

Modelo no destructivo para estimar el área foliar individual mediante parámetros alométricos en gulupa (*Passiflora edulis* fo. *edulis*)

Non-destructive model to estimate the individual foliar area by allometric parameters in gulupa (*Passiflora edulis* fo. *edulis*)

Marilcen Jaime-Guerrero¹ ; Javier Giovanni Álvarez-Herrera^{2*} ; Jesús Hernán Camacho-Tamayo³ 

¹Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Grupo de Investigaciones Agrícolas - GIA. Tunja - Boyacá, Colombia; e-mail: marilcen.jaime@uptc.edu.co

²Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Grupo de Investigaciones Agrícolas (GIA). Tunja - Boyacá, Colombia; e-mail: javier.alvarez@uptc.edu.co

³Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Facultad de Ingeniería. Bogotá D.C., Colombia; e-mail: jhcamachot@unal.edu.co.

*autor de correspondencia: javier.alvarez@uptc.edu.co

Cómo citar: Jaime-Guerrero, M.; Álvarez-Herrera, J.G.; Camacho-Tamayo, J.H. 2023. Modelo no destructivo para estimar el área foliar individual mediante parámetros alométricos en gulupa (*Passiflora edulis* fo. *edulis*). Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 26(1):e2356. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n2.2023.2356>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: marzo 3 de 2023

Aceptado: julio 25 de 2023

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

La gulupa es uno de los frutos que ha aumentado sus exportaciones desde Colombia en los últimos 15 años, debido a sus características organolépticas. Conocer el área foliar (AF) en este cultivo es importante; sin embargo, no se conocen métodos prácticos que permitan su cálculo. El objetivo fue desarrollar modelos no destructivos para estimar el AF individual, mediante parámetros alométricos en hojas de gulupa. El AF se determinó en 100 hojas, mediante dos métodos estándar: el medidor portátil láser CI-202 y el software Easy Leaf Area (ELA). Se midió la longitud del lóbulo central (L), el lóbulo derecho (LD) e izquierdo (LI), el ancho base en los lóbulos (a) y el ancho entre las puntas terminales de los lóbulos (b) y se calculó la longitud total (Lt), como la suma de L+LD+LI. Los modelos lineales con mayor coeficiente de determinación (R^2) fueron los que relacionaron las variables L^*a (0,9377; 0,9756) y Lt^*a (0,9430; 0,9841), para el AF, medida con el CI-202 y con el ELA respectivamente, frente al AF estimada. Se validaron R^2 de 0,9336 y 0,9612, entre el área de la hoja medida en la localidad de Arcabuco y la estimada con L^*a para los dos métodos empleados, mientras que para la estimación del AF con base en Lt^*a , se encontraron R^2 de 0,9552 y 0,9680, lo que convierte al método ELA como el más confiable para medir el AF y que la variable alométrica Lt^*a permite encontrar la mejor predicción de AF individual en hojas de gulupa.

Palabras clave: Alometría; Desarrollo vegetal; Modelo matemático; Método no destructivo; Passifloraceae.

ABSTRACT

Gulupa is one fruit that has increased its exports from Colombia in the last 15 years due to its organoleptic characteristics. Knowing the leaf area (LA) in the gulupa crop is relevant, however there are no known practical methods that allow its calculation. The objective was to develop non-destructive models to estimate the individual LA through allometric parameters in gulupa leaves. The LA was determined in 100 leaves, using two standard methods: the laser portable meter CI-202 and the Easy Leaf Area software (ELA). The length of the central lobe (L), the right lobe (LD) and left (LI), and the width of the base of the lobes (a), and between the terminal tips of the lobes (b) were measured, and the total length (Lt) was calculated, as the sum of L+LD+LI. The linear models with the highest determination coefficient (R^2) were the ones that related the variables L^*a (0.9377; 0.9756) and Lt^*a (0.9430; 0.9841) for the measurement of the LA with the CI-202 and the ELA respectively, and according to the estimated AF. The R^2 of 0.9336 and 0.9612 were validated, between the area of the leaf measured in Arcabuco and the estimated with L^*a for the two methods used, while for the estimation of LA based on Lt^*a for the two methods employed were found R^2 of 0.9552 and 0.9680, which makes the ELA method the most reliable to measure AF and that the allometric variable Lt^*a allows obtain the best prediction of individual AF in gulupa leaves.

