	Inclinação Média	Inclinação Máxima	Ocorrência de inclinação
DAP (m)	-0,7696*	-0,4989	-0,5652
Diâmetro de copa (m)	-0,8942**	-0,7058*	-0,5871
Altura total (m)	-0,5545	-0,6875*	-0,4521
Altura copa (m)	-0,567	-0,5335	-0,487
Altura início da copa (m)	0,0045	-0,2700	0,0438
Volume de copa (m ³)	-0,726*	-0,5850	-0,5837
Volume tronco (m ³)	-0,6025	-0,4192	-0,5415
Área de copa (m ²)	-0,8441**	-0,6090	-0,5533

Nota: ** Significativo a nível de 1% de probabilidade de erro ($p < 0,01$), * significativo a 5% ($p < 0,05$); sinais negativos indicam relação inversa entre as variáveis. Fonte: Elaboração própria

As variáveis dendrométricas que tiveram correlação significativa com o ângulo médio de inclinação foram diâmetro à altura do peito (DAP), diâmetro de copa, volume de copa e área da copa. Os valores indicaram que estas variáveis foram as únicas que exerceram forte correlação. Dentre elas, o diâmetro de copa médio foi o que apresentou maior correlação, indicando que 89% da inclinação média pode ser explicada por esta característica.

As variáveis altura total, altura de copa e volume do tronco apresentaram correlação moderada com o ângulo de inclinação médio. Destaca-se ainda que a correlação existente foi negativa para essas variáveis, ou seja, quanto maiores os valores dendrométricos menores foram as ocorrências de inclinação, pelo fato de serem variáveis inversamente proporcionais.

O ângulo de inclinação máximo da placa de raízes apresentou forte correlação com a variável diâmetro de copa (0,70) e correlação moderada com a variável altura total, ao nível de



5% de significância. Ambas as correlações negativas, indicam que quanto maior o diâmetro de copa e a altura da árvore, menor será o valor de inclinação máxima.

Não houve correlação significativa entre os elementos dendrométricos e a ocorrência de inclinação da placa de raízes, porém os maiores valores obtidos também foram para as variáveis DAP, diâmetro de copa médio, volume de copa, volume de tronco e área de copa.

Nesta avaliação foi possível confirmar estatisticamente a relação entre as variáveis dendrométricas, DAP, altura total, diâmetro de copa, volume de copa e área de copa com a inclinação da placa de raiz. No entanto, apenas o DAP e o diâmetro de copa apresentaram forte correlação com a inclinação, permitindo afirmar que árvores mais estáveis apresentam maiores valores de diâmetro de copa e DAP.

Discussão

Inclinação da placa de raízes

Os resultados indicaram que o vento foi responsável por aproximadamente 51% das ocorrências de inclinação das árvores e esta relação é direta, ou seja, o ângulo de inclinação é maior conforme o aumento da rajada de vento.

A correlação direta entre a inclinação máxima das árvores e as rajadas máximas de vento deve-se aos efeitos dinâmicos do vento, e por isso era de se esperar que variassem em razão do local das medições, corroborando com os resultados obtidos por James, Hallam e Spencer (2013b). Uma das explicações para os pontos estarem dispersos é, provavelmente, devido à distância de onde foi realizada a análise das árvores e os dados de vento registrados na estação meteorológica (ESCHE; DETTER; RUST; 2018). Assim como no trabalho de Gocke, Rust e Rust (2018), a condição do vento na árvore provavelmente era diferente do vento registrado na estação.

