

Comparação de softwares de análise de imagem para a determinação da área foliar.

Jhonatan Rafael Zárate-Salazar ^{1*}, Mirela Natália Santos ¹, José Nailson Barros Santos ², Flavio Lozano Isla ¹

¹Mestre em Botânica, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil. (*Autor correspondente: rzaratesalazar@gmail.com)

³Doutorando em Ciências Florestais, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido, revisado e aceito pelos avaliadores no 3º Encontro de Biologia Vegetal – UFPE

RESUMO

A estimativa da área foliar é um componente fundamental para os modelos de desenvolvimento das plantas, pois permite compreender as adaptações ecofisiológicas perante estímulos do meio ambiente ou de práticas de manejo. Nesse sentido, objetivamos avaliar a acurácia de três softwares de análise de imagem que mensuram a área (AF), comprimento (C) e largura (L) foliar, respectivamente, suprindo a falta de direcionamento quanto à validação e comparação destes softwares em estudos biológicos alométricos. Foram selecionadas aleatoriamente 176 folhas elípticas, as quais depois de digitalizadas, foram mensuradas com os softwares ImageJ, Image-Pro® PLUS e AFSOFT. A AF, C e L foliar mensurados por cada software foram submetidos aos testes de Kolmogorov-Smirnov e Bartlett para confirmação da normalidade e homocedasticidade, respectivamente. A ANOVA foi realizada considerando os três softwares para a área foliar. Para o comprimento e largura foliar foi utilizado o teste t-Student entre ImageJ e Image-Pro® PLUS. Nestes últimos, adicionalmente por meio de um modelo exponencial $AF = \beta_0 \cdot (C \cdot L)^{\beta_1}$, foram comparados os resíduos. Nossos resultados evidenciaram que os softwares ImageJ, Image-Pro® PLUS e AFSOFT não demonstraram diferenças significativas na mensuração da área foliar na ANOVA ($F=1,581$; $p\text{-valor}=0,267$). Comparando a mensuração da largura e comprimento foliar, os softwares ImageJ e Image-Pro® PLUS não apresentaram diferenças significativas com o teste t-Student ($t = -0,248$; $p\text{-valor}= 0,804$ e $t = -0,812$; $p\text{-valor}= 0,417$, respectivamente). Da mesma forma, os resíduos do modelo exponencial tampouco apresentaram diferenças significativas entre si ($t = -0,027$; $p\text{-valor}= 0,979$). Portanto, concluímos que é possível determinar com a mesma exatidão a área foliar e dimensões foliares fazendo uso de softwares livres como ImageJ e AFSOFT, de modo que os estudantes e pesquisadores não deveriam se limitar à utilização de softwares pagos por receio de perder acurácia.

Palavras-Chaves: ImageJ, Image-Pro® PLUS, AFSOFT, Modelo alométrico

ABSTRACT

Leaf area estimation is a fundamental component for plant development models, since it allows to understand the ecophysiological adaptations to environmental stimulus or management practices. In this sense, we aimed to evaluate the accuracy of three image analysis software that measures area (AF), length (C) and leaf width (L), respectively, supplying the lack of guidance regarding the validation and comparison of these software in biological allometric studies. A total of 176 elliptical leaves were randomly selected, which, after being scanned, were measured using ImageJ, Image-Pro® PLUS and AFSOFT software. The AF, C and L foliar measured by each software were submitted to the Kolmogorov-Smirnov and Bartlett tests for confirmation of normality and homoscedasticity, respectively. The ANOVA was performed considering the three softwares for the leaf area. For the leaf length and width, the Student t-test between ImageJ and Image-Pro® PLUS was used. In the latter, additionally by means of an exponential model $AF = \beta_0 \cdot (C \cdot L)^{\beta_1}$, the residues were compared. Our results showed that the software ImageJ, Image-Pro® PLUS and AFSOFT did not show significant differences in the measurement of leaf area in ANOVA ($F= 1,581$; $p\text{-value} = 0,267$). Comparing the measurement of leaf width and length, ImageJ and Image-Pro® PLUS software did not show significant differences with the Student t-test ($t = -0,248$; $p\text{-value} = 0,804$ e $t = -0,812$; $p\text{-value}= 0,417$, respectively). Likewise, the residues of the exponential model did not show significant differences between them ($t = -0,027$; $p\text{-value}= 0,979$). Therefore, we conclude that it is possible to determine leaf area and leaf dimensions with the same accuracy using free software such as ImageJ and AFSOFT, so that students and researchers should not limit themselves to using paid software for fear of losing accuracy.

