



COMPARACIÓN DE MÉTODOS PARA MEDIR CARACTERÍSTICAS FOLIARES Y EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE CLOROFILA EN DIEZ ACCESIONES DE ROCOTO DEL BANCO DE GERMOPLASMA DEL INIA, PERU †

[COMPARISON OF METHODS FOR MEASURING LEAF CHARACTERISTICS AND EVALUATION OF CHLOROPHYLL CONTENT IN TEN ROCOTO PEPPER ACCESSIONS FROM THE INIA, PERU, GERMPLASM BANK]

Hans Dadther-Huaman\*, Andrea Delgado-Lazo and Gonzalo A. Pacheco-Lizarraga

Estación Experimental Agraria Arequipa. Dirección de Recursos Genéticos y Biotecnología. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Calle Saco Oliveros N. 402 - Cerro July, Arequipa, Arequipa 04011, Perú. Email: [hansdadtherhuaman@gmail.com](mailto:hansdadtherhuaman@gmail.com), [andradelgadolazo@gmail.com](mailto:andradelgadolazo@gmail.com), [gpacheco@inia.gob.pe](mailto:gpacheco@inia.gob.pe)  
\*Corresponding author

### SUMMARY

**Background:** The rocoto pepper (*Capsicum pubescens*), native to the Andes, is a species of great importance in Peru, both in agriculture and gastronomy, especially in the department of Arequipa. **Objective:** To compare the accuracy and relationship between the methods of measuring leaf area, length, width and perimeter using ImageJ software and the portable meter CI-202, as well as to evaluate the chlorophyll content with the SPAD 502 Plus in ten accessions of rocoto pepper. **Methodology:** Tests of normality and homogeneity of variances were carried out for the leaf and chlorophyll variables. Then, ANOVA and Tukey's test ( $p < 0.05$ ) were applied to compare accessions, in addition to a Pearson correlation analysis. To compare the leaf area measurements with ImageJ and CI-202 with the product of leaf length and leaf width, a linear regression model was used, in the same way leaf area and chlorophyll content were compared. **Results:** Accessions PER1002862 and PER1002844 showed the highest values in all parameters, while PER1002960 and PER1002949 had the lowest, except for chlorophyll, where PER1002821 recorded the lowest value. The CI-202 portable meter obtained a higher coefficient of determination ( $R^2=0.9919$ ) than ImageJ ( $R^2=0.984$ ) when comparing leaf area with the product of length and width. **Implications:** The study evaluates the accuracy of ImageJ and CI-202 in leaf measurement and its relationship with chlorophyll content in *C. pubescens*. **Conclusions:** Both methods, ImageJ and CI-202, were effective for leaf measurement; However, the CI-202 was more efficient due to its speed in data collection and processing. Chlorophyll content varied among accessions, without relation to leaf area. **Key words:** germplasm; rocoto pepper; accessions; biodiversity; Arequipa.

### RESUMEN

**Antecedentes:** El rocoto (*Capsicum pubescens*), originario de los Andes, es una especie de gran importancia en el Perú, tanto en la agricultura como en la gastronomía, especialmente en el departamento de Arequipa. **Objetivo:** Comparar la precisión y relación entre los métodos de medición del área, largo, ancho y perímetro foliar utilizando el software ImageJ y el medidor portátil CI-202, así como evaluar el contenido de clorofila con el SPAD 502 Plus en diez accesiones de rocoto. **Metodología:** Se realizaron pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas para las variables foliares y de clorofila. Luego, se aplicó ANOVA y la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ) para comparar accesiones, además de un análisis de correlación de Pearson. Para comparar las mediciones de área foliar con ImageJ y CI-202 con el producto del largo por el ancho foliar, se empleó un modelo de regresión lineal, de igual forma se comparó el área foliar y el contenido de clorofila. **Resultados:** Las accesiones PER1002862 y PER1002844 mostraron los mayores valores en todos los parámetros, mientras que PER1002960 y PER1002949 tuvieron los menores, excepto en clorofila, donde PER1002821 registró el valor más bajo. el medidor portátil CI-202 obtuvo mayor coeficiente de determinación ( $R^2=0.9919$ ) que ImageJ ( $R^2=0.984$ ) al comparar el área foliar con el producto del largo por el ancho. **Implicaciones:**

† Submitted February 17, 2025 – Accepted June 10, 2025. <http://doi.org/10.56369/isaes.6197>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = H. Dadther-Huaman: <https://orcid.org/0000-0001-7527-5410>; A. Delgado-Lazo: <https://orcid.org/0000-0001-9156-7923>; G. A. Pacheco-Lizarraga: <https://orcid.org/0000-0002-9329-2422>

El estudio evalúa la precisión de ImageJ y CI-202 en la medición foliar y su relación con el contenido de clorofila en *C. pubescens*. **Conclusiones:** Ambos métodos, ImageJ y CI-202, fueron eficaces para la medición foliar; sin embargo, el CI-202 fue más eficiente por su rapidez en la recolección y procesamiento de datos. El contenido de clorofila varió entre accesiones, sin relación con el área foliar.

**Palabras clave:** germoplasma; rocoto; accesiones; biodiversidad; Arequipa.

## INTRODUCCIÓN

El rocoto (*Capsicum pubescens* Ruiz & Pav.) es una especie de gran importancia en el Perú, especialmente valorada en la gastronomía local. A pesar de su relevancia, no se han definido claramente variedades o cultivares específicos para este cultivo (Hernández-Amasifuen *et al.*, 2022).

Originario de los Andes de Perú y Bolivia, el rocoto es conocido por diversos nombres, como "rocoto", "rocoto de huerta" y "manzano". En quechua se le denomina "rukutu", mientras que en aymara es llamado "luqutu" (García-Serquén *et al.*, 2022). Esta especie se distingue de otras del género *Capsicum* por sus características morfológicas particulares, como sus flores de color púrpura y semillas negras (García *et al.*, 2022).

La conservación de la biodiversidad, especialmente en el sector agrícola, es esencial en el Perú, un país ampliamente reconocido por albergar una gran concentración de especies y ecosistemas (Scott, 2011). En este contexto, el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) desempeña un papel clave en la preservación de los recursos genéticos agrícolas, administrando el principal banco de germoplasma del país. Actualmente, en la Estación Experimental Agraria Arequipa, el INIA resguarda 296 accesiones de germoplasma de rocoto (García-Serquén *et al.*, 2022), garantizando su conservación y uso en la investigación agrícola.

El medidor SPAD-502 es un dispositivo portátil ampliamente utilizado en investigación y agricultura para medir de manera rápida, precisa y no destructiva la concentración de clorofila en las hojas (Ling *et al.*, 2011). Su uso permite monitorear los niveles de nitrógeno y clorofila a lo largo del desarrollo del cultivo, lo que facilita un manejo nutricional más eficiente sin la necesidad de destruir las muestras y con resultados inmediatos. Debido a estas ventajas, se ha propuesto como una herramienta clave en metodologías rápidas y no destructivas para evaluar el estado nutricional de las plantas (Hurtado *et al.*, 2017).