Keywords: Allometry; Mathematical model; Nondestructive method; Plant development; Passifloraceae.

INTRODUCCIÓN

La gulupa (*Passiflora edulis* fo. *edulis*) es un frutal promisorio, también conocido en Colombia como el fruto púrpura de la pasión o purple passion fruit, chulupa morada o maracuyá morado (De Armas Acosta *et al.* 2022) que, según Jiménez *et al.* (2012) es una planta perenne, semileñosa con crecimiento indeterminado y sus hojas son alternas, trilobuladas y glabras. Este frutal es de gran importancia económica, debido a sus propiedades organolépticas y contenido nutricional, como el hierro y vitaminas A, B y C (Jiménez *et al.* 2012). De las exportaciones de frutos que Colombia hace hacia Europa, la gulupa ocupa el tercer lugar después del banano y la uchuva, con volúmenes que aumentaron en un 32 %, del 2017 al 2018, en el cual, se registraron producciones de 276.847 t (MADR, 2021) y rendimientos de 16,55 t ha⁻¹, en donde el departamento de Antioquia concentra la producción con 13.161 t (Rodríguez-Polanco *et al.* 2022), seguido de Huila, Valle del Cauca y Boyacá (MADR, 2021).

El cultivo de gulupa alcanza los mayores valores de producción y calidad entre los 1.000 y 2.000 m s.n.m.; no obstante, se puede sembrar entre los 1.600 a 2.300 m s.n.m., con temperaturas que varían entre 15 y 22 °C, en el día y de 12 a 14 °C, en la noche (Fischer & Miranda, 2021). Asimismo, requiere de suministros hídricos de 900 a 1.200 mm por año, distribuidos de manera uniforme y radiaciones que no superen los 1.000 μmol de fotones m² s⁻¹, lo que favorece el rendimiento (Miranda *et al.* 2009). Además, Paull & Duarte (2012) mencionan que valores de potencial hídrico en el suelo que sean menores a -1,3 MPa reducen el desarrollo del área foliar, la floración y la producción del cultivo.

Con el fin de conocer los parámetros fisiológicos de las plantas, como fotosíntesis, transpiración, interceptación de luz, asignación de biomasa, balance energético y algunos parámetros de los análisis de crecimiento es necesario la medición del área foliar (AF), debido a que su cuantificación permite la estimación del crecimiento y desarrollo vegetal (Cabezas-Gutiérrez *et al.* 2009), así como la determinación de estadios fenológicos, rendimiento agronómico, uso eficiente de la radiación solar, nutrición mineral y cálculo del uso eficiente del agua (Sonnentag *et al.* 2008); no obstante, medir el AF tiene ciertas dificultades, debido a que cuantificar la superficie foliar de un elevado número de hojas puede ser dispendioso, laborioso, demanda mucho tiempo y posee obstáculos, como la consecución de equipos específicos. Asimismo, retirar hojas, a través de muestreos destructivos, tiene un alto costo energético para la planta, lo que limita su producción de gran manera.

En este sentido, la medición del AF por medio de métodos alométricos cobra importancia, ya que al medir un atributo en particular, como la longitud de la lámina foliar, el ancho de la hoja o los dos parámetros combinados se puede correlacionar con un gran ajuste el AF medida y se determinan ecuaciones, que puedan ser validadas, mediante pruebas estadísticas en otras zonas, a partir de mediciones relativamente sencillas (Gonçalves *et al.* 2022). Este método presenta grandes ventajas, ya que disminuye el número de hojas que se retiran de la planta para los análisis y facilita la

medición de un mayor número de hojas; además es independiente de instrumentos o de equipos costosos de difícil adquisición (Cabezas-Gutiérrez *et al.* 2009).

