

Revista Cubana de Ciencias Forestales

Volumen 13, número 3; 2025, septiembre-diciembre



Comparación de métodos no destructivos para estimar el área foliar de Cinchona officinalis L. mediante procesamiento digital de imágenes

Comparison of non-destructive methods for estimating the leaf area of Cinchona officinalis L. using digital image processing

Comparaçãõ de métodos não destrutivos para estimar a área foliar de Cinchona officinalis L. por meio de processamento digital de imagens

Franklin Hitler Fernandez-Zarate^{1*} , Annick Estefany Huaccha-Castillo² , Segundo Primitivo Vaca-Marquina³ , Alejandro Seminario-Cunya⁴ , Víctor Hugo Taboada-Mitma¹ , Luis Jhoseph Pérez-Delgado¹ , David Coronel-Bustamante¹ , Lenin Quiñones-Huatangari⁵ 

¹Centro Experimental Yanayacu, Dirección de Supervisión y Monitoreo en las Estaciones Experimentales Agrarias, Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), Carretera Jaén San Ignacio Km 23,7, Jaén 06801, Cajamarca, Perú.

²Instituto Internacional de Investigación en el Árbol de la Quina, Universidad Nacional de Jaén, Cajamarca, Perú.

³Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú.

⁴Universidad Nacional Autónoma de Chota, Cajamarca, Perú;

⁵Escuela Profesional de Ingeniería de Ciencia de Datos e Inteligencia Artificial. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Perú



*Autor para la correspondencia: fran.9615fernandez@gmail.com

Recibido: 22/10/2024.

Aprobado: 02/08/2025

Publicado: 02/09/2025

RESUMEN

Cinchona officinalis es una importante especie vegetal, fue el único tratamiento para la malaria durante más de tres siglos. El objetivo de este estudio fue comparar la precisión de cuatro métodos no destructivos de procesamiento digital de imágenes (LeafArea y tres algoritmos de ImageJ) para estimar el área foliar de plantaciones jóvenes de *C. officinalis* en dos condiciones de establecimiento: macizo forestal y franjas de enriquecimiento. Se fotografiaron hojas a 8 cm de distancia utilizando un smartphone de 24 MP y se procesaron con los métodos evaluados. El análisis estadístico incluyó diagramas de caja y bigotes, correlación de Pearson y prueba de Friedman. Los resultados mostraron que los métodos M3 y M4 de ImageJ presentaron la mayor precisión ($r = 0,99$), sin diferencias significativas entre ellos, y con sobreestimaciones detectadas en M1 y M2. Se concluye que M3 y M4 son opciones rápidas, de bajo costo y alta precisión para el monitoreo foliar de *C. officinalis* en campo.

Palabras clave: Área foliar, Recurso Vegetal, Tecnología, Árbol de la Quina, ImagJ.

ABSTRACT

Cinchona officinalis is an important plant species, was the only treatment for malaria for more than three centuries. The objective of this study was to compare the accuracy of four non-destructive digital image processing methods (LeafArea and three ImageJ algorithms) for estimating the leaf area of young *C. officinalis* plantations in two establishment conditions: forest stands and enrichment strips. Leaves were photographed at a distance of 8 cm using a 24 MP smartphone and processed using the methods evaluated. Statistical analysis included box-and-whisker plots, Pearson correlation, and Friedman test. The results showed that ImageJ methods M3 and M4 had the highest accuracy ($r = 0.99$), with no significant differences between them, and with



overestimations detected in M1 and M2. It is concluded that M3 and M4 are fast, low-cost, and highly accurate options for field monitoring of *C. officinalis* foliage.

Keywords: Leaf area, Plant Resource, Technology, Cinchona Tree, ImageJ.

RESUMO

Cinchona officinalis é uma espécie vegetal importante, foi o único tratamento para a malária durante mais de três séculos. O objetivo deste estudo foi comparar a precisão de quatro métodos não destrutivos de processamento digital de imagens (LeafArea e três algoritmos do ImageJ) para estimar a área foliar de plantações jovens de *C. officinalis* em duas condições de estabelecimento: maciço florestal e faixas de enriquecimento. As folhas foram fotografadas a 8 cm de distância usando um smartphone de 24 MP e processadas com os métodos avaliados. A análise estatística incluiu diagramas de caixa e bigodes, correlação de Pearson e teste de Friedman. Os resultados mostraram que os métodos M3 e M4 do ImageJ apresentaram a maior precisão ($r = 0,99$), sem diferenças significativas entre eles, e com superestimativas detectadas em M1 e M2. Conclui-se que M3 e M4 são opções rápidas, de baixo custo e alta precisão para o monitoramento foliar de *C. officinalis* em campo.