Keywords: ImageJ, Image-Pro® PLUS, AFSOFT, Allometric model

1. Introdução

As folhas são as principais estruturas das plantas que participam do processo fotossintético (SEVERINO; CARDOSO; SANTOS, 2005). Estudos relacionados às dimensões foliares, como a determinação da área foliar (AF) tornam-se úteis para estimar as necessidades fisiológicas e nutricionais de uma cultura, que conseqüentemente influenciam no desenvolvimento e produtividade das plantas (ALLEN et al., 1997; TERUEL, 1995). Em estudos ecológicos, o interesse pela AF é amplamente difundido para investigar processos de adaptação, evolução, competição e composição de traços em assembleias de plantas (PÉREZ-HARGUINDEGUY et al., 2013; WRIGHT et al., 2004). Adicionalmente, a AF é importante pelo excelente papel em estudos que consideram desde a relação planta-ambiente (TRAISER et al., 2005; XU et al., 2009), diversidade funcional em gradientes locais e biogeográficos (DÍAZ et al., 2015; MUSCARELLA; URIARTE, 2016; SFAIR; ROSADO; TABARELLI, 2016), bem como para a reconstrução de paisagens paleobotânicas (ROYER et al., 2005). Em estudos agrônômicos a folha é considerada uma variável-chave, devido à alta susceptibilidade às alterações climáticas (WRIGHT et al., 2004) e pela relevância em funções vitais das plantas como, evapotranspiração, interceptação e absorção de luz. Além disso a AF, é considerada um parâmetro indispensável para o cálculo da área foliar específica (razão entre a proporção de massa seca de folha e sua área), reconhecido globalmente como uma “característica *hotspot*” na ecologia de plantas (DÍAZ et al., 2015).

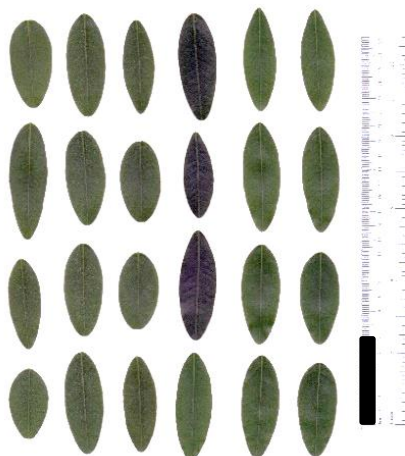
A determinação da AF pode ser realizada por meio de métodos diretos ou indiretos. Em campo, as medições diretas ou destrutivas demandam tempo e geralmente exigem o uso de equipamentos de alto custo, como por exemplo os medidores portáteis (MALDANER et al., 2009). Além disso, as folhas são retiradas da planta e mensuradas por meio de aparelhos digitais que demandam custo elevado. Por exemplo, o método gravimétrico e de pesagem dos discos foliares, podem representar desvantagens quanto ao limite de tempo de mensuração, que podem induzir a erros experimentais relacionados aos efeitos destrutivos das folhas (NASCIMENTO et al., 2002; TAVARES-JÚNIOR et al., 2002). Por outro lado, os métodos indiretos ou não-destrutivos, i.e. baseados na mensuração linear das folhas das plantas, estão associados ao uso de modelos alométricos que, quando disponíveis, permitem a determinação da área foliar em condições *in situ*, facilitando o acompanhamento do crescimento foliar, sem a necessidade de excisões constantes das folhas (ANTUNES et al., 2008; POMPELLI et al., 2012). Este último, tem se tornado uma alternativa para pesquisadores interessados em prever a AF em diversos grupos de plantas.