ImageJ es un software de código abierto ampliamente utilizado para el procesamiento y análisis de imágenes digitales, especialmente en investigación agrícola (Rincón *et al.*, 2012). Ofrece una variedad de herramientas para la edición, procesamiento y análisis de imágenes en distintos formatos. Además, permite realizar mediciones geométricas, evaluar la densidad

de píxeles y llevar a cabo análisis volumétricos tridimensionales (De Laffitte *et al.*, 2018). Lo que lo convierte en una herramienta esencial en diversas disciplinas científicas; En términos generales, ImageJ es una herramienta fundamental para el análisis cuantitativo de imágenes en diversas áreas del conocimiento.

Diversas investigaciones han demostrado la eficacia del software de análisis de imágenes digitales, especialmente ImageJ, en la estimación del área foliar en diferentes especies vegetales. Zárate-Salazar *et al.* (2018) compararon ImageJ con Image-Pro PLUS y AFSOFT, sin encontrar diferencias significativas en la medición del área, largo y ancho de las hojas elípticas. De manera similar, Rincón *et al.* (2012) reportaron una alta correlación ( $r > 0.99$ ) entre las mediciones del área foliar obtenidas con cámaras digitales, incluidos teléfonos celulares, y aquellas realizadas con medidores especializados al analizar las imágenes en ImageJ en *Syngonium podophyllum* Schott., *Tradescantia zebrina* (Schiz) D.R. Hunt., *Malvaviscus arboreus* Cav., *Codiaeum variegatum* (L.) A. Juss y Citrus sp. L. Por otro lado, Lucena *et al.* (2018) emplearon exitosamente ImageJ para estimar el área foliar en *Urochloa mosambicensis* a partir de imágenes digitales, obteniendo una correlación de 0.9853 con el área foliar real y coeficiente de determinación del 99.98 % ( $R^2$ ).

El medidor portátil láser CI-202 ha sido empleado en la estimación del área foliar de (*Passiflora edulis* fo. *edulis*) mediante parámetros alométricos, demostrando su precisión en la construcción de modelos de regresión basados en el largo y ancho del foliolo (Jaime-Guerrero *et al.*, 2023). Además, diversos estudios han validado la viabilidad de estimar el área foliar a partir de mediciones alométricas, respaldando su aplicación en distintas especies vegetales (Gonçalves *et al.*, 2022, Tay y Ling, 2020). De manera similar, en frijol se ha comparado la medición del área foliar utilizando el medidor portátil láser CI-202 y el análisis de imágenes digitales, evaluando la relación entre ambos métodos a través del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el coeficiente de correlación ( $r$ ) y otros indicadores, encontrándose una correspondencia significativa entre ellos (Silva *et al.*, 2024).

De las 296 accesiones de rocoto (*Capsicum pubescens*) preservadas en el Banco de Germoplasma del INIA, se seleccionaron diez que, durante la campaña agrícola 2023-2024, destacaron por presentar los frutos de mayor masa y con una forma acampanulada. Estas

accesiones no han sido previamente evaluadas en cuanto a contenido de clorofila, área y perímetro foliar, lo que representa una oportunidad para profundizar en su caracterización morfológica. Considerando la importancia de la conservación de *C. pubescens* en el Perú, y en particular en el departamento de Arequipa, esta investigación tuvo como objetivo comparar diferentes métodos para la medición del área foliar, el largo, el ancho y el perímetro de la hoja utilizando el software ImageJ y el medidor portátil CI-202. Además, se evaluó el contenido de clorofila con el dispositivo SPAD 502 Plus en las diez accesiones seleccionadas. También se buscó desarrollar un modelo de regresión lineal que permita estimar el área foliar a partir de la multiplicación del largo y ancho de la hoja, facilitando así futuras evaluaciones en estudios de caracterización y conservación del rocoto.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en el Centro Experimental Santa Rita de la Estación Experimental Agraria Arequipa del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), ubicado en el distrito de Santa Rita de Siguan, provincia de Arequipa, departamento de Arequipa, Perú, a una altitud de 1296 m s.n.m., con coordenadas geográficas 16°28'19" Sur y 72°06'36" Oeste.

El distrito de Santa Rita de Siguan presenta un clima árido y templado, caracterizado por una deficiencia de humedad (Castro *et al.*, 2021). La recolección de datos se realizó entre el 7 y el 10 de enero de 2025, registrándose una temperatura media de 17.8 °C, una humedad relativa media de 75.3 %, y una radiación solar promedio de 580 W/m<sup>2</sup>, medida de 6:00 a.m. a 6:00 p.m. No se reportó precipitación durante el período de evaluación, según los datos meteorológicos proporcionados por la estación EEA Santa Rita del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

### Material genético y condiciones agronómicas

De las 296 accesiones de *C. pubescens* conservadas *ex situ* en el Banco de Germoplasma del INIA, en el Centro Experimental Santa Rita de la EEA Arequipa, se seleccionaron 10 accesiones que presentan características de interés agronómico para los agricultores, destacando por la forma acampanulada y la masa del fruto, atributos preferidos en el mercado.

Las accesiones fueron sembradas en mayo de 2024, con un distanciamiento entre plantas de 1.7 m y surcos de 1.8 m. El riego se realizó por goteo y todas las accesiones recibieron el mismo manejo fitosanitario y nutricional, con aplicación de NKP al suelo en dosis de

100-150-200. Las evaluaciones se llevaron a cabo cuando todas las plantas se encontraban en la etapa de floración-fructificación.

### Contenido de clorofila

Se evaluaron cinco plantas por accesión, seleccionándose dos hojas de cada una. En cada hoja se midió tres veces el contenido de clorofila en el tercio medio, a ambos lados del nervio central, obteniéndose un total de seis mediciones por planta. Esto permitió reunir 30 mediciones por accesión, a partir de las cuales se calculó el promedio correspondiente. Las mediciones se realizaron con el medidor de clorofila SPAD 502 Plus (Konica Minolta Optics®). La recolección de datos se llevó a cabo entre las 10:00 a.m. y 12:00 p.m., utilizando hojas sin daños físicos ni nutricionales, asegurando que las muestras fueran representativas del tercio medio de la planta.