Palavras-chave: Área foliar, Recurso Vegetal, Tecnologia, Árvore de Cinchona, ImageJ.

INTRODUCCIÓN

Cinchona officinalis es una especie de planta medicinal conocida como «cascarilla», «quina» o «árbol de la quina» que pertenece a la familia de las Rubiáceas (Raheem *et al.*, 2004), que se encuentra de forma natural en zonas altoandinas y amazónicas de Bolivia, Ecuador, Colombia y Perú (Aymard 2019). Su importancia radica en su corteza, que contiene varios alcaloides, entre ellos la quinina, que fue utilizada durante más de tres siglos como único tratamiento contra la malaria; esta propiedad hizo que los bosques de quina fueran sobreexplotados, llevándola al borde de la extinción (Kaufman y Rúveda 2005).



El área foliar (AF) es un parámetro importante para el análisis de las interacciones entre la atmósfera y las plantas, explicando el comportamiento fisiológico y agronómico de las especies vegetales con respecto a la eficiencia fotosintética, evapotranspiración, cantidad de agua, radiación y respuesta a la fertilización (Blanco y Folegatti 2005; Syvertsen, Goñi y Otero 2003).

Existen dos categorías para medir el AF: directa e indirecta (Figura 1) (Arslan, Erten y Inan 2021; Bréda 2003; Jonckheere *et al.*, 2004). La estimación directa del LA puede ser destructiva o no destructiva, los métodos destructivos requieren la eliminación de hojas o trampas de caída de hojas, son muy caros y requieren mucha mano de obra (Casa, Upreti y Pelosi 2019; Garrigues *et al.*, 2008); estos incluyen los basados en la silueta de la hoja, aplicaciones, planímetro y escáneres. Los métodos indirectos o no destructivos permiten la medición repetida de las hojas en el tiempo evitando la alteración biológica característica de los métodos destructivos (Suárez *et al.*, 2018; Swart *et al.*, 2004) y son útiles cuando existe una baja densidad de plantas en estudio (Blanco y Folegatti 2005); entre ellos el uso de modelos matemáticos, cámaras digitales, apps.

Existen instrumentos electrónicos que estiman el AF (LI-3000C, CI-202, CI-203, LAI-2000, SunScan de Delta-T Devices) y demuestran ser una alternativa a los métodos destructivos (Campos-Taberner *et al.*, 2016; Jonckheere *et al.*, 2004; Weiss *et al.*, 2004) sin embargo, suelen ser caros, su portabilidad va a depender del área de trabajo y el mantenimiento suele requerir mucho tiempo (Confalonieri *et al.*, 2013; Thimonier, Baker (1996), Castillo, *et al.* (2014) Liu *et al.* (2010), Sedivy and Schleppi 2010; Yilmaz *et al.*, 2008)..

En este contexto, el uso de la fotografía digital surge como una opción (Chianucci *et al.*, 2015) que luego son procesadas en software especializado de procesamiento de imágenes, por ejemplo, ImageJ desarrollado por los Institutos Nacionales de Salud de Estados Unidos y que es de dominio público; también es uno de los más utilizados en la estimación del AF (Easlon y Bloom 2014; Ferreira *et al.*, 2017; Rincón, Olarte y Pérez 2012) ImageJ utiliza un índice de recuento de píxeles basado en un umbral para determinar el AF (Easlon y Bloom 2014).



Además, se han desarrollado paquetes de software (apps) para smartphones (Confalonieri *et al.*, 2013; Qu *et al.*, 2021) para determinar el AF en diferentes estudios ecológicos (Teacher *et al.*, 2013). Por ejemplo, LeafArea lanzada en 2020 y creada por Skyberry que es un software de análisis de imágenes digitales que emplea una serie de umbrales y relaciones de color para estimar el AF de una imagen en pocos segundos y con poca intervención del usuario (Ahmad *et al.*, 2015; Easlon y Bloom 2014). Estos instrumentos tienen un grado de precisión aceptable, son fáciles de manejar y baratos (Confalonieri *et al.*, 2013). Bajo este contexto, el objetivo de la investigación fue comparar la precisión de cuatro métodos no destructivos de procesamiento digital de imágenes (LeafArea y tres algoritmos de ImageJ) para estimar el área foliar de plantaciones jóvenes de *C. officinalis*. Este estudio constituye la primera comparación documentada de métodos no destructivos de estimación de área foliar en *C. officinalis*, aportando criterios prácticos para su uso en campo y contribuyendo a mejorar las estrategias de monitoreo y manejo de esta especie en peligro de extinción (Figura 1).