Os modelos alométricos estão associados à elaboração de equações matemáticas confiáveis para estimação da área foliar, reduzindo os custos no uso de equipamentos e recursos humanos (KHAN; ZAKI; ABBAS, 2015). No entanto, para a sua elaboração, é realizada uma amostragem de folhas de diferentes tamanhos, as quais são digitalizadas e por último mensuradas com softwares de análise de imagem (ANTUNES et al., 2008; POMPELLI et al., 2012; SANTOS, 2016). Dentre os diversos softwares de análise de imagem, Image-Pro® PLUS se destaca por ser um software de referência comumente utilizado em estudos relacionados à determinação de dimensões celulares, assim como da anatomia foliar das plantas (MANTUANO; BARROS; SCARANO, 2006; PITA-BARBOSA et al., 2009). No entanto, por ser um software com licença original paga, torna-se de difícil acesso a estudantes e pesquisadores interessados em propor modelos alométricos em plantas. Contudo, existem softwares que são disponibilizados gratuitamente, como ImageJ (FERREIRA; RASBAND, 2012) e AFSOFT (JORGE; SILVA, 2009), que poderiam suprir essa necessidade, mas devido à falta de estudos que comparem a acurácia desses softwares, ainda existe certa resistência por parte dos pesquisadores quanto ao uso por receio da perda de precisão. Nesse sentido, o presente trabalho objetivou comparar estatisticamente a acurácia do uso de três softwares de análise de imagem: ImageJ, Image-Pro® PLUS e AFSOFT, para mensuração da área foliar assim como do comprimento e largura.

2. Material e Métodos

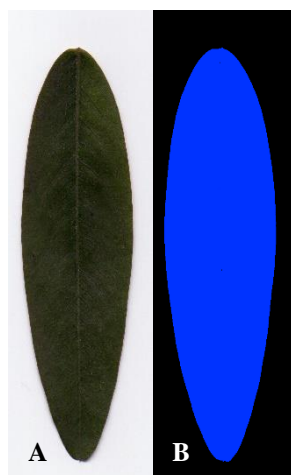
Para determinação da área foliar (AF), foram coletadas aleatoriamente 176 folhas elípticas, em bom estado de conservação, sem indícios de contaminação por fungos ou insetos, na cidade de Recife, estado de Pernambuco-PE. Após a coleta, as folhas foram digitalizadas a uma resolução de 300 dpi com scanner comum, considerando as exigências de cada software. Para os softwares ImageJ e Image-Pro® PLUS, as folhas foram digitalizadas em conjunto, dispostas de forma paralela à nervura principal, de modo que os softwares reconheçam o comprimento e a largura foliar de forma direta (Figura 1).

Figura 1 Conjunto de folhas digitalizadas para a mensuração das dimensões foliares com ImageJ e Image-Pro® PLUS. Barra: 3 cm.



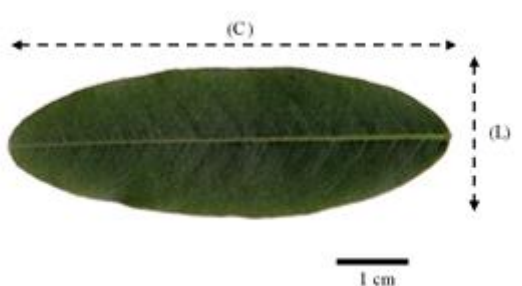
Para o software AFSOFT, as folhas foram digitalizadas individualmente, uma vez que o processamento das imagens está baseado em inteligência artificial do software para classificar os padrões encontrados nas folhas completas por meio de contrastes de cores (Figura 2). Este software, mesmo analisando individualmente as folhas, pode realizar este mesmo processo em lotes garantindo rapidez ao procedimento.

Figura 2 Folha individual digitalizada antes (A) e depois (B) de analisada pelo software AFSOft.



Depois de digitalizadas, as áreas foliares foram mensuradas pelos três softwares de imagem, isto é, ImageJ, Image-Pro® PLUS e AFSOft. No entanto, para a mensuração do comprimento (C) e a largura máxima (L), respectivamente (Figura 3), foram utilizados apenas ImageJ e Image-Pro® PLUS. Os dados das dimensões foliares foram submetidos aos testes de Kolmogorov-Smirnov e Bartlett para confirmação da normalidade e homocedasticidade, respectivamente. A ANOVA foi realizada para determinar diferenças significativas entre medidas das áreas foliares das folhas pelos três softwares. Já o teste t-Student foi utilizado para comparar o comprimento e largura foliar, assim como os resíduos calculados do modelo exponencial $AF = \beta_0 * (C * L)^{\beta_1}$ (ANTUNES et al., 2008) para os softwares ImageJ e Image-Pro® PLUS. As análises estatísticas foram desenvolvidas utilizando Software R v. 3.5.0 (R CORE TEAM, 2018).

Figura 3 Esquema das medições na lâmina da folha, sendo "C" o comprimento e "L" a largura máxima, respectivamente.



Adicionalmente, agrupamos as principais características dos softwares e consultamos em sites de busca acadêmica a frequência de uso em trabalhos científicos.