### Software ImageJ y medidor portátil CI-202

Para la medición del área, largo, ancho y perímetro foliar, se utilizaron las mismas hojas previamente evaluadas para el contenido de clorofila, equivalentes a dos hojas por planta, lo que representa un total de 10 hojas por accesión. A partir de estas mediciones, se calculó el promedio para cada accesión. El análisis se realizó mediante el software de acceso abierto ImageJ v1.54g. Para ello, se capturaron imágenes de las hojas, las cuales fueron previamente aplanadas colocando cada una entre dos hojas de papel durante 30 minutos, con el fin de reducir su curvatura natural. Las fotografías se tomaron con una cámara Nikon D-5600, utilizando un fondo blanco y una regla colocada junto a las hojas como referencia de escala, lo que permitió calibrar adecuadamente el software y asegurar la homogeneidad en las mediciones. Las fotografías se tomaron entre las 12:00 p.m. y las 2:00 p.m., bajo luz solar difusa, sin iluminación artificial. La distancia entre la cámara y las hojas se mantuvo entre 30 cm y 40 cm. Adicionalmente, las mismas hojas fueron evaluadas con el medidor portátil de área foliar por láser CI-202 (CID Bio-Science™) durante el mismo intervalo de tiempo, lo que permitió la comparación entre ambos métodos de medición.

### Análisis de datos

Se realizó el test de normalidad de Shapiro-Wilk y el test de homogeneidad de varianzas de Bartlett para las variables contenido de clorofila, área, largo, ancho y perímetro foliar, con el fin de verificar los supuestos necesarios para aplicar un análisis de varianza (ANOVA). Como se cumplieron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, se aplicó el ANOVA para determinar si existían diferencias significativas entre las accesiones. Posteriormente, se empleó la prueba de comparaciones múltiples de

Tukey ( $p < 0.05$ ), la cual permite identificar entre qué grupos existen diferencias significativas, controlando el error tipo I asociado a múltiples comparaciones. Ambos análisis se realizaron utilizando el paquete agricolae del lenguaje de programación R. Además, se efectuó un análisis de correlación de Pearson con el paquete psych, para evaluar la relación lineal entre las variables cuantitativas. Cabe señalar que no se identificaron datos atípicos ni valores perdidos durante el análisis.

Para comparar las áreas, largos, anchos y perímetros foliares medidos con el software ImageJ y el medidor portátil CI-202, se utilizó un modelo de regresión lineal y se calculó su coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Asimismo, se desarrolló un modelo de regresión lineal en el cual X correspondió a la multiplicación del largo por el ancho y Y al área foliar calculada en cada uno de los métodos. De manera similar, se formuló un modelo de regresión lineal para el contenido de clorofila (X) y el área foliar medida con ambos métodos (Y). Todos los análisis estadísticos fueron realizados en el lenguaje de programación R, versión 4.4.2.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 presenta el área, perímetro, ancho y largo foliar, así como el contenido de clorofila, obtenidos mediante ImageJ y el medidor portátil CI-202, en diez accesiones.

### Área foliar

El PER1002844 obtuvo significativamente el mayor valor para el área foliar con ImageJ y CI-202, 23.32 cm<sup>2</sup> y 22.05 cm<sup>2</sup> respectivamente en comparación al resto de accesiones; seguido del PER1002862 con 17.62 cm<sup>2</sup> y 16.62 cm<sup>2</sup> para ImageJ y CI-202 respectivamente. Los menores valores los presentaron el PER1002960 con 10.4 cm<sup>2</sup> (ImageJ) y 10.72 cm<sup>2</sup> (CI-202) y el PER1002949 con 7.10 cm<sup>2</sup> (ImageJ) y 6.91 cm<sup>2</sup> (CI-202). Se puede observar que para la medición del área foliar las mediciones con ambos métodos presentaron valores similares tanto para los valores mayores como para los menores en diferentes accesiones, lo cual, indica que ambos métodos tienen relación. De igual forma, los PER1002844, PER1002862, PER1002890, PER1002821, PER1002991 y PER1002949 presentaron valores ligeramente mayores para el área foliar medida con ImageJ que con CI-202 (Tabla 1). Rincón *et al.* (2012) mencionaron de igual forma que observaron correlaciones significativas entre las mediciones de área foliar obtenidas a partir de las imágenes capturadas con cámaras digitales y las registradas mediante un medidor de área foliar; inclusive indicaron que las mejores correlaciones lo obtuvieron con cámara de celular y cámara web en comparación a

la cámara digital Sony Cyber shot DSCH50® y procesadas con ImageJ.

La medición del área foliar es un aspecto clave en la investigación agrícola y en estudios de fisiología vegetal (Enciso y Gómez, 2004). Para este propósito, se han desarrollado sistemas de alta precisión y sensibilidad, que incluyen escáneres conectados a computadoras y software especializado (Kolukisaoglu y Thurow, 2010). No obstante, el uso de programas de acceso libre, como ImageJ, ha permitido obtener resultados comparables a los de escáneres de alto costo. Sin embargo, una de sus principales limitaciones es el tiempo requerido para procesar las imágenes y determinar el área foliar.

### Perímetro foliar

El PER1002844 presentó significativamente el mayor valor para el perímetro foliar con ImageJ y CI-202, 22.43 cm y 19.36 cm respectivamente en comparación al resto de accesiones; seguido del PER1002862 con 19.85 cm y 17.07 cm para ImageJ y CI-202 respectivamente. Los menores valores los presentaron el PER1002960 con 14.77 cm (ImageJ) y 12.92 cm (CI-202) y el PER1002949 con 13.02 cm (ImageJ) y 11.37 cm (CI-202). Para la medición del perímetro foliar se aprecia que las mediciones de ambos métodos son similares, aunque no tan próximas como los valores obtenidos para el área foliar. En todas las accesiones los valores de ImageJ fueron superiores a los recopilados con CI-202 (Tabla 1). Se puede suponer que el cálculo del perímetro con ImageJ tiende a ser mayor, ya que el software detecta los bordes de la hoja mediante un algoritmo que segmenta la imagen en píxeles y los une mediante líneas rectas. Como resultado, el contorno se genera conectando píxeles adyacentes, lo que reemplaza las curvas suaves por segmentos rectos, incrementando así la distancia total del perímetro.

A pesar de que existen estudios que comparan imágenes procesadas con software y mediciones realizadas con dispositivos portátiles para el cálculo del área foliar (Silva *et al.*, 2024; Jaime-Guerrero *et al.*, 2023; Rincón *et al.*, 2012), no se ha encontrado información específica sobre esta comparación en relación con el perímetro, y en particular, en *C. pubescens*.