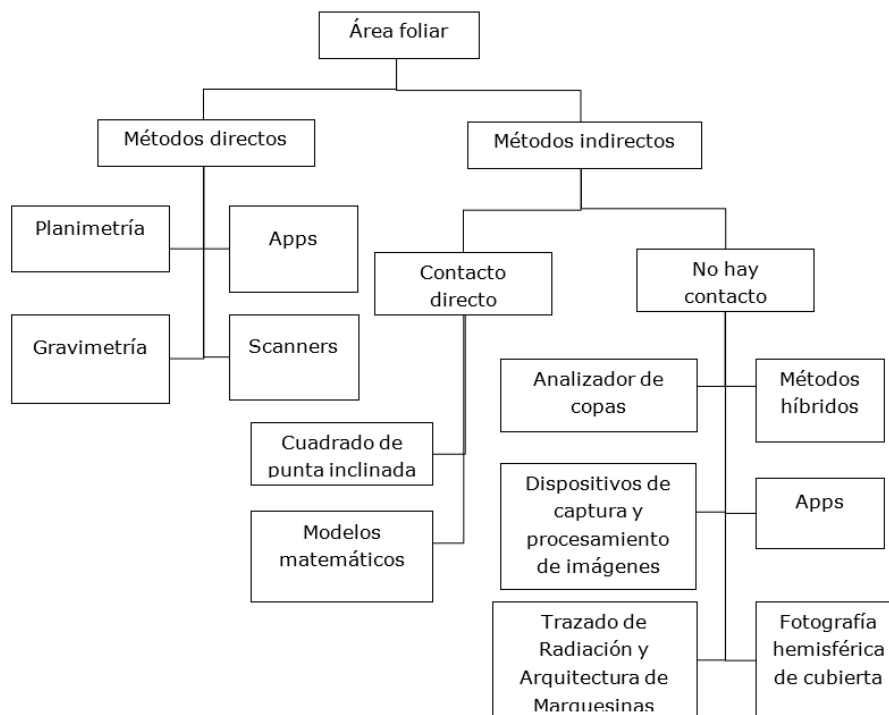


Figura 1. - Métodos para determinar la superficie foliar. Fuente: (Jonckheere *et al.*, 2004).



MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

Los datos fueron colectados en enero de 2022 en una plantación forestal de *C. officinalis* de tres meses de edad, ubicada en la comunidad de La Cascarilla ($5^{\circ}39'40.99''S$ y $78^{\circ}54'35.14''WE$), provincia de Jaén, Perú. La zona tiene una altitud promedio de 2 058 m y corresponde a un bosque húmedo premontano (bh-P). La temperatura máxima es de 20,5 °C y la mínima de 13 °C; la precipitación anual es de 1 730 mm (Fernández y Huaccha, 2022). La plantación de *C. officinalis* se estableció como franja de enriquecimiento (EF) y como macizo forestal (MF).

Montaje fotográfico

Se midió un total de 96 hojas seleccionadas aleatoriamente (2 hojas por planta), cubriendo distintos tamaños y posiciones en la planta para garantizar representatividad. Las fotografías se tomaron en condiciones de luz natural difusa, evitando sombras marcadas y reflejos, y manteniendo una distancia fija de 10 cm como estándar óptimo para enfoque y calibración de escala. Las hojas se fotografiaron sobre un fondo blanco (cartulina de 20 x 12 cm) con una línea de referencia de 2 cm de longitud trazada junto a la ubicación de las hojas para mantener la escala en el procesamiento de imágenes. Para extender las hojas, se cubrieron con un cristal transparente de 20 x 12 cm y 3 mm de grosor con una superficie esmerilada para evitar el deslumbramiento.

Medición del área foliar

Se utilizó un teléfono móvil Huawei con un modelo de cámara MAR-LX3A de 24 megapíxeles para estimar el área foliar, que se midió de dos maneras:

Vía directa: se instaló la aplicación LeafArea (M1) para smartphone, se determinó directamente el AF colocando el equipo a 10 cm de la hoja de la planta sobre el soporte para fotografiarla y finalmente se registró el área estimada por la aplicación.