3. Resultados

3.1 Comparação dos softwares

As dimensões foliares mensuradas pelos três softwares em estudo estão agrupadas na Tabela 1. O AFSOFT foi o único software que não foi possível mensurar a largura e o comprimento das folhas. Nesse sentido, a comparação estatística dos três softwares se realizou apenas para a área foliar, e do comprimento e largura foliar para ImageJ e Image-Pro® PLUS.

Tabela 1 Resumo estatístico das dimensões foliares mensuradas pelos softwares. Média \pm SD, $n=176$.

Dimensão foliar	ImageJ	Image-Pro® PLUS	AFSOFT
Área (cm ²)	14,03 \pm 3,25	14.64 \pm 3.38	14.21 \pm 3.29
Largura (cm)	2,50 \pm 0,32	2,51 \pm 0,30	-
Comprimento (cm)	7,42 \pm 1,17	7,53 \pm 3,38	-

Por meio da análise de variância (ANOVA), área foliar não apresentou diferenças significativas entre os softwares Image-Pro® PLUS, ImageJ e AFSOFT ($P>0,05$) (Tabela 2).

Tabela 2 Análise de Variância (ANOVA) para a área foliar mensurada pelos três softwares de imagem.

FV	GL	SQ	QM	F	¹ p-valor
Softwares	2	34,6	17,29	15,811	0,2067
Erro	525	5741,3	10,936		

¹ Se p-valor $> 0,05$, então não existem diferenças significativas.

Por outro lado, quando comparadas as dimensões foliares do comprimento e largura, assim como os resíduos obtidos do modelo exponencial $AF = \beta_0 * (C * L)^{\beta_1}$, também não apresentaram diferenças significativas ($P>0,05$) para os softwares ImageJ e Image-Pro® PLUS (Tabela 3).

Tabela 3 Teste t-Student para a largura e comprimento foliar, assim como para os resíduos obtidos das dimensões foliares no modelo exponencial $AF = \beta_0 * (C * L)^{\beta_1}$, mensurada pelos softwares ImageJ e Image-Pro® PLUS.

Dimensão/parâmetro	Estatístico (t)	¹ p-valor
Largura	-0,248	0,804
Comprimento	-0,804	0,417
Resíduos obtidos do modelo alométrico $AF = \beta_0 * (C * L)^{\beta_1}$	-0,027	0,979

¹ se p-valor $> 0,05$, então não existem diferenças significativas.

3.2. Características principais dos softwares

Segundo o levantamento informativo realizado (Tabela 4), identificamos que Image-Pro® PLUS representa o 94% das referências e buscas reportadas, o que confirma o alto grau de reputação do software associado aos seus diversos usos em trabalhos científicos.

Tabela 4 Comparação dos aspectos gerais dos softwares de análises de imagem, ImageJ, Image-Pro® PLUS e AFSOFT para a mensurações básicas das dimensões foliares.

Aspectos	ImageJ	Image-Pro® PLUS	AFSOFT
Google acadêmico	171,000	2,040,000	46
Crossref	646	585,310	0
Custo	Grátis	Prévio orçamento	Grátis
Licença	Livre	Institucional	Livre
Soporte técnico	Sim	Sim	Sim
Manipulação	Auto e semiautomático	Auto e semiautomático	Automático
Dimensões foliares	Área, largura, comprimento e perímetro	Área, largura e comprimento	Área
Exportação em Excel	Sim	Sim	Sim
Dificuldade de uso	Baixa	Alta	Intermediária
Formatos de arquivo	*.gif, *.jpg, *.bmp, *.png, *.pgm, *.fits	*.flf, *.fts, *.fit, *.fits, *.jpg, *.jpf, *.raw, *.tif, *.tiff	*jpg
Sites	imagej.nih.gov/ij/	www.mediacy.com/imageproplus	www.cnpdia.embrapa.br/downloads/afsoft/
Sistema operacional	Windows®, Mac OS X, Linux	Windows®	Windows®

4. Discussão

A partir dos resultados apresentados sobre comparação dos softwares para análise de imagem, verificou-se que existe possibilidade de escolha de um software intuitivo e simples que evite proporcionar, no estudante ou pesquisador, detalhes desnecessários que o levem a incidir em erros de manipulação (SALAS, 2008). A escolha de um determinado software muitas vezes depende da formação do usuário, assim como também da finalidade, seja para docência ou investigação (SOUSA; SILVA, 2000). Nesse sentido, do ponto de vista estatístico com os resultados deste trabalho, os usuários teriam a opção de escolher qualquer um desses softwares gratuitos, uma vez que não foram evidenciadas diferenças estatísticas entre si, não apenas pelas dimensões foliares mensuradas, senão porque quando estas dimensões foram submetidas ao modelo exponencial $AF = \beta_0 * (C * L)^{\beta_1}$ (ANTUNES et al., 2008), com enfoque nos resíduos matemáticos, tampouco apresentaram diferenças.