Autores, como Cabezas-Gutiérrez *et al.* (2009), Mazzini *et al.* (2010), Pandey & Singh, (2011), Cabezas-Gutiérrez & Peña-Baracaldo (2012), Tay & Ling (2020) y Gonçalves *et al.* (2022) demostraron la viabilidad de realizar estimaciones del AF de hojas individuales, a partir de mediciones alométricas; sin embargo, en todos los casos, las hojas empleadas eran simples, por lo que el objetivo de esta investigación fue desarrollar un modelo no destructivo preciso y práctico, para estimar el AF de hojas individuales trilobuladas, mediante parámetros alométricos, en plantas de gulupa.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó con plantas de gulupa de tres años de edad, sembradas bajo cubierta plástica, en la casa de malla de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Pedagógica y Tecnología de Colombia UPTC (Boyacá, Colombia), sede Tunja, la cual, se encuentra ubicada en las coordenadas 5°33'10,44" N y 73°21'29,87" O, a una altitud de 2.700 m s.n.m., con una precipitación promedio anual de 726 mm y unas condiciones de temperatura promedio interior de 17 °C y humedad relativa del 65 %.

En la localidad de Tunja, se hizo la recolección de 100 hojas sanas de diferentes tamaños, del tercio medio de diferentes plantas de forma aleatorizada; luego, se colocaron en bolsas de papel humedecidas y se introdujeron en bolsas plásticas, para ser llevadas al laboratorio de Fisiología Vegetal de la UPTC. Allí, se determinó la masa individual de las hojas con una balanza de precisión 0,001g ViBRL AJ220E (Shinko Denshi Co., Ltd, Japón).

El AF se determinó en cada hoja mediante dos métodos: 1) con el medidor portátil láser CI-202 (CID Bio-Science, WA, USA), con resolución de 0,1 mm² y 2), mediante el software Easy Leaf Area (Lobet, 2017), haciendo el escáner de fotografías tomadas mediante cámara de celular colocada en un trípode, que garantizaba la misma distancia, altura y luz a la hora de tomar la foto. Además, se determinaron los parámetros alométricos, longitud del lóbulo central (L), del lóbulo derecho (LD) e izquierdo (LI), el ancho base en los lóbulos (a) y el ancho entre las puntas terminales de los lóbulos (b) (Figura 1) y se calculó la longitud total (Lt), como la suma de L+LD+LI.

Con los datos de L, a, b, LD, LI, Lt, L*a, L*b, LD*a, LD*b, LI*a, LI*b, L*a y L*b, se hicieron correlaciones con el AF, medida, tanto en el medidor portátil CI-2020 como en el software Easy Leaf Area (ELA) y, luego, se realizaron las respectivas regresiones, en las cuales, el modelo lineal (AF = A(x)+B), en donde A es la pendiente, B el intercepto y x la variable independiente a analizar (L, a, b, LD, LI, Lt, L*a, L*b, LD*a, LD*b, LI*a, LI*b, L*a y L*b), fue el que presentó mayor R² al compararse con el modelo potencial, exponencial y logarítmico, mediante el uso del programa Excel (Microsoft Corporation, 2022).