Indirectamente: Se tomaron fotografías a 10 cm de la hoja de la planta sobre el soporte fotográfico, estas imágenes se procesaron en el software ImageJ utilizando tres métodos para la determinación del área foliar siguiendo los siguientes procedimientos en el software; M2) File - Open - Image - Crop - Analyze - Set scale - Image - Type - 8-Bit - Image - Fit - Threshold - Analyze - Measure, M3) File - Open - Line width - Analyze - Set scale - Wand tool - Analyze - Measure, M4) File - Open - Line width - Analyze - Set scale - Polygon selections - Analyze - Measure.

Análisis estadístico

Se utilizaron gráficos de caja y bigotes en la matriz de datos para describir visualmente características como la media, los cuartiles, así como la dispersión y la simetría del área foliar obtenida por los cuatro métodos. Para estimar el ajuste entre cada método de determinación del área foliar, se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson (para ello se comprobó la normalidad de las variables mediante la prueba de Kolgomorov-Smirnov) entre los valores de área obtenidos con cada método utilizado. Por último, se utilizó la prueba no paramétrica de Friedman para comparar las medianas de los cuatro grupos determinados. Los análisis se realizaron en el programa informático Rstudio.

RESULTADOS

Variabilidad del área foliar según método y tipo de plantación

El AF máxima estimada en plantas de *C. officinalis* sembradas como macizo forestal fue de 31,18 cm² se registró con M1, seguida del AF registrada con M2 (26,79 cm²), mientras que el AF mínima se registró con M4 (3,37 cm²) seguida de M3 (3,45 cm²). En las plantas de *C. officinalis* sembradas en franjas de enriquecimiento, la AF máxima fue de 83,29 cm² se registró con M2, seguida del AF registrada con M1 (60,23 cm²), mientras que el AF mínima se registró con M4 (6,57 cm²) seguida de M3 (6,79 cm²) (Figura 2A, B).



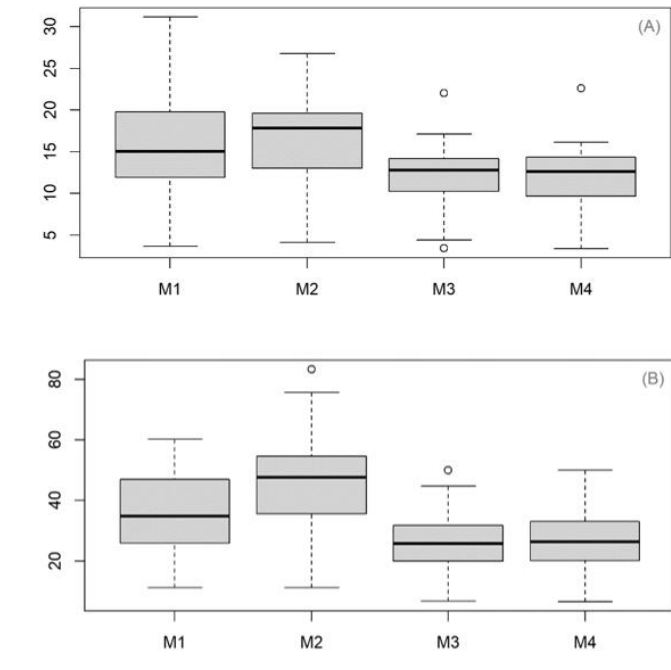


Figura 2. - Diagramas de cajas y bigotes del área foliar estimada por métodos no destructivos en plantas de *C. officinalis* sembradas en macizo forestal (A) y en franjas de enriquecimiento (B)

Correlaciones entre métodos

Para el AF estimada en plantas de *C. officinalis* sembradas como macizo forestal, se calcularon correlaciones cercanas a uno para los métodos M3 y M4 ($r=0,99$) y entre M1 y M2 ($r=0,85$) (Figura 3A). Mientras que para el AF estimada en plantas de *C. officinalis* sembradas mediante franjas de enriquecimiento, las dos correlaciones positivas cercanas a uno se observaron entre los métodos M3 y M4 ($r=0,99$) y entre M2 y M4 ($r=0,97$) (Figura 3B).