Outro fator importante é a exposição da árvore ao vento. A influência de árvores vizinhas, prédios e casas pode criar barreiras que influenciam na estabilidade de determinada árvore. Árvores em campos abertos experimentam impactos de vento mais frequentes durante





o seu desenvolvimento e, portanto, se adaptam alocando recursos estruturais para aumentar a estabilidade (Peterson & Claassen, 2013). Em contrapartida, árvores protegidas, quando expostas ao vento (devido à remoção, por exemplo, de uma árvore vizinha), são mais instáveis, pois não desenvolveram recursos estruturais para aumentar sua estabilidade. Embora a variação da condição de vento seja algo relevante, é importante destacar que não foi encontrado nenhum estudo referente à análise da placa de raízes onde tenha sido monitorada pontualmente a condição de vento, todos utilizaram as informações das estações oficiais mais próximas, como James, Hallam e Spencer (2013b), Gocke, Rust e Rust (2018) e Esche, Detter e Rust (2018).

O ambiente urbano expõe essas árvores a diversos fatores externos que podem influenciar no seu equilíbrio, como por exemplo, injúrias, condições inadequadas de plantio, corredores de vento e barreiras formadas pela disposição dos prédios. Tais características interferem significativamente no comportamento de inclinação das espécies, mesmo assim a análise realizada permitiu observar que a rajada de vento foi um fator expressivo para determinar o valor de inclinação máxima da placa de raiz.

A tendência de oscilação no sentido sudoeste/nordeste pode ter relação com a resposta aos ventos nordeste, predominantes na região (INMET, 2019). Segundo Reis (2005), a direção média anual predominante dos ventos em Minas Gerais é de NE, L e SE e para Sant'Anna Neto (2005), a região Sudeste recebe, durante todo o ano, ventos de leste e nordeste. De acordo com os dois autores o principal fator responsável pela predominância dos ventos nessas direções é o anticiclone do Atlântico Sul.

Quanto maior a rajada, mais a árvore se inclina e o movimento de oscilação é principalmente na direção do vento, com alguns movimentos laterais e em *loop* (James, Haritos & Ades, 2006). Ainda segundo os autores, durante o movimento de oscilação a árvore nunca volta ao ponto zero ou de descanso, ela volta em resposta ao vento. Neste estudo observou-se que a oscilação da maior parte dos indivíduos analisados ocorreu para a direção de vento



predominante, alguns indivíduos apresentaram uma oscilação uniforme, sem uma inclinação dominante, o que pode indicar uma verdadeira estabilidade do indivíduo ou uma estabilidade irreal, influenciada por barreiras próximas, como casas, prédios ou outras árvores que impedem a ação direta do vento.

Pesquisas já realizadas para avaliar a oscilação da placa de raiz costumam abordar apenas os valores de inclinação e não o tempo monitorado em que as árvores apresentaram oscilação. Desta forma, não foi encontrado qualquer registro sobre análise dessa quantidade de ocorrências de oscilações, todos abordaram unicamente a inclinação máxima registrada, conforme foi possível observar nas pesquisas de James, Hallam e Spencer (2013b) e Gocke, Rust e Rust (2018).

Além da inclinação máxima, variável mais comum a ser considerada neste tipo de pesquisa, a média dos ângulos de inclinação registrado ao longo do período de monitoramento e o número de ocorrências de inclinação mostraram-se importantes para auxiliar no entendimento, visto que demonstram resultados diferentes e, portanto, podem contribuir para uma análise mais detalhada.

Levando em consideração que indivíduos que oscilam mais possivelmente são menos estáveis, as espécies que obtiveram melhores resultados quanto à estabilidade foram *Ceiba speciosa*, seguida de *Spathodea campanulata* e *Delonix regia*, o que pode ter relação com a característica de sua copa. Tais espécies correspondem justamente aos indivíduos com maior volume de copa amostrado, o que vai de encontro ao que foi discutido anteriormente, em que esta é uma característica de forte correlação com estabilidade. Segundo James, Haritos e Ades (2006), a estabilidade mecânica de uma árvore é sua capacidade de suportar e se adaptar às forças externas que ocorrem ao longo de sua vida.

Em ventos fortes e tempestades, quanto menos energia for transferida do vento para a árvore, maior a chance de sobrevivência deste indivíduo. As copas das árvores reduzem a transferência da energia que é propagada para o fuste e minimizam a ocorrência de arrasto





através do amortecimento dinâmico de massa da copa. Tais resultados concordam com o que James, Haritos e Ades (2006) encontraram no seu trabalho, quando constataram que predominantemente as árvores que apresentaram menor número de oscilação na placa de raízes foram aquelas com maiores dimensões de copa.