Dos softwares em estudo apenas dois, ImageJ e Image-Pro® PLUS, demonstraram ser mais completos ao momento de mensurar todas as dimensões foliares. AFSOFT somente foi capaz de mensurar a área foliar devido a seu sistema de inteligência artificial que contrasta os padrões de cores de imagem determinadas pelo usuário

(JORGE; SILVA, 2009). Ademais, para esse software, é necessário que as folhas sejam digitalizadas individualmente, o que prolonga o tempo de execução do procedimento.

Considerando a praticidade e a compatibilidade com o usuário, o ImageJ destaca-se por uma vez apresentar fácil instalação e manuseio. Por ser um software gratuito, facilita o acesso a qualquer usuário, permitindo a estudantes ou pesquisadores a geração de informação sem restrições. ImageJ inclusive permite integração com o ambiente do software R (KATABUCHI, 2015), que forneceria ainda mais controle e avaliação dos dados.

O uso de softwares livres é uma tendência que continua, que vem avançando ao passar dos anos, pois permite que o usuário execute, copie, compartilhe, modifique e até consiga aprimorar os softwares segundo as necessidades e expectativas dele (SILVEIRA, 2003). Por outro lado, também permite reduzir as práticas ilegais de uso de softwares que precisam licença. Considerando que o controle do uso de softwares com licenças legais (i.e., cópias permitidas) na América Latina é limitado, o uso de softwares sem licença é uma prática comumente aceita, com incidência média do 55% na América do Sul, sendo 47% somente no Brasil (BUSINNES SOFTWARE ALLIANCE, 2016).

Devido à justificativa dos preços altos dos programas usados, inclusive a nível universitário, existe incentivo ao uso de softwares sem licença, que são distribuídos aos estudantes para uso individual. No entanto, desta maneira, é difícil diminuir a pirataria, ainda considerando que é por meio da docência se fornece conhecimento e princípios éticos-morais no uso de softwares. Nesse sentido o uso de programas sem licença no deveria acontecer em centros acadêmicos (FERES, MARCOS VINÍCIO CHEIN OLIVEIRA, JORDAN VINÍCIUS DE e GONCALVES, 2017; SALAS, 2008).

5. Conclusão

O uso de softwares livres para a avaliação das áreas foliares das plantas como ImageJ e AFSOFT, tendem a ser rápidos e fáceis e não apresentam diminuição da acurácia em comparação ao software Image-Pro® PLUS. Com esses softwares gratuitos é possível realizar trabalhos ou pesquisas de qualidade, com menor custo e acurácia equivalente ao Image-Pro® PLUS. ImageJ é um software gratuito, completo e de fácil uso, que permite automatizar a mensuração das dimensões foliares auxiliando a elaboração de modelos alométricos.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Brasil), pelo apoio financeiro para a realização dessa pesquisa.

7. Referências

ALLEN, R. G. et al. Proposed revision to the FAO procedure for estimating crop water requirements. **Acta Horticulturae**, n. 449, p. 17–34, ago. 1997.

ANTUNES, W. C. et al. Allometric models for non-destructive leaf area estimation in coffee (*Coffea arabica* and *Coffea canephora*). **Annals of Applied Biology**, v. 153, n. 1, p. 33–40, ago. 2008.

BUSINNES SOFTWARE ALLIANCE. **Seizing Opportunity Through License Compliance BSA Global Software Survey**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://globalstudy.bsa.org/2016/downloads/studies/BSA_GSS_US.pdf>.