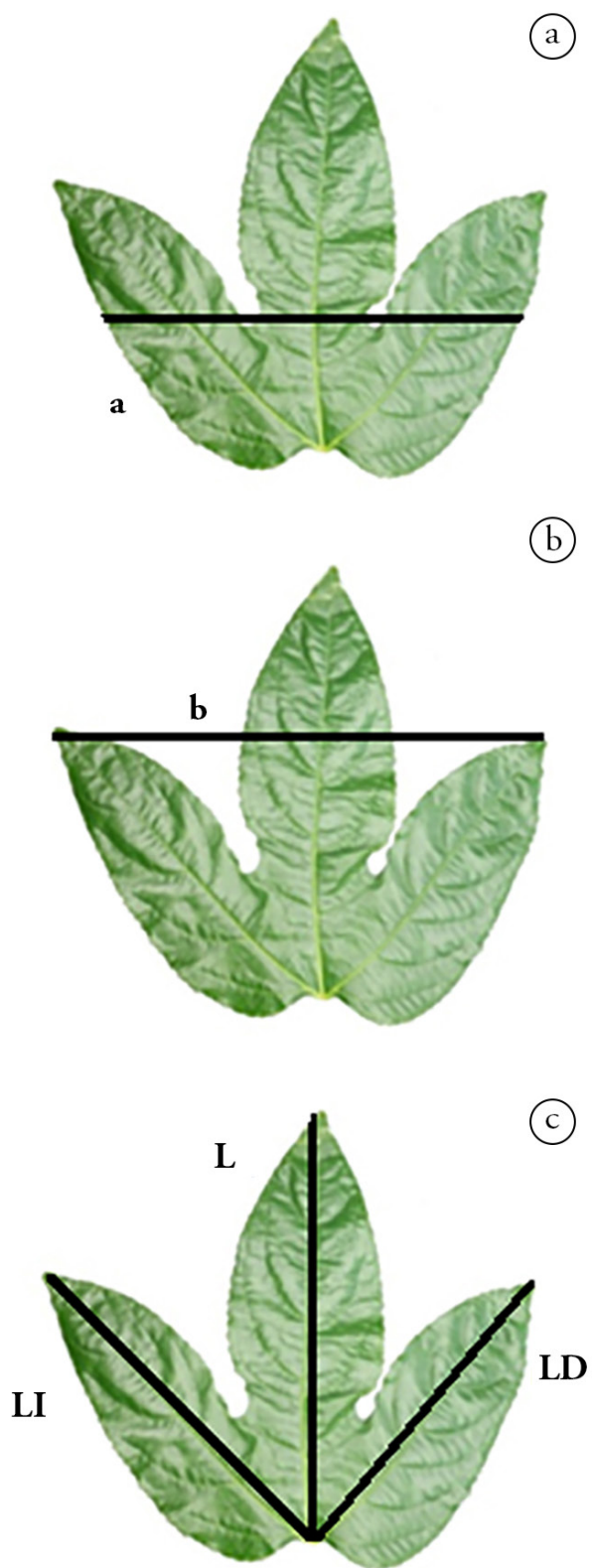


Figura 1. Parámetros alométricos determinados en las hojas de gulupa. a) ancho base en los lóbulos; b) ancho entre las puntas terminales de los lóbulos; c) longitud del lóbulo central (L), del lóbulo derecho (LD) e izquierdo (LI).

Con el fin de realizar la validación del modelo con mayor coeficiente de determinación (R^2), para estimar el AF encontrado en Tunja, se colectaron otras 100 hojas de gulupa de un cultivo comercial, bajo condiciones de invernadero, ubicado en el municipio de Arcabuco (Boyacá), vereda Quemados, finca 'Campo Alegre', en las coordenadas $5^{\circ}44'39,12''N$ y $73^{\circ}29'30,48''O$, a una altitud de 2.200 m s.n.m., con una precipitación promedio anual de 1.505 mm y unas condiciones de temperatura promedio al interior del invernadero de $23^{\circ}C$ y humedad relativa del 80 %. A las hojas obtenidas de la localidad de Arcabuco se les tomaron los datos alométricos de L, a, b, LD y LI, los cuales, se introdujeron en los modelos obtenidos para las muestras tomadas en la ciudad de Tunja, con el fin de calcular el AF estimada en Arcabuco, que se correlacionó con el AF, medida de las hojas de Arcabuco, mediante los dos métodos (medidor portátil láser CI-202 y ELA) y, de esta manera, validar el modelo obtenido.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis descriptivo. Las hojas de gulupa presentan tres lóbulos, siendo el lóbulo central (L) el más largo, con promedio de 12,75 cm; asimismo, tiene un lóbulo derecho (LD) y un lóbulo izquierdo (LI), los cuales, no siempre son iguales y poseen valores promedio de 10,33 y 10,19 cm, respectivamente. En cuanto al ancho base en los lóbulos (a), este siempre es menor, en un 23 % en promedio, al ancho entre las puntas terminales de los lóbulos (b) (Tabla 1). Estos valores son similares a los reportados por Granados Conde *et al.* (2017), quienes mencionan que las hojas de gulupa pueden alcanzar valores de 11 cm, para L y de 10 cm, para b. Del mismo modo, todos los datos presentaron una asimetría mayor a cero, lo que implicó que, una gran parte de los datos, están por debajo del promedio y que pocos datos están por encima, pero estos están más alejados del promedio.