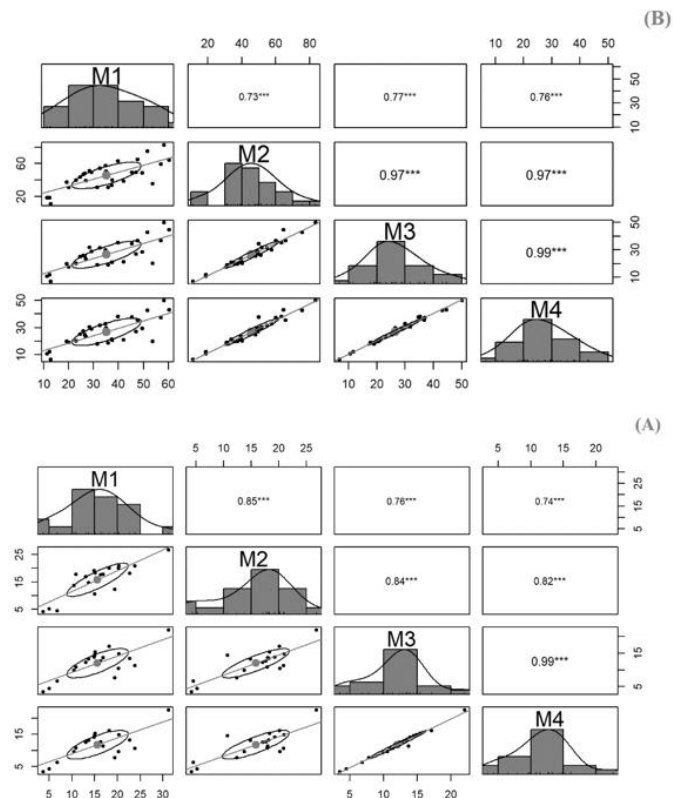


Figura 3. - Matriz de correlación del área foliar estimada por métodos no destructivos en plantas de *C. officinalis* plantadas como macizo forestal (A) y por bandas de enriquecimiento (B).

Diferencias estadísticas entre métodos

El AF estimado por los cuatro métodos de estudio para hojas de *C. officinalis* plantadas por macizo forestal mostró diferencias significativas entre los métodos M1, M2 con M3, M4; mientras que el AF calculado en plantas de *C. officinalis* plantadas por fajas de enriquecimiento mostró diferencias significativas entre los métodos M1 con el resto de los métodos, M2 con los otros tres métodos evaluados, sin embargo, no se evidenciaron diferencias entre M3 y M4 (Tabla 1).



Tabla 1 - Resultados de la prueba no paramétrica de Friedman aplicada a los datos de área foliar estimada por métodos no destructivos en plantas de *C. officinalis* plantadas como grupo forestal y franjas de enriquecimiento. Letras mayúsculas diferentes para cada método indican diferencias significativas

Método	Macizo forestal		Fajas de enriquecimiento	
	Suma de rangos	Grupo	Suma de rangos	Grupo
M1	60	A	87	B
M2	65	A	113	A
M3	38	B	47	C
M4	27	B	53	C

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran que los algoritmos M3 y M4 del software ImageJ presentaron las estimaciones más precisas y consistentes del área foliar (AF) de *Cinchona officinalis*, con una correlación muy alta ($r = 0,99$) y sin diferencias significativas entre ellos, independientemente del sistema de plantación evaluado. Este comportamiento es coherente con estudios previos en otros cultivos donde ImageJ ha mostrado alta fiabilidad para mediciones morfométricas, especialmente cuando se utilizan herramientas de selección manual y calibración precisa de escala (Easlson y Bloom 2014; Ferreira *et al.*, 2017). La concordancia entre M3 y M4 indica que la elección entre ambos podría responder más a criterios de ergonomía y tiempo de procesamiento que a diferencias en precisión.

En contraste, el método M1 (LeafArea) y el M2 de ImageJ presentaron sobreestimaciones significativas del AF, particularmente en condiciones de sombra y humedad. Este patrón podría explicarse por la sensibilidad de sus algoritmos a variaciones en la intensidad lumínica y a la presencia de sombras y reflejos, factores que afectan el reconocimiento de bordes y el umbralado en la segmentación de imágenes (Ahmad *et al.*, 2015; Lee y Lee 2011). Resultados similares fueron reportados en *Capsicum annuum* (Swart *et al.*, 2004) y en especies frutales (Kirk *et al.*, 2009), donde las diferencias de coloración foliar y la heterogeneidad de la luz generaron sesgos en la estimación.



La relevancia de este hallazgo es doble. Por un lado, confirma que las metodologías basadas en procesamiento digital de imágenes pueden reemplazar con éxito los métodos destructivos y costosos, como los planímetros o dispositivos especializados (Confalonieri *et al.*, 2013; Casa, Upreti y Pelosi 2019), lo que resulta crucial para especies amenazadas como *C. officinalis*, donde la preservación de las hojas es esencial para no comprometer el vigor de las plantas. Por otro, evidencia que la selección del método debe considerar no solo la precisión técnica, sino también las condiciones ambientales en las que se aplicará, ya que la luz y la humedad pueden modificar la exactitud de las mediciones.