Na análise do número de ocorrências de inclinação, em porcentagem de tempo, *Handroanthus serratifolius* foi a que apresentou maior ocorrência de eventos. Assim, embora não tenha apresentado o maior valor de inclinação, foi a espécie que oscilou mais vezes durante o período monitorado, o que também pode acarretar menor estabilidade. Esse resultado demonstra que o valor de inclinação e a quantidade de eventos de inclinação não devem ser avaliados isoladamente para caracterizar a estabilidade de uma árvore, pois em conjunto fornecem resultados mais satisfatórios.

Influência das variáveis dendrométricas

Quanto às correlações entre as variáveis dendrométricas e a inclinação da placa de raízes outros estudos já apontaram para o mesmo direcionamento. Peltola et al. (2000) verificaram uma correlação significativa entre o momento resistivo máximo na base do tronco, ou seja, a resistência ao desenraizamento, e as variáveis dendrométricas, DAP e área de copa. Árvores de mesma altura com maiores DAP's foram mais resistentes ao desenraizamento do que árvores com menores DAP's.

Sobre o diâmetro de copa médio, estudos anteriores relataram que conforme ocorre redução da copa, há uma tendência de diminuição do efeito de amortecimento tornando as árvores mais suscetíveis às forças do vento (Milne, 1991; James, Haritos & Ades, 2006). Ou seja, as cargas do vento são minimizadas pelo movimento complexo da copa, havendo uma redução da força transmitida para o tronco, dele para as raízes e seguida para o solo.

Árvores de copas maiores sofrem maior influência dos ventos e isso provoca tensões de crescimento no tronco desenvolvendo uma maior resistência mecânica e, conseqüentemente, aumentando sua resistência às rajadas de ventos (Stathers, Rollerson & Mitchell, 1994).



Nielsen (2005) encontrou que diâmetros superiores e maiores áreas de copa implicam em maior estabilidade quando relacionados à altura. Desta forma, quanto menor a relação altura/diâmetro e maior a relação entre comprimento da copa/altura total mais estável são as árvores.

Compreender quais variáveis dendrométricas mais interferem na ancoragem das árvores para diferentes espécies é fundamental. Isto porque, alguns autores já afirmaram que, geralmente, o momento crítico para queda da árvore tem relação com as dimensões da árvore, e de forma geral, não diferem de maneira significativa entre as espécies de tamanho similar (Peterson & Claassen, 2013; Cannon, Barrett & Peterson; 2015; Ribeiro, 2015). É por esse motivo que os estudos que abordem diferentes espécies tornam-se essenciais para aprimorar a gestão da silvicultura urbana.

Conclusão

Este estudo contribui para as ações de sustentabilidade aplicadas ao planejamento urbano, tendo em vista que norteia uma das principais problemáticas relacionadas a manutenção de árvores na cidade, sua estabilidade física. A estabilidade das árvores urbanas está diretamente relacionada à sua capacidade de suportar rajadas de vento, visto que neste ambiente ficam expostas a uma quantidade maior de fatores externos prejudiciais e pouco compreendidos. Foi possível constatar que a inclinação máxima da placa de raízes apresentou relação direta com a intensidade das rajadas de vento, no entanto, a intensidade foi variável até mesmo entre indivíduos de uma mesma espécie.

O ângulo de inclinação da placa de raízes é menor em árvores com DAP e diâmetros de copa elevados. Mensurar a inclinação da placa de raízes apresentada pelos indivíduos pode colaborar na gestão do risco de queda desses exemplares. A diversidade de espécies utilizadas na arborização brasileira exige um avanço mais efetivo sobre o desenvolvimento da silvicultura urbana, pois a carência de informações sobre aspectos básicos prejudica a consolidação de um planejamento bem elaborado.