### Ancho foliar

El PER1002844 presentó significativamente el mayor valor para el ancho foliar con ImageJ y CI-202, 4.32 cm y 4.29 cm respectivamente en comparación al resto de accesiones; seguida del PER1002862 con 3.45 cm y 3.42 cm para ImageJ y CI-202 respectivamente. Los menores valores los presentaron el PER1002960 con 2.87 cm (ImageJ) y 2.96 cm (CI-202) y el PER1002949

con 2.03 cm (ImageJ) y 2.04 cm (CI-202). Se puede observar que para la medición del ancho foliar las mediciones con ambos métodos presentaron valores similares tanto para los valores mayores como para los menores en diferentes accesiones, lo cual, indica que ambos métodos tienen relación. El coeficiente de variación del ancho foliar fue del 17 % para ImageJ y del 16 % para CI-202 (Tabla 1), lo que indica una dispersión moderada según la clasificación de Ríos (2012). Este autor señala que valores inferiores al 10 % corresponden a datos homogéneos, mientras que aquellos entre 10 % y 20 % presentan una dispersión moderada, y valores superiores al 20 % reflejan una alta variabilidad. Esto sugiere que las accesiones evaluadas muestran variabilidad en el ancho de sus hojas.

La importancia de contar con muestras diversas radica en la posibilidad de generar modelos de regresión lineal más representativos, como lo destacan Jaime-Guerrero *et al.* (2023).

### Largo foliar

El PER1002844 presentó significativamente el mayor valor para el largo foliar con ImageJ y CI-202, 8.71 cm y 8.11 cm respectivamente en comparación al resto de accesiones; seguida del PER1002862 con 7.95 cm y 7.37 cm para ImageJ y CI-202 respectivamente. Los menores valores los presentaron el PER1002960 con 5.43 (ImageJ) cm y 5.25 cm (CI-202) y PER1002949 con 5.22 cm (ImageJ) y 4.99 cm (CI-202). Se puede observar que para la medición del largo foliar las mediciones con ambos métodos presentaron valores similares tanto para los valores mayores como para los menores en diferentes accesiones, lo cual, indica que ambos métodos tienen relación. En todas las

accesiones los valores de ImageJ son superiores a los recopilados con CI-202 (Tabla 1). Según Zárate-Salazar *et al.* (2018), la medición del largo foliar no muestra diferencias significativas al utilizar distintos softwares, como ImageJ e Image-Pro® PLUS. Además, destacan que ImageJ es un software de licencia gratuita, completo y fácil de usar, que automatiza la medición de las dimensiones foliares y facilita la generación de modelos alométricos.

Sin embargo, al comparar ImageJ con el medidor portátil CI-202, se determinó que este último permite realizar las mediciones con mayor rapidez. De manera similar, Tay y Ling (2020) resaltan la importancia del cálculo del largo foliar para la generación de modelos de regresión lineal, los cuales son fundamentales para estimar el área foliar.

Cabe destacar que la elección de un software depende en gran medida de la formación del usuario y del propósito del análisis, ya sea con fines académicos o de investigación (De Sousa y Da Silva, 2000).

### Contenido de clorofila

El PER1002862 presentó significativamente el mayor valor con 100.09 unidades SPAD, seguido del PER1002844 con 105.66 unidades SPAD. Los menores valores los presentaron las accesiones PER1002949 con 65.44 unidades SPAD y PER1002821 con 53.10 unidades SPAD (Tabla 1). Se observó una diferencia en las unidades SPAD entre las distintas accesiones, a pesar que las mediciones se realizaron en un periodo corto de cuatro días, en las mismas horas y en las mismas partes de hojas sanas. Además, no se registraron precipitaciones durante la evaluación. La radiación promedio diaria entre el 7 y

**Tabla 1. Promedios del área, perímetro, ancho y largo foliar obtenidos con el software ImageJ y el medidor portátil CI-202, y contenido de clorofila medido con el SPAD-502 Plus en diez accesiones de *Capsicum pubescens* del Banco de Germoplasma del INIA, Arequipa, Perú.**

Accesión	Área foliar		Perímetro		Ancho foliar		Largo foliar		Clorofila									
	IJ	CI	IJ	CI	IJ	CI	IJ	CI	SPAD									
PER1002949	7.10	e	6.91	d	13.02	e	11.37	e	2.03	c	2.04	c	5.22	f	4.99	e	65.44	ef
PER1002960	10.40	de	10.72	cd	14.77	de	12.92	de	2.87	b	2.96	b	5.43	ef	5.25	de	77.74	cde
PER1002983	11.77	cde	11.78	c	15.64	cde	13.72	cde	3.03	b	3.04	b	5.83	def	5.65	cde	99.75	ab
PER1002991	13.88	bcd	13.83	bc	17.15	bcd	15.11	bcd	3.17	b	3.24	b	6.59	cde	6.37	bcd	75.12	de
PER1002821	15.16	bc	14.33	bc	18.41	bc	15.72	bc	3.41	b	3.3	b	7.11	bc	6.64	bc	53.10	f
PER1003084	11.94	cd	12.19	bc	16.51	cd	14.33	bcd	3.01	b	3.13	b	6.42	cdef	6.01	cde	95.58	abc
PER1003086	11.23	cde	11.36	cd	15.67	cde	13.62	cde	2.91	b	2.99	b	5.89	cdef	5.67	cde	67.31	ef
PER1002844	23.32	a	22.05	a	22.43	a	19.36	a	4.32	a	4.29	a	8.71	a	8.11	a	105.66	ab
PER1002862	17.62	b	16.62	b	19.85	ab	17.07	ab	3.45	b	3.42	b	7.95	ab	7.37	ab	110.09	a
PER1002890	15.02	bcd	14.12	bc	17.71	bcd	15.33	bcd	3.43	b	3.34	b	6.9	bcd	6.45	bcd	89.87	bcd
promedio	13.74		13.39		17.12		14.85		3.16		3.17		6.60		6.25		83.97	
$\sigma$	4.23		3.80		2.54		2.13		0.55		0.52		1.05		0.91		18.06	
CV%	31%		28%		15%		14%		17%		16%		16%		15%		22%	

IJ: medido con software ImageJ; CI: medido con scanner CI-202; SPAD: contenido de clorofila en unidades SPAD medido con SPAD-502 plus;  $\sigma$ : desviación estándar; CV%: coeficiente de variación en porcentaje. Los valores que no comparten una misma letra son significativamente diferentes entre sí, según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

el 10 de enero, de 10:00 a.m. a 12:00 p.m., fue de 963 W/m<sup>2</sup>, 996 W/m<sup>2</sup>, 991 W/m<sup>2</sup> y 987 W/m<sup>2</sup>, respectivamente, con un coeficiente de variación del 1 %, lo que indica una radiación homogénea en esos días.

Hurtado *et al.* (2017) mencionan la existencia de una correlación entre las unidades SPAD, la concentración de clorofila y el contenido de nitrógeno en tomate, mientras que Hidema *et al.* (1992) y Piekielek y Fox (1992) reportan hallazgos similares en gramíneas. Asimismo, Padilla *et al.* (2014) destacan la importancia del SPAD-502 para el monitoreo del contenido de clorofila en diferentes periodos fenológicos.