Desde un punto de vista aplicado, la utilización de M3 y M4 representa una oportunidad para establecer protocolos de monitoreo foliar rápidos, de bajo costo y reproducibles en programas de conservación y reforestación de *C. officinalis*. La medición confiable del AF es fundamental para evaluar la capacidad fotosintética y el estado fisiológico de la planta, así como para modelar la productividad y las necesidades hídricas (Blanco y Folegatti 2005; Syvertsen, Goñi y Otero 2003). Su implementación en campo permitiría obtener series temporales de datos que respalden decisiones de manejo y selección genética.

Sin embargo, este estudio presenta limitaciones que deben considerarse. El tamaño muestral y la evaluación en una única etapa de desarrollo restringen la generalización de los resultados. Además, no se evaluó la influencia estacional ni la variabilidad cromática foliar, aspectos que han demostrado afectar la precisión de las mediciones digitales (Kirk *et al.*, 2009). Futuras investigaciones deberían incluir comparaciones inter-estacionales, distintas edades de plantación y un mayor número de muestras para fortalecer la validez estadística y la extrapolación de resultados.

En síntesis, los resultados respaldan la recomendación de emplear los métodos M3 y M4 de ImageJ como herramientas principales para la estimación de AF en *C. officinalis*, siempre que se realicen bajo condiciones controladas de luz y humedad. Su incorporación a programas de monitoreo permitirá avanzar hacia estrategias de manejo más eficientes, alineadas con la conservación y uso sostenible de esta especie emblemática de los Andes.



CONCLUSIÓN

Los métodos M3 y M4 de ImageJ se confirman como herramientas precisas, rápidas y de bajo costo para la estimación no destructiva del área foliar en *C. officinalis*, mostrando un desempeño superior y más consistente que LeafArea (M1) y M2 bajo las condiciones evaluadas. Su aplicación en campo puede optimizar los programas de monitoreo de esta especie en peligro, permitiendo la recopilación de datos confiables en lapsos cortos de tiempo y con recursos limitados. Se recomienda su validación en diferentes fases de desarrollo y en otras especies forestales de importancia ecológica y económica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, S., ALI, HAKOOMAT, ATIQUE-UR-REHMAN, KHAN, R.J.Z., AHMAD, W., FATIMA, Z., ABBAS, G., IRFAN, M., ALI, HINA, KHAN, M.A. Y HASANUZZAMAN, M. 2015. Measuring leaf area of winter cereals by different techniques: a comparison. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, vol. 13, no. 2, ISSN 1727-4915. Disponible en: https://pjlss.edu.pk/pdf_files/2015_2/117-125.pdf
- ARSLAN, A.E., ERTEN, E. Y INAN, M. 2021. A comparative study for obtaining effective Leaf Area Index from single Terrestrial Laser Scans by removal of wood material. *Measurement*, vol. 178, ISSN 0263-2241. DOI 10.1016/j.measurement.2021.109262.
- AYMARD, G.A. 2019. Breve reseña de los aspectos taxonómicos y nomenclaturales actuales del género *Cinchona* (Rubiaceae-Cinchoneae). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 43, ISSN 2382-4980. DOI 10.18257/raccefyn.1079. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7433220>