Conhecer o comportamento de diferentes espécies torna-se primordial para subsidiar a gestão efetiva da silvicultura urbana em vista do estabelecimento de cidades mais sustentáveis e resilientes.

Referencias

- Ataíde, G. M.; Castro, R. V. O.; Correia, A. C. G.; Dos Reis, G. G.; Reis, M. D. G. F.; Rosado, A. M. (2015) Interação árvores e ventos: aspectos ecofisiológicos e silviculturais. *Ciência Florestal*, 25(2), 523-536. <https://doi.org/10.5902/1980509818472>
- Brazolin, S. (2009) *Biodeterioração, anatomia do lenho e análise de risco de queda de árvores de tipuana, Tipuana tipu (Benth.) O. Kuntze, nos passeios públicos da cidade de São Paulo, SP*. 265 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.
- Cannon, J. B.; Barrett, M. E.; Peterson, C. J. (2015) The effect of species, size, failure mode, and fire-scarring on tree stability. *Forest Ecology and Management*, 356, 196-203. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.07.014>
- CETEC. Desenvolvimento de equações volumétricas aplicáveis ao manejo sustentado de florestas nativas do estado de Minas Gerais e outras regiões do país. Belo Horizonte: 1995.
- De Melo, R. R., De Lira Filho, J. A., Júnior, F. R. (2019) Diagnóstico qualitativo e quantitativo da arborização urbana no bairro Bivar Olinto, Patos, Paraíba. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, 2(1), 64-80. <http://dx.doi.org/10.5380/revsbau.v2i1.66241>
- Dupont, S.; Défossez, P.; Bonnefond, J. M.; Irvine, M. R.; Garrigou, D. (2018) How stand tree motion impacts wind dynamics during windstorms. *Agricultural and Forest Meteorology*, 262, 42-58. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.06.022>
- Esche, V. D. . P. S.; Detter, A.; Rust, S. (2018) Experimental Validation of the Wind Load Analysis in Static Load Tests. *In: Jahrbuch der Baumpflege - Yearbook of Arboriculture*.



- Alemanha. Haymarket Media, 229–236.
- Ferreira, D. (2017) *Análise de risco de queda de árvores: a espécie Tilia tomentosa Moench no Parque dr. Manuel Braga, Coimbra/Portugal*. 110 p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Vida) - Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Ghani, M. A.; Stokes, A.; Fourcaud, T. (2009) The effect of root architecture and root loss through trenching on the anchorage of tropical urban trees (*Eugenia grandis* Wight). *Trees*, 23(2), 197-209. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0269-9>
- Göcke, L.; Rust, S.; Rust, F. (2018) Assessing the Anchorage and Critical Wind Speed of Urban Trees using Root-Plate Inclination in High Winds. *Arboriculture & Urban Forestry*, 44(1). <https://doi.org/10.48044/jauf.2018.001>
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019) *Cidades | Minas Gerais | Viçosa | História & Fotos*. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/vicosa/historico>
Acesso em: 21 dez. 2019.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia (2019) *Estações convencionais*. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesConvencionais> Acesso em: 12 set. 2019
- James, K. R.; Haritos, N.; Ades, P. K. (2006) Mechanical stability of trees under dynamics loads. *American journal of Botany*, 93(10), 1522-1530. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1522>
- James, K.; Hallam, C.; Spencer, C. (2013a) Measuring tilt of tree structural root zones under static and wind loading. *Agricultural and forest meteorology*, 168, 160-167. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.009>
- James, K.; Hallam, C.; Spencer, C. (2013b) Tree stability in winds: Measurements of root-plate tilt. *Biosystems Engineering*, 115(3), 324–331. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.02.010>
- Krišāns, O.; Samariks, V.; Donis, J.; Jansons, Ā. (2020) Structural Root-Plate Characteristics of