Tabla 1. Estadística descriptiva de las variables alométricas medidas en hojas de gulupa (n=100), en la localidad de Tunja.

| Parámetro | L (cm) | a (cm) | b (cm) | LD (cm) | LI (cm) | Lt (cm) | AF (cm ²) |
|---------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|-----------------------|
| Promedio | 12,75 | 10,28 | 13,36 | 10,33 | 10,19 | 33,32 | 139,79 |
| Error estándar | 0,26 | 0,22 | 0,25 | 0,23 | 0,23 | 0,71 | 3,18 |
| Mediana | 11,95 | 9,70 | 13,10 | 9,80 | 9,70 | 31,60 | 131,99 |
| Moda | 11,80 | 8,90 | 13,20 | 9,50 | 9,50 | 30,00 | #N/A |
| Desviación estándar | 2,62 | 2,19 | 2,52 | 2,29 | 2,34 | 7,08 | 31,80 |
| Varianza | 6,86 | 4,82 | 6,37 | 5,26 | 5,46 | 50,13 | 1011,12 |
| Curtosis | 2,26 | 1,79 | 1,34 | 2,18 | 0,92 | 1,67 | 2,65 |
| Asimetría | 1,33 | 1,41 | 0,98 | 1,23 | 1,06 | 1,22 | 1,56 |
| Rango | 14,20 | 10,90 | 13,40 | 12,00 | 10,70 | 35,10 | 164,24 |
| Mínimo | 8,40 | 6,90 | 8,70 | 6,50 | 6,40 | 21,60 | 95,50 |
| Máximo | 22,60 | 17,80 | 22,10 | 18,50 | 17,10 | 56,70 | 259,74 |
| CV (%) | 20,54 | 21,36 | 18,89 | 22,19 | 22,91 | 21,25 | 22,75 |

L: longitud del lóbulo central, a: ancho base en los lóbulos, b: ancho entre las puntas terminales de los lóbulos, LD: longitud del lóbulo derecho, LI: longitud del lóbulo izquierdo, y Lt: suma de L+LD+LI, AF: área foliar medida en el CI-202. n=100.

El rango o amplitud de los datos de AF medida en el CI-202 para gulupa fue de 164,24, superior a lo reportado por Cabezas-Gutiérrez *et al.* (2009), quienes encontraron amplitudes que oscilan entre 64 y 104, para especies forestales y a los resultados de Da Silva Ribeiro *et al.* (2020), quienes en *Erythroxylum paufferense*, obtuvieron valores de 17,6, lo que implica que los modelos obtenidos presentan un alto grado de confiabilidad, ya que tienen como base la toma de muestras dispersas, tanto de hojas grandes como pequeñas, lo que le permite al modelo ser más representativo.

En cuanto a los coeficientes de variación (CV) oscilaron entre 18,89 y 22,91 %, para los parámetros medidos, los cuales, se pueden clasificar como heterogéneos, para las variables L, a, LD, LI, Lt y con moderada dispersión, para el atributo b, según la clasificación propuesta por Ríos Varillas (2012), quien menciona que variables con CV menores al 10 % tienen datos homogéneos; CV de entre 10 al 20 % tienen una moderada dispersión y que CV superiores al 20 %, corresponden a parámetros con valores muy dispersos. Lo

anterior se explica, debido a que en el muestreo se aleatorizaron las muestras y se trató de que fueran heterogéneas, con el fin de obtener un gran rango de valores para las variables alométricas, de tal forma que los modelos tuvieran mayor representatividad, tanto en hojas grandes como en pequeñas.

Correlación entre el AF medida a través del CI202 y los parámetros alométricos de las hojas colectadas en Tunja.