- BAKER, B., OLSZYK, D.M. Y TINGEY, D. 1996. Digital Image Analysis to Estimate Leaf Area. *Journal of Plant Physiology*, vol. 148, no. 5, ISSN 0176-1617. DOI 10.1016/S0176-1617(96)80072-1. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0176161796800721>
- BLANCO, F.F. Y FOLEGATTI, M.V. 2005. Estimation of leaf area for greenhouse cucumber by linear measurements under salinity and grafting. *Scientia Agricola*, vol. 62, ISSN 1678-992X. DOI 10.1590/S0103-90162005000400001. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/sa/a/Fz6Ln7zsJFmN56Nn5qhgMNt/>
- BRÉDA, N.J.J. 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, vol. 54, no. 392, ISSN 0022-0957. DOI 10.1093/jxb/erg263. Disponible en: <https://academic.oup.com/jxb/article/54/392/2403/621920>
- CAMPOS-TABERNER, M., GARCÍA-HARO, F.J., CONFALONIERI, R., MARTÍNEZ, B., MORENO, Á., SÁNCHEZ-RUIZ, S., GILABERT, M.A., CAMACHO, F., BOSCHETTI, M. Y BUSETTO, L. 2016. Multitemporal Monitoring of Plant Area Index in the Valencia Rice District with PocketLAI. *Remote Sensing*, vol. 8, no. 3, DOI 10.3390/rs8030202. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/3/202>
- CASA, R., UPRETI, D. Y PELOSI, F. 2019. Measurement and estimation of leaf area index (LAI) using commercial instruments and smartphone-based systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 275, no. 1, ISSN 1755-1315. DOI 10.1088/1755-1315/275/1/012006. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/333257054_Measurement_and_estimation_of_leaf_area_index_LAI_using_commercial_instruments_and_smartphone-based_systems
- CASTILLO, O.S., ZARAGOZA, E.M., ALVARADO, C.J., BARRERA, M.G. Y DASGUPTA-SCHUBERT, N. 2014. Foliar area measurement by a new technique that utilizes the conservative nature of fresh leaf surface density. En: arXiv: 1212.5761, *International Agrophysics*, vol. 28, no. 4, ISSN 2300-8725. DOI 10.2478/intag-2014-0032. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/1212.5761>



CHIANUCCI, F., PULETTI, N., GIACOMELLO, E., CUTINI, A. Y CORONA, P. 2015.

Estimation of leaf area index in isolated trees with digital photography and its application to urban forestry. *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 14, no. 2, ISSN 1618-8667. DOI 10.1016/j.ufug.2015.04.001. en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1618866715000412>

CONFALONIERI, R., FOI, M., CASA, R., AQUARO, S., TONA, E., PETERLE, M., BOLDINI, A., DE CARLI, G., FERRARI, A., FINOTTO, G., GUARNERI, T., MANZONI, V., MOVEDI, E., NISOLI, A., PALEARI, L., RADICI, I., SUARDI, M., VERONESI, D., BREGAGLIO, S., CAPPELLI, G., CHIODINI, M.E., DOMINONI, P., FRANCONI, C., FRASSO, N., STELLA, T. Y ACUTIS, M. 2013. Development of an app for estimating leaf area index using a smartphone. Trueness and precision determination and comparison with other indirect methods. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 96, ISSN 0168-1699. DOI 10.1016/j.compag.2013.04.019.

EASLON, H.M. Y BLOOM, A.J. 2014. Easy Leaf Area: Automated digital image analysis for rapid and accurate measurement of leaf area. *Applications in Plant Sciences*, vol. 2, no. 7, ISSN 2168-0450. DOI 10.3732/apps.1400033. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4103476/>

FERREIRA, O.G.L., ROSSI, F.D., VAZ, R.Z., FLUCK, A.C., COSTA, O. A. D. Y FARIAS, P.P. 2017. Determinação de área foliar por análise de imagens digitais. *Archivos de Zootecnia*, vol. 66, no. 256, ISSN 1885-4494. DOI 10.21071/az.v66i256.2777. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4103476/>

GARRIGUES, S., SHABANOV, N.V., SWANSON, K., MORISETTE, J.T., BARET, F. Y MYNENI, R.B. 2008. Intercomparison and sensitivity analysis of Leaf Area Index retrievals from LAI-2000, AccuPAR, and digital hemispherical photography over croplands. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 148, no. 8, ISSN 0168-1923. DOI 10.1016/j.agrformet.2008.02.014. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168192308000683>



- JONCKHEERE, I., FLECK, S., NACKAERTS, K., MUYS, B., COPPIN, P., WEISS, M. Y BARET, F. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 121, no. 1, ISSN 0168-1923. DOI 10.1016/j.agrformet.2003.08.027. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168192303001643>
- KAUFMAN, T.S. Y RÚVEDA, E.A. 2005. The Quest for Quinine: Those Who Won the Battles and Those Who Won the War. *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 44, no. 6, ISSN 1521-3773. DOI 10.1002/anie.200400663. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15669029/>
- KIRK, K., ANDERSEN, H.J., THOMSEN, A.G., JØRGENSEN, J.R. Y JØRGENSEN, R.N. 2009. Estimation of leaf area index in cereal crops using red-green images. *Biosystems Engineering*, vol. 104, no. 3, ISSN 1537-5110. DOI 10.1016/j.biosystemseng.2009.07.001. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511009002219>
- LEE, K.-J. Y LEE, B.-W. 2011. Estimating canopy cover from color digital camera image of rice field. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, vol. 14, no. 2, ISSN 2005-8276. DOI 10.1007/s12892-011-0029-z. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/226177969_Estimating_canopy_cover_from_color_digital_camera_image_of_rice_field
- LIU, J. Y PATTEY, E. 2010. Retrieval of leaf area index from top-of-canopy digital photography over agricultural crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 150, no. 11, ISSN 0168-1923. DOI 10.1016/j.agrformet.2010.08.002. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168192310002029>
- QU, Y., WANG, Z., SHANG, J., LIU, J. Y ZOU, J., 2021. Estimation of leaf area index using inclined smartphone camera. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 191, ISSN 0168-1699. DOI 10.1016/j.compag.2021.106514. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169921005317>