- Wind-Thrown Norway Spruce in Hemiboreal Forests of Latvia. *Forests*, 11, 1143.
<https://doi.org/10.3390/f11111143>
- Leitão, F. S. (2016) *A atuação pública na arborização da cidade do Rio de Janeiro*. 139 p.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Escola Politécnica, Universidade
Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Li, H.; Zhang, X.; Li, Z.; Wen, J.; Tan, X. (2022) A Review of Research on Tree Risk
Assessment Methods. *Forests*, 13, 1556. <https://doi.org/10.3390/f13101556>
- Mattheck, C.; Vorberg, U. (1991) The biomechanics of tree fork design. *Botanica acta*, 104(5),
399–404. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1991.tb00248.x>
- Milne, R. (1991) Dynamics of swaying of *Picea sitchensis*. *Tree physiology*, 9(3), 383-399.
<https://doi.org/10.1093/treephys/9.3.383>
- Mukaka, M. M. (2012) A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research.
Malawi medical journal, 24(3), 69-71.
- Mullaney, J.; Lucke, T.; Trueman, S. J. (2015) The effect of permeable pavements with an
underlying base layer on the growth and nutrient status of urban trees. *Urban Forestry &
Urban Greening*, 14(1), 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.11.007>
- Sant'Anna Neto, J.L. (2005) Decálogo da climatologia do sudeste brasileiro. *Revista Brasileira
de Climatologia*, 1(1). <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25232>
- Nielsen, C. N. (2005) *Forest management for improved wind stability. Adaptive physiology and
tree management*. Samfundslitteratur Life Sciences, Thorvaldsensvej Denmark.
- Peltola, H.; Kellomäki, S.; Hassinen, A.; Granander, M. (2000) Mechanical stability of Scots
pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *Forest
Ecology and Management*, 135(1-3), 143-153. [https://doi.org/10.1016/S0378-
1127\(00\)00306-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00306-6)
- Peterson, C. J.; Claassen, V. (2013) An evaluation of the stability of *Quercus lobata* and
Populus fremontii on river levees assessed using static winching tests. *Forestry*, 86(2),



201-209. <https://doi.org/10.1093/forestry/cps080>

Rahardjo, H.; Harnas, F. R.; Indrawan, I. G. B.; Leong, E. C.; Tan, P. Y.; Fong, Y. K.; Ow, L. F.

(2014) Understanding the stability of *Samanea saman* trees through tree pulling, analytical calculations and numerical models. *Urban forestry & urban greening*, 13(2), 355-364. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.12.002>

Reis, R. J. (2005) *Mapeamento a climatologia das descargas atmosféricas em Minas Gerais utilizando dados de 1989 a 2002—uma análise exploratória*. 131 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Geografia) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Ribeiro, G. H. M. (2015) *Vulnerabilidade mecânica de árvores relacionada a tempestades convectivas na amazônia central, Manaus (AM)*. 68 p. Tese (Doutorado em Ciências de Florestas Tropicais) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus.

Soares Júnior, F. J. (2000) *Composição florística e estrutura de um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual na Fazenda Tico-Tico, Viçosa-MG*. 77 p. Dissertação (Mestrado em Botânica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

Sone, K.; Noguchi, K.; Terashima, I. (2006) Mechanical and ecophysiological significance of the form of a young *Acer rufinerve* tree: vertical gradient in branch mechanical properties. *Tree physiology*, 26(12), 1549–1558. <https://doi.org/10.1093/treephys/26.12.1549>

Stathers, R. J.; Rollerson, T. P.; Mitchell, S. J. (1994) *Windthrow handbook for British Columbia forests*. BC Min. For., Victoria. BC Working Paper 9401.

Yang, Z.; Hui, K.W.; Abbas, S.; Zhu, R.; Kwok, C.Y.T.; Heo, J.; Ju, S.; Wong, M.S. (2021) A Review of Dynamic Tree Behaviors: Measurement Methods on Tree Sway, Tree Tilt, and Root–Plate Movement. *Forests*, 12, 379. <https://doi.org/10.3390/f12030379>