Dentro de los modelos lineales, exponenciales, logarítmicos y potenciales, los primeros presentaron mayor coeficiente de determinación (R^2) y fueron los que mejor relacionaron las variables L^*a (0,9377) y Lt^*a (0,9430) frente al AF; no obstante, al relacionar L y Lt de forma individual con el AF, también se obtienen altos valores de R^2 , con 0,9002 y 0,9107, respectivamente (Tabla 2); por lo tanto, se puede afirmar que para estimar el AF, se podría medir el L o, igualmente, calcular el Lt, las cuales, son mediciones lineales, fáciles de determinar en campo. Aun así, cuando se multiplica el L por a y el Lt por a, se obtienen coeficientes superiores con mayor precisión

y que permiten cuantificar el AF, con mayor exactitud. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Cabezas-Gutiérrez *et al.* (2009), quienes relacionaron variables alométricas frente al AF y encontraron que la multiplicación del largo de la hoja por el ancho de la hoja mostró los mayores R^2 , los cuales, oscilaron entre 0,955 y 0,971, para diferentes especies forestales. Si bien no se reportan estudios similares con hojas trilobuladas, esta misma

relación del largo por ancho ha mostrado altos valores de R^2 en hojas de un solo lóbulo, como guayaba (0,99) (Gonçalves *et al.* 2022), *Erythroxylum paufference* (0,9960) (Da Silva Ribeiro *et al.* 2020) y cerezas (Cittadini & Peri, 2006); además, Yeshitila & Taye (2016) obtuvieron para remolacha R^2 de 0,93, en modelos de regresión lineal múltiple, combinando el largo y ancho frente al AF.

Tabla 2. Ecuaciones y grados de ajuste de los modelos entre el área foliar, medida a través del CI202 y la combinación de los diferentes parámetros alométricos, medidos en hojas de gulupa, de la localidad de Tunja.

| x | Modelo | A | B | R2 |
|------|--------------|---------|---------|--------|
| L | AF=A(L)+B | 11,5174 | -7,0959 | 0,9002 |
| a | AF=A(a)+B | 13,6528 | -0,5102 | 0,8879 |
| b | AF=A(b)+B | 10,6736 | -2,8130 | 0,7173 |
| LD | AF=A(LD)+B | 12,9619 | 6,1985 | 0,8763 |
| LI | AF=A(LI)+B | 12,4620 | 13,1270 | 0,8405 |
| Lt | AF=A(Lt)+B | 4,2793 | -2,4343 | 0,9107 |
| L*a | AF=A(L*a)+B | 0,4977 | 72,0032 | 0,9377 |
| L*b | AF=A(L*b)+B | 0,4186 | 66,1930 | 0,8973 |
| LD*a | AF=A(LD*a)+B | 0,5882 | 74,9765 | 0,9303 |
| LD*b | AF=A(LD*b)+B | 0,4915 | 69,8668 | 0,8857 |
| LI*a | AF=A(LI*a)+B | 0,5929 | 75,3095 | 0,9276 |
| LI*b | AF=A(LI*b)+B | 0,4858 | 71,5653 | 0,8684 |
| Lt*a | AF=A(Lt*a)+B | 0,1873 | 73,2921 | 0,9430 |
| Lt*b | AF=A(Lt*b)+B | 0,1562 | 68,1885 | 0,8967 |

x: variable independiente, A: pendiente, B: intercepto, L: longitud del lóbulo central, a: ancho base en los lóbulos, b: ancho entre las puntas terminales de los lóbulos, LD: longitud del lóbulo derecho, LI: longitud del lóbulo izquierdo, y Lt: suma de L+LD+LI.

Una limitación en la velocidad del método sería el tiempo que se requiere para medir las longitudes de los tres lóbulos de la hoja de gulupa para realizar el cálculo de Lt, por lo que no solo se debe medir un parámetro, sino tres; no obstante, encontrar que se puede estimar el AF a partir de Lt es un gran logro, debido a la forma trilobulada que presentan las hojas de gulupa.

De las regresiones lineales realizadas, la estimación del AF a partir de b, obtuvo el menor R^2 (0,7173); asimismo, todos los modelos en los que se correlacionó el parámetro b con alguna otra de las variables alométricas, siempre tuvo menor valor de ajuste, por lo que se puede inferir que la medición del atributo b en las hojas de gulupa, no permite obtener modelos con buenos aproximaciones para estimar el AF.