En este sentido, las accesiones que presentaron mayores unidades SPAD podrían tener un mayor contenido de clorofila. Cabe resaltar que las mediciones se realizaron en el mismo período fenológico para evitar sesgos, en concordancia con lo señalado por Rodríguez *et al.* (1998), quienes indican que las unidades SPAD varían según la fisiología y fenología del cultivo, lo que influye en la coloración de las hojas.

El uso del colorímetro SPAD permite obtener información de manera rápida y no destructiva, como lo mencionan Hurtado *et al.* (2017) y Ling *et al.* (2011).

### Correlación

La correlación (Tabla 2) nos demuestra que todos los parámetros evaluados a excepción del contenido de clorofila medido en unidades SPAD tienen una alta correlación significativa de Pearson, lo que afirma la alta relación que existe para la medición del área, perímetro, ancho y largo foliar entre los métodos de evaluación de ImageJ y CI-202 para *C. pubescens* para

las diez accesiones evaluadas pertenecientes al Banco de Germoplasma del INIA. Lo cual, expresa que a mayor área foliar no importando el método de evaluación mayor es el perímetro, ancho y largo; y que el contenido de clorofila expresado en unidades SPAD no está relacionado a los parámetros alométricos de las hojas.

Silva *et al.* (2024) reportaron un coeficiente de correlación de  $r = 0.9595$  al comparar las mediciones de área foliar en frijol obtenidas con ImageJ y CI-202. En el caso de *C. pubescens*, se obtuvo un coeficiente de correlación superior ( $r = 0.9962$ ).

Por otro lado, Jaime-Guerrero *et al.* (2023) encontraron una correlación de  $r = 0.9543$  entre el largo y el área foliar de *Passiflora edulis* fo. *edulis* utilizando el CI-202, valor inferior al obtenido en *C. pubescens* para los mismos parámetros ( $r = 0.9721$ ). Del mismo modo, estos autores reportaron una correlación de  $r = 0.9740$  entre el largo y el área foliar de *P. edulis* fo. *edulis* medidas con el software Easy Leaf, resultado ligeramente superior al obtenido en *C. pubescens* con ImageJ ( $r = 0.9729$ ).

Las mediciones de área foliar son fundamentales en la investigación de fisiología vegetal y agricultura, ya que están estrechamente relacionadas con diversos procesos agronómicos, biológicos y fisiológicos, como el análisis de crecimiento, la fotosíntesis, la transpiración y la intercepción de luz (Broadhead *et al.*, 2003; Kucharik *et al.*, 1998). Asimismo, el área foliar se vincula con el crecimiento vegetal, la estimación del rendimiento agronómico y el cálculo de la eficiencia en el uso de la radiación solar, como lo han demostrado diversos estudios en el campo de las ciencias agrarias y biológicas (Sonntag *et al.*, 2008). De acuerdo con Campostrini y Yamanishi (2001), el área foliar total, directamente relacionada con la cantidad de clorofila,

**Tabla 2. Correlación Pearson del área, perímetro, ancho y largo foliar obtenidos con el software ImageJ y el medidor portátil CI-202, y contenido de clorofila medido con el SPAD-502 Plus en diez accesiones de *Capsicum pubescens* del Banco de Germoplasma del INIA, Arequipa, Perú.**

	AFIJ	AFCI	PIJ	PCI	AIJ	ACI	LIJ	LCI
AFCI	1.00***	1.00						
PIJ	0.99***	0.99***	1.00					
PCI	0.99***	0.99***	1.00***	1.00				
AIJ	0.97***	0.98***	0.96***	0.96***	1.00			
ACI	0.95***	0.97***	0.94***	0.95***	0.99***	1.00		
LIJ	0.97***	0.96***	0.99***	0.98***	0.91***	0.88***	1.00	
LCI	0.98***	0.97***	0.99***	0.99***	0.92***	0.90***	1.00***	1.00
CC	0.53	0.55	0.51	0.53	0.50	0.53	0.51	0.52

AFIJ: área foliar medido con ImageJ; AFCI: área foliar medido con CI-202; PIJ: perímetro foliar medido con ImageJ; PCI: perímetro foliar medido con CI-202; AIJ: ancho foliar medido con ImageJ; ACI: ancho foliar medido con CI-202; LIJ: largo foliar medido con ImageJ; LCI: largo foliar medido con CI-202; CC: contenido de clorofila en unidades SPAD medido con SPAD-502 plus; \*\*\*: coeficiente altamente significativo ( $p < 0.01$ ).

es un parámetro clave para estimar la capacidad de una planta para sintetizar materia seca. No obstante, en el caso de *C. pubescens*, no se ha encontrado una relación consistente entre el contenido de clorofila y los parámetros alométricos de las hojas.

Sería de gran interés realizar mediciones con el medidor SPAD-502 en diferentes etapas fenológicas del cultivo, con el fin de determinar posibles variaciones en el contenido de clorofila, tal como lo señalan Rodríguez *et al.* (1998), quienes indican que estos valores pueden fluctuar de acuerdo con el estado fisiológico y fenológico de la planta.