- RAHEEM, I.T., GOODMAN, S.N. Y JACOBSEN, E.N. 2004. Catalytic Asymmetric Total Syntheses of Quinine and Quinidine. *Journal of the American Chemical Society*, vol. 126, no. 3, ISSN 0002-7863. DOI 10.1021/ja039550y. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ja039550y>
- RINCÓN, N., OLARTE, M.A. Y PÉREZ, J.C. 2012. Determinación del Área Foliar en Fotografías Tomadas con una Cámara Web, un Teléfono Celular o una Cámara Semiprofesional. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, vol. 65, no. 1, ISSN 0304-2847. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1799/179924340010.pdf>
- STRACHAN, I. b., STEWART, D. W. Y PATTEY, E. 2005. Determination of Leaf Area Index in Agricultural Systems. *Micrometeorology in Agricultural Systems* [en línea]. S.l.: John Wiley & Sons, Ltd, pp. 179-198. [consulta: 13 febrero 2022]. ISBN 978-0-89118-268-9. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronmonogr47.c9>.
- SUÁREZ, J.C., MELGAREJO, L.M., DURÁN, E.H., DI RIENZO, J.A. Y CASANOVES, F. 2018. Non-destructive estimation of the leaf weight and leaf area in cacao (*Theobroma cacao* L.). *Scientia Horticulturae*, vol. 229, ISSN 0304-4238. DOI 10.1016/j.scienta.2017.10.034. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423817306490>
- SWART, E.A.M.D., GROENWOLD, R., KANNE, H.J., STAM, P., MARCELIS, L.F.M. Y VOORRIPS, R.E. 2004. Non-destructive estimation of leaf area for different plant ages and accessions of *Capsicum annum* L. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, vol. 79, no. 5, ISSN 1462-0316. DOI 10.1080/14620316.2004.11511840. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/40103791_Non-
- SYVERTSEN, J.P., GOÑI, C. Y OTERO, A. 2003. Fruit load and canopy shading affect leaf characteristics and net gas exchange of 'Spring' navel orange trees. *Tree Physiology*, vol. 23, no. 13, ISSN 0829-318X. DOI 10.1093/treephys/23.13.899. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14532013/>



TEACHER, A.G.F., GRIFFITHS, D.J., HODGSON, D.J. Y INGER, R. 2013. Smartphones in ecology and evolution: a guide for the app-rehensive. *Ecology and Evolution*, vol. 3, no. 16, ISSN 2045-7758. DOI 10.1002/ece3.888. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ece3.888>

THIMONIER, A., SEDIVY, I. Y SCHLEPPI, P. 2010. Estimating leaf area index in different types of mature forest stands in Switzerland: a comparison of methods. *European Journal of Forest Research*, vol. 129, no. 4, ISSN 1612-4677. DOI 10.1007/s10342-009-0353-8. Disponible en: <https://www.schleppi.ch/patrick/publi/pdf/atal10b.pdf>

WEISS, M., BARET, F., SMITH, G.J., JONCKHEERE, I. Y COPPIN, P. 2004. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination: Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 121, no. 1, ISSN 0168-1923. DOI 10.1016/j.agrformet.2003.08.001. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168192303001631>

YILMAZ, M.T., HUNT, E.R., GOINS, L.D., USTIN, S.L., VANDERBILT, V.C. Y JACKSON, T.J. 2008. Vegetation water content during SMEX04 from ground data and Landsat 5 Thematic Mapper imagery. *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, no. 2, ISSN 0034-4257. DOI 10.1016/j.rse.2007.03.029. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425707003021>

Conflictos de intereses:

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de los autores:

Los autores han participado en la redacción del trabajo y análisis de los documentos.





Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial
4.0 Internacional.