Al analizar la pendiente de los modelos en los que se multiplicó alguna de las longitudes por los anchos medidos (L*a, L*b, LD*a, LD*b, LI*a, LI*b), se aprecia que esta oscila entre 0,41 y 0,59, menores a las pendientes de 0,80, 0,72 y 1,05, obtenidas por Cabezas-Gutiérrez *et al.* (2009), para la relación L por a, en especies forestales y a lo reportado por Da Silva Ribeiro *et al.* (2020), de 0,67, para la misma relación. De igual manera, Gonçalves *et al.* (2022), para diferentes cultivares de guayaba, encontraron una pendiente promedio de 0,85. Al respecto, Montoya *et al.* (2018)

mencionan que cuando la pendiente se acerca a 1, quiere decir que los valores del eje de las ordenadas son estadísticamente cercanos a los valores del eje de las abscisas; sin embargo, para el caso de las hojas de gulupa, los valores de la pendiente indican que el producto de alguna longitud por el ancho, no explica la totalidad de la variación de los valores del AF.

Correlación entre el AF obtenida con el software Easy Leaf Area (ELA) y los parámetros alométricos de las hojas colectadas en Tunja.

Con el software ELA, las ecuaciones de los parámetros alométricos que obtuvieron mayor R^2 fueron las que relacionaron L*a (0,9756) y Lt*a (0,9841) con el AF (Tabla 3); sin embargo, al correlacionar L y Lt frente al AF, también se obtuvieron valores altos de R^2 , con 0,9316 y 0,9486, respectivamente; por lo tanto, calcular Lt*a resultó ser el parámetro más confiable para estimar el AF por los dos métodos empleados, lo cual, coincide con lo expresado por Gonçalves *et al.* (2022), quienes mencionan que la relación de largo por ancho en hojas de guayaba fue la que presentó mayores valores de correlación para hallar el AF. Del mismo modo, Tay & Ling (2020) mencionan que la mejor correlación lineal se da entre el largo de la hoja y el ancho, para estimar el área de la hoja.

Con el método ELA, el parámetro b, también tuvo las menores correlaciones ($R^2=0,7437$), al igual que con el AF, medida en el

CI-202 e, igualmente, todas las combinaciones del parámetro b con las demás medidas alométricas, mostraron las más bajas correlaciones.

Las pendientes de los modelos en donde se multiplicaron las longitudes individuales por alguno de los anchos medidos (L^*a , L^*b ,

LD^*a , LD^*b , LI^*a , LI^*b), oscilaron entre 0,5098 y 0,7283 (Tabla 3), siendo mayores a las presentadas por los modelos que correlacionaron el AF, medida con el CI-202. Estas pendientes son similares a las registradas por Da Silva Ribeiro *et al.* (2020), de 0,67 para *E. paufferrense*.

Tabla 3. Ecuaciones y grados de ajuste de los modelos entre el área foliar, medida a través del Software Easy Leaf Area y los parámetros alométricos, medidos en hojas de gulupa de la localidad de Tunja.

| x | Modelo | A | B | R ² |
|---------|-------------------|---------|----------|----------------|
| L | AF=A(L)+B | 14,0186 | -93,8856 | 0,9316 |
| a | AF=A(a)+B | 16,6142 | -85,8341 | 0,9184 |
| b | AF=A(b)+B | 13,0041 | -88,8417 | 0,7437 |
| LD | AF=A(LD)+B | 15,8159 | -78,1963 | 0,9073 |
| LI | AF=A(LI)+B | 15,3290 | -70,9973 | 0,8844 |
| Lt | AF=A(Lt)+B | 5,2371 | -89,2456 | 0,9486 |
| L^*a | AF=A(L^*a)+B | 0,6074 | 2,1694 | 0,9756 |
| L^*b | AF=A(L^*b)+B | 0,5098 | -4,7296 | 0,9296 |
| LD^*a | AF=A(LD^*a)+B | 0,7200 | 5,4792 | 0,9692 |
| LD^*b | AF=A(LD^*b)+B | 0,6003 | -0,5913 | 0,9188 |
| LI^*a | AF=A(LI^*a)+B | 0,7283 | 5,6071 | 0,9733 |
| LI^*b | AF=A(LI^*b)+B | 0,5960 | 1,1133 | 0,9089 |
| Lt^*a | AF=A(Lt^*a)+B | 0,2294 | 3,3494 | 0,9841 |
| Lt^*b | AF=A(Lt^*b)+B | 0,1910 | -2,7339 | 0,9322 |

x: variable independiente, A: pendiente, B: intercepto, L: longitud del lóbulo central, a: ancho base en los lóbulos, b: ancho entre las puntas terminales de los lóbulos, LD: longitud del lóbulo derecho, LI: longitud del lóbulo izquierdo, y Lt: suma de L+LD+LI.