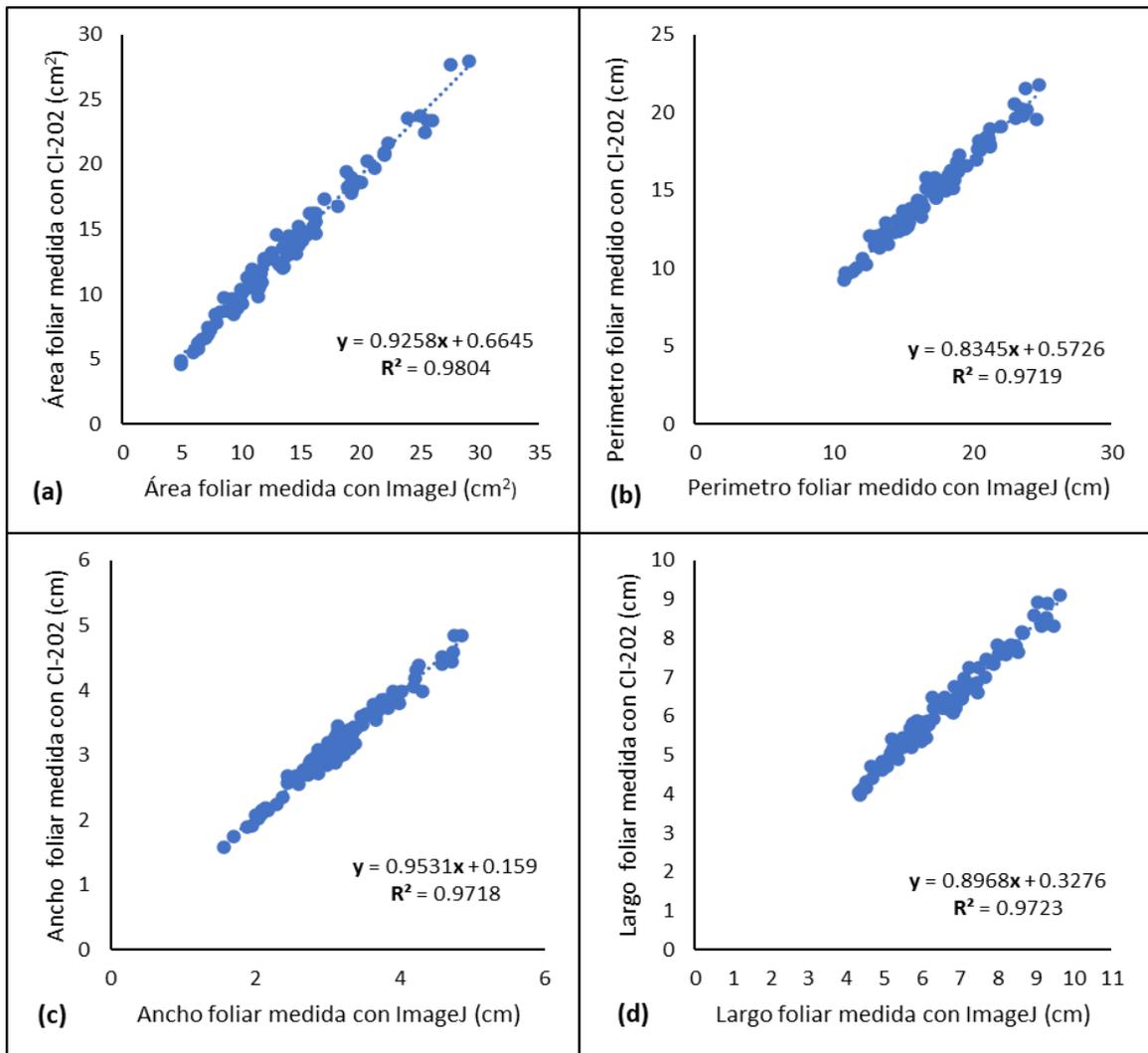
### Modelos de regresión lineal

La Figura 1 muestra la comparación del área, perímetro, ancho y largo foliar medidos con CI-202 e ImageJ. El coeficiente de determinación para el área foliar fue alto ( $R^2 = 0.9804$ ) (Figura 1a), lo que indica

una fuerte relación entre ambos métodos de evaluación, en concordancia con los resultados de Silva *et al.* (2024), quienes reportaron un  $R^2 = 0.9862$  al comparar el área foliar obtenida con CI-202 e imágenes digitales.

Para el perímetro foliar, el coeficiente de determinación también fue elevado ( $R^2 = 0.9719$ ) (Figura 1b). Aunque diversos estudios han reportado correlaciones lineales en la estimación del área foliar utilizando imágenes y medidores portátiles (Silva *et al.*, 2024, Jaime-Guerrero *et al.*, 2023, Rincón *et al.*, 2012), no se encontraron referencias específicas sobre la relación entre el perímetro foliar obtenido con estos métodos.

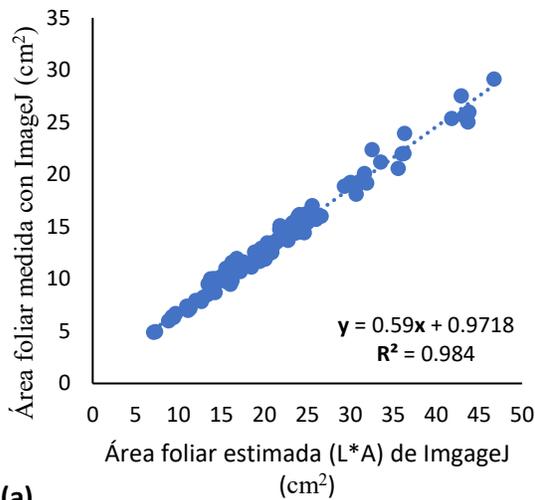
Asimismo, los coeficientes de determinación para el ancho y largo foliar fueron altos ( $R^2 = 0.9718$  y  $R^2 = 0.9723$ , respectivamente) al comparar las mediciones obtenidas con CI-202 e ImageJ (Figura 1c y 1d).



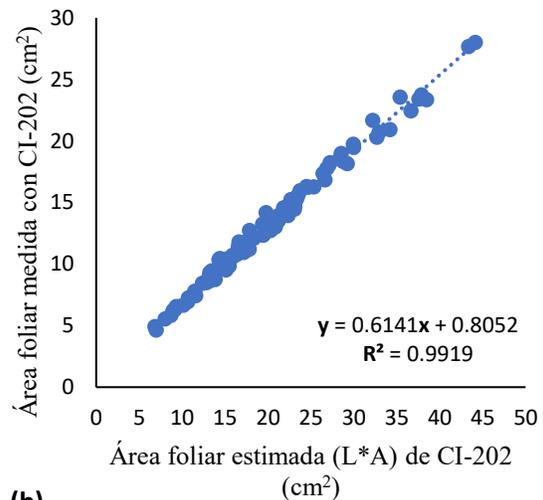
**Figura 1.** Comparación del área, perímetro, ancho y largo foliar medidos con CI-202 e ImageJ en diez accesiones de *Capsicum pubescens* del Banco de Germoplasma del INIA, Arequipa, Perú.  $R^2$  = coeficiente de determinación.

La Figura 2a expresa el modelo de regresión cuando Y es igual al área foliar medida con ImageJ y X es la variable independiente, área foliar estimada, calculada a través de la multiplicación del largo por el ancho (L\*A), de igual manera, con ImageJ. Los resultados demuestran que es una regresión lineal positiva en la cual el coeficiente de determinación es alto ( $R^2 = 0.984$ ). La Figura 2b muestra el modelo de regresión cuando Y es igual al área foliar medida con CI-202 y X, área foliar estimada, es la multiplicación del largo por el ancho (L\*A) a partir del escáner CI-202; se obtuvo un coeficiente de determinación alto ( $R^2 = 0.9919$ ). Esto nos demuestra que ambos métodos de evaluación, ImageJ y CI-202, permiten estimar el área foliar a través del largo y ancho, obteniendo altos coeficientes de determinación, debido a que este