- DÍAZ, S. et al. The global spectrum of plant form and function. **Nature**, v. 529, n. 7585, p. 167–171, dez. 2015.
- FERES, MARCOS VINÍCIO CHEIN OLIVEIRA, JORDAN VINÍCIUS DE AND GONCALVES, D. D. Robin Hood às avessas: software, pirataria e direito autoral. **Revista Direito GV**, v. 13, n. 1, p. 69–94, 2017.
- FERREIRA, T.; RASBAND, W. ImageJ User Guide. **IJ 1.46r**, p. 185, 2012.
- JORGE, L. A. DE C.; SILVA, D. J. DA C. B. AFSOFT: Manual de Utilização. **Embrapa Instrumentação Agropecuária**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPDIA-2010/12253/1/LI03-2009.pdf>>.
- KATABUCHI, M. LeafArea: an R package for rapid digital image analysis of leaf area. **Ecological Research**, v. 30, n. 6, p. 1073–1077, 2015.
- KHAN, D.; ZAKI, M. J.; ABBAS, S. M. Leaf area estimation in Jojoba (*Simmondsia chinensis* (Link.) CE Schneider) seedlings. **International Journal of Biology and Biotechnology**, v. 12, p. 667–674, 2015.
- MALDANER, I. C. et al. Modelos de determinação não-destrutiva da área foliar em girassol. **Ciência Rural**, v. 39, n. 5, p. 1356–1361, ago. 2009.
- MANTUANO, D. G.; BARROS, C. F.; SCARANO, F. R. Leaf anatomy variation within and between three "restinga" populations of *Erythroxylum ovalifolium* Peyr: (Erythroxylaceae) in Southeast Brazil. **Brazilian Journal of Botany**, v. 29, n. 2, p. 209–215, 2006.
- MUSCARELLA, R.; URIARTE, M. Do community-weighted mean functional traits reflect optimal strategies? **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 283, n. 1827, p. 20152434, mar. 2016.
- NASCIMENTO, I. B. DO et al. Estimativa da área foliar do meloeiro. **Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 4, p. 555–558, dez. 2002.
- PÉREZ-HARGUINDEGUY, N. et al. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany**, v. 61, n. 3, p. 167, 2013.
- PITA-BARBOSA, A. et al. Efeitos fitotóxicos do fluoreto na morfoanatomia foliar de *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf e *Brachiaria decumbens* Stapf (Poaceae). **Acta Botanica Brasilica**, v. 23, p. 1027–1033, 2009.
- POMPELLI, M. F. et al. Allometric models for non-destructive leaf area estimation of *Jatropha curcas*. **Biomass and Bioenergy**, v. 36, p. 77–85, jan. 2012.
- R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing** Vienna, Austria, 2018. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>
-

- ROYER, D. L. et al. Correlations of climate and plant ecology to leaf size and shape: potential proxies for the fossil record. **American Journal of Botany**, v. 92, n. 7, p. 1141–1151, jul. 2005.
- SALAS, C. ¿Por qué comprar un programa estadístico si existe R? **Ecología austral**, v. 18, n. 2, p. 223–231, 2008.
- SANTOS, J. N. B. Equações alométricas para estimativa da área foliar de espécies lenhosas de floresta ombrófila de terras baixas. [s.l.] **Universidade Federal Rural de Pernambuco**, 2016.
- SEVERINO, L. S.; CARDOSO, G. D.; SANTOS, J. W. DOS. Método para determinação da área foliar da mamoneira. **Embrapa Algodão-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2005.
- SFAIR, J. C.; ROSADO, B. H. P.; TABARELLI, M. The effects of environmental constraints on plant community organization depend on which traits are measured. **Journal of Vegetation Science**, v. 27, n. 6, p. 1264–1274, ago. 2016.
- SILVEIRA, S. A. DA. Inclusão digital, software livre e globalização contra-hegemônica. **Seminários temáticos para a 3ª Conferência Nacional de C,T&I**. 2003.
- SOUSA, M. H. DE; SILVA, N. N. DA. Comparação de softwares para análise de dados de levantamentos complexos. **Revista de Saúde Pública**, v. 34, p. 646–653, 2000.
- TAVARES-JÚNIOR, J. E. et al. Análise comparativa de métodos de estimativa de área foliar em cafeeiro. **Bragantia**, v. 61, n. 2, p. 199–203, ago. 2002.
- TERUEL, D. A. Modelagem do índice de área foliar da cana-de-açúcar em diferentes regimes hídricos. **Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo**, 1995.
- TRAISSER, C. et al. Environmental signals from leaves - a physiognomic analysis of European vegetation. **New Phytologist**, v. 166, n. 2, p. 465–484, jan. 2005.
- WRIGHT, I. J. et al. The worldwide leaf economics spectrum. **Nature**, v. 428, n. 6985, p. 821–827, abr. 2004.
- XU, F. et al. Leaf morphology correlates with water and light availability: What consequences for simple and compound leaves? **Progress in Natural Science**, v. 19, n. 12, p. 1789–1798, dez. 2009.