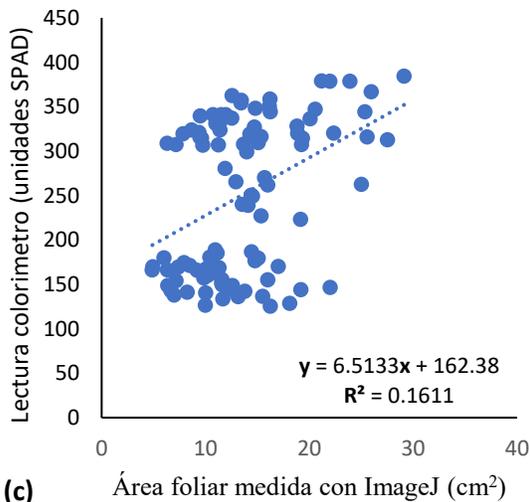
coeficiente mide qué porcentaje de la variabilidad de la variable dependiente (Y) es explicado por el modelo de regresión. Diversos autores han señalado que la precisión de la ecuación de regresión y del coeficiente de determinación es mayor cuando se emplea la multiplicación del largo por el ancho como variable independiente para estimar el área foliar por ejemplo Jaime-Guerrero *et al.* (2023) reportaron este método en *Passiflora edulis* fo. *edulis* ( $R^2 = 0.9377 - 0.9431$ ), Cabezas-Gutiérrez *et al.* (2009) en especies forestales ( $R^2 = 0.955 - 0.971$ ) y Cittadini y Peri (2006) en cerezas ( $R^2 = 0.994$ ), demostrando una alta precisión. Además, Tay y Ling (2020) mencionan que las plantas con hojas de forma elíptica son más propensas a desarrollar modelos de regresión lineal altamente eficientes. Como ocurre en *C. pubescens*.



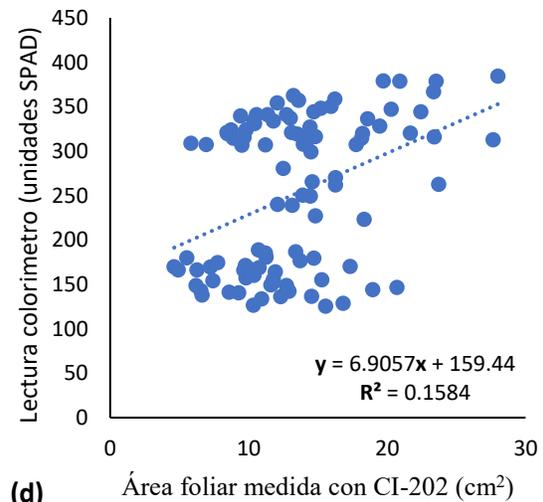
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 2.** (a): Comparación del área foliar medida con ImageJ y el área foliar estimada a partir de la multiplicación del largo por el ancho(L\*A); (b): Comparación del área foliar medida con CI-202 y el área foliar estimada a partir de la multiplicación del largo por el ancho(L\*A); (c): comparación de la lectura del colorímetro en unidades SPAD y el área foliar medida con ImageJ; (d): comparación de la lectura del colorímetro en unidades SPAD y el área foliar medida con CI-202. En diez accesiones de *C. pubescens* del Banco de Germoplasma del INIA, Arequipa, Perú.  $R^2$  = coeficiente de determinación.

En este estudio, la estimación del área foliar mostró un mayor coeficiente de determinación al utilizar el medidor portátil CI-202 en comparación con el software ImageJ. El CI-202 permite obtener datos de manera más rápida y eficiente, ya que en un solo escaneo proporciona el largo, ancho, perímetro y área foliar de la hoja. Por otro lado, aunque ImageJ representa una alternativa de bajo costo, requiere un procesamiento adicional que incluye transferir las imágenes a una computadora, escalar la imagen y calcular las medidas alométricas, lo que incrementa el tiempo de análisis.

La Figura 2c muestra la regresión lineal cuando Y es igual a las unidades SPAD medidas con el colorímetro SPAD 502 Plus y X es el área foliar medida con ImageJ, donde se obtuvo como resultado que el coeficiente de determinación es bajo ( $R^2=0.1611$ ), de igual manera, la Figura 2d expresa la regresión lineal cuando Y es igual a las unidades SPAD medidas con el colorímetro SPAD 502 Plus y X es el área foliar medida con CI-202, y se determinó que el coeficiente de determinación es bajo ( $R^2=0.1584$ ). Esto nos indica que no existe una relación entre el tamaño de hoja y las unidades SPAD.

### CONCLUSIONES

Ambos métodos de medición del área, largo, ancho y perímetro foliar, ImageJ y CI-202, son eficaces en la obtención de información alométrica en todas las accesiones de *C. pubescens*. Sin embargo, el medidor portátil CI-202 fue más eficiente debido al menor tiempo necesario para la recolección de información y procesamiento. Además, el modelo de regresión lineal para el área foliar calculado a partir de la multiplicación del largo por el ancho (X) con mayor coeficiente de determinación lo presentó el medidor portátil CI-202 ( $R^2=0.9919$ ).

El contenido de clorofila varía según las accesiones. De igual manera, no existe una relación entre el área foliar y el contenido de clorofila medido con el colorímetro SPAD 502 Plus.

#### Agradecimientos

A la ingeniera agrónoma Mari Hilari Hilari por su valioso apoyo en la recolección de datos en campo.

**Funding.** Nothing to declare.

**Conflict of interest statement.** There is no conflict of interest.

**Compliance with ethical standards.** Does not apply.

**Data availability.** Data available from the author upon reasonable request.

**Author contribution statement (CRediT).** **H. Dadther-Huaman** – Conceptualization, Investigation, Methodology, Project administration, Supervision, Writing–review & editing. **A. Delgado-Lazo** – Data curation, Visualization, writing–review & editing. **G. A. Pachecho-Lizarraga** – Investigation, Formal Analysis, Methodology, Writing–review & editing.

### REFERENCES

- Broadhead, J.S., Muxworthy, A.R., Ong, C.K. and Black, C.R., 2003. Comparison of methods for determining leaf area in tree rows. *Agricultural and Forest Meteorology*, 115, pp, 151-161. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00212-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00212-5)
- Cabezas-Gutiérrez, M., Peña, F., Duarte, H.W., Colorado, J.F. and Lora S., R., 2009. Un modelo para la estimación del área foliar en tres especies forestales de forma no destructiva. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 12(1), pp, 121-130. <https://doi.org/10.31910/rudca.v12.n1.2009.648>
- Campostrini, E. and Yamanishi, O.K., 2001. Estimativa da área foliar do mamoeiro utilizando o comprimento da nervadura central. *Scientia Agrícola (Brasil)*. 58(1), pp, 39-42. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162001000100007>
- Castro, A., Dávila, C., Laura, W., Cubas, F., Ávalos, G., López O., C., Villena, D., Valdez, M., Urbiola, J., Trebejo, I., Menis, L. and Marín, D., 2021. *Climas del Perú: mapa de clasificación climática nacional*. Lima, SENAMHI. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01404SENA-4.pdf>
- Cittadini, E.D. and Peri, P.L., 2006. Estimation of leaf area in sweet cherry using a non-destructive method. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 35(1), pp, 143-150. <https://www.redalyc.org/pdf/864/86435110.pdf>
- De Laffitte A., M.V.S., Bordão, D.M., Gonçalves, A.B. de M. and Da Costa, F.F., 2018. A utilização do software ImageJ no processamento de imagens tomográficas. *Revista Saber Digital*, 11(2), pp, 50-59. <https://revistas.faa.edu.br/SaberDigital/article/view/622>
- De Sousa, M.H. and Da Silva, N.N., 2000. Comparação de softwares para análise de

- datos de levantamientos complejos. *Revista de Saúde Pública*, 34(6), pp, 646-653. <https://doi.org/10.1590/S0034-8910200000600013>
- Enciso, B.E. and Gómez, C., 2004. Comparación de las respuestas de cuatro cultivares de mora (*Rubus* sp.) a las variaciones del factor luz. *Agronomía Colombiana*, 22(1), pp, 46-52. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180317823007>
- García G., C.A., Ramírez L., S.B. and Solano M., L.O., 2022. Caracterización floral del género *Capsicum* spp, en el Ecuador. *Conference Proceedings UTMACH V*, 6(1), pp, 26-36. <http://dx.doi.org/10.48190/cp.v6n1a3>
- García-Serquén, A., Amasifuen, C., Valdez, I., Quispe, F., Medina, C., Hinostroza, L., Vilchez, D., García, P., Pacheco, G. and Medina, J., 2022. *Catálogo de Rocoto del Banco de Germoplasma del INIA*. Lima, Instituto Nacional de Innovación Agraria. <https://hdl.handle.net/20.500.12955/1672>
- Gonçalves, M.P., Ribeiro, R.V. and Amorim, L., 2022. Non-destructive models for estimating leaf area of guava cultivars. *Bragantia*, 81, pp, 1-10. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20210342>
- Hernández-Amasifuen, A.D., Pineda-Lázaro, A.J. and Díaz-Pillasca, H.B., 2022. In vitro anther culture of rocoto (*Capsicum pubescens* Ruiz & Pav.). *Idesia (Arica)*, 40(1), pp, 115-121. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292022000100115>
- Hidema, J., Makino, A., Kurita, Y., Mae, T. and Ojima, K., 1992. Changes in the Levels of Chlorophyll and Light-Harvesting Chlorophyll a/b Protein of PS II in Rice Leaves Aged under Different Irradiances from Full Expansion through Senescence. *Plant and Cell Physiology*, 33(8), pp, 1209-1214. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a078375>
- Hurtado, E., González-Vallejos, F., Roper, C., Bastías, E. and Mazuela, P., 2017. Propuesta para la determinación del contenido de clorofila en hojas de tomate. *Idesia (Arica)*, 35(4), pp, 129-130. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292017000400129>
- Jaime-Guerrero, M., Álvarez-Herrera, J.G. and Camacho-Tamayo, J.H., 2023. Modelo no destructivo para estimar el área foliar individual mediante parámetros alométricos en gulupa (*Passiflora edulis* fo. *edulis*). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 26(2), pp, e2356. <https://doi.org/10.31910/rudca.v26.n2.2023.2356>
- Kolukisaoglu, Ü. and Thurow, K., 2010. Future and frontiers of automated screening in plant sciences. *Plant Science*, 178(6), pp, 476-484. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.03.006>
- Kucharik, CH.J., Norman, J.M. and Gower, S.T., 1998. Measurements of branch area and adjusting leaf area index to indirect measurements. *Agric. Forest Meteorol.* 91, pp, 69-88. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(98\)00064-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00064-1)
- Ling, Q., Huang, W. and Jarvis, P., 2011. Use of a SPAD-502 meter to measure leaf chlorophyll concentration in *Arabidopsis thaliana*. *Photosynthesis research*, 107, pp, 209-214. <https://doi.org/10.1007/s11120-010-9606-0>
- Lucena, L.R.R., Leite, M.L.M.V., Cruz, M.G. and De Sá Júnior, E.H., 2018. Estimativa da área foliar em *Urochloa mosambicensis* por dimensões foliares e imagens digitais. *Archivos de Zootecnia*, 67(259), pp, 408-413. <https://doi.org/10.21071/az.v67i259.3798>
- Padilla, F.M., Peña-Fleitas, M.T., Gallardo, M. and Thompson, R.B., 2014. Threshold values of canopy reflectance indices and chlorophyll meter readings for optimal nitrogen nutrition of tomato. *Annals of Applied Biology*, 166 (2), pp, 271-285. <https://doi.org/10.1111/aab.12181>
- Piekielek, W.P. and Fox, R.H., 1992. Use of a chlorophyll meter to predict nitrogen requirements for maize. *Agronomy Journal*, 84(1), pp, 59-65. <https://doi.org/10.2134/agronj1992.00021962008400010013x>
- Rincón G., N., Olarte Q., M.A. and Pérez N., 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*, 65 (1), pp, 6399-6405.

- <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179924340010>
- Ríos V., C., 2012. *Estadística y diseño de experimentos*. Lima, Universitaria de la Universidad Nacional de Ingeniería. [https://ww2.fondoeditorial.uni.edu.pe/3cera/edi\\_6\\_Libro\\_Estadistica\\_y\\_diseno\\_de\\_experimentos.pdf](https://ww2.fondoeditorial.uni.edu.pe/3cera/edi_6_Libro_Estadistica_y_diseno_de_experimentos.pdf)
- Rodríguez M., D.L.N., Alcántar G., G., Aguilar S, A., Etchevers B., J.D. and Santizó R., J. A., 1998. Estimación de la concentración de nitrógeno y clorofila en tomate mediante un medidor portátil de clorofila. *Terra*, 16 (2), pp, 135-141. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57316204.pdf>
- Scott, G., 2011. Plants, people, and the conservation of biodiversity of potatoes in Peru. *Natureza & Conservação*, 9(1), pp, 21-38. <https://dx.doi.org/10.4322/natcon.2011.003>
- Silva, J.S. e, de Melo F.R., Ferreira, C.R., de Oliveira, S.D., and De Moraes, M.J., 2024. Identificação da área foliar do feijoeiro por meio de técnicas de processamento digital de imagens. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, 22(12), pp, 1-12. <https://doi.org/10.55905/oelv22n12-067>
- Sonnentag, O., Talbot, J., Chen, J.M. and Roulet, N.T., 2008. Using direct and indirect measurements of leaf area index to characterize the shrub canopy in an ombrotrophic peatland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144, pp, 200-212. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.03.001>
- Tay, A.C. and Ling, J.Z.L., 2020. Estimation of individual leaf area by leaf dimension using a linear regression for various tropical plant species. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 943(1), pp, 1-5. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/943/1/012066>
- Zárate-Salazar, J.R., Santos, M.N., Santos B., J.N. and Isla L., F., 2018. Comparação de softwares de análise de imagem para a determinação da área foliar. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 3(1), pp, 24-32. <https://revistabrasileirademeioambiente.com/index.php/RVBMA/article/view/44>