Con la ecuación lineal $AF=A(L^*a)+B$, se calculó el AF estimada a partir de los datos medidos de L y a de las hojas colectadas en Tunja, en donde se obtuvo que la pendiente y el R^2 tuvieron un valor de 0,9377 y 0,9756, para el AF, medida con el CI-202 y el AF, determinada por el ELA, respectivamente (Figuras 2a y 2b), lo que indica que los valores del AF estimados a partir del producto de L^*a , son cercanos estadísticamente a los observados para el AF, medida por los dos métodos. Así, también, permite afirmar que, la estimación del AF con el ELA, tiene mayor grado de ajuste, lo que lo convierte en un método más robusto para determinar el AF. Asimismo, cabe resaltar que el valor de R^2 obtenido con las mediciones del CI-202 es inferior a los reportados para especies forestales por Cabezas-Gutiérrez *et al.* (2009) y a los calculados para *Erythroxylum paufferrense*, por Da Silva Ribeiro *et al.* (2020), mientras que el AF medida con el software ELA mantuvo coeficientes de determinación, similares a los encontrados por esos autores.

Por otra parte, al estimar el AF a partir de la ecuación lineal $AF=A(Lt^*a)+B$, se obtuvieron valores de coeficientes de determinación mayores que los encontrados para la ecuación en donde se usó la variable L^*a (Figuras 2c y 2d). Además, se aprecia que al analizar por separado, tanto las mediciones del AF realizadas con el CI-202 como con el programa ELA, el parámetro Lt^*a tuvo mayor correlación que el L^*a , debido a la naturaleza trilobulada de las hojas de gulupa. Del mismo modo, se puede apreciar que

las mediciones con el ELA tuvieron un mayor grado de ajuste que las realizadas con el CI-202, tanto para Lt^*a como para L^*a . Al respecto, se puede mencionar que los coeficientes de determinación encontrados en gulupa para la variable Lt^*a son similares a los reportados por Da Silva Ribeiro *et al.* (2020), para los modelos lineales en función de L^*a en *E. paufferrense* ($R^2=0,981$ y $0,996$) y acordes a los reportados para café, por Mielke *et al.* (2023), de 0,98, usando modelos propuestos por diferentes autores, para hojas de un solo lóbulo.

Validación. Una vez se establecieron los modelos con mayor R^2 , a los datos de las hojas muestreadas en la localidad de Arcabuco, se les tomó el L y el a y se reemplazaron en las ecuaciones obtenidas para las muestras de Tunja, tanto por el método del CI-202 como por el software ELA, ($AF=0,4977*(L^*a)+72,0032$ y ($AF=0,6074*(L^*a)+2,1694$), respectivamente y se calculó el AF estimada de las hojas muestreadas en Arcabuco, para lo cual, se obtuvieron R^2 de 0,9336 y 0,9612, como se aprecia en la figura 3. Este coeficiente de determinación es similar al obtenido por Cabezas-Gutiérrez & Peña-Baracaldo (2012), en arándanos (0,92) e inferior a los obtenidos por Cabezas-Gutiérrez *et al.* (2009), para especies forestales, que oscilaron entre 0,98 y 0,99. Es sabido que en otras especies, la estimación del AF, a partir de variables alométricas, presenta altas correlaciones; no obstante, para el caso de gulupa, si bien los valores son aceptables, la forma de la hoja hace que la estimación de modelos para el AF tenga menor correlación

con las variables alométricas; por lo anterior, se puede afirmar que el modelo lineal que tiene en cuenta el producto de la longitud del lóbulo central de la hoja por el ancho base en los lóbulos, se puede

emplear, con una gran confiabilidad, para estimar el AF individual, de las plantas de gulupa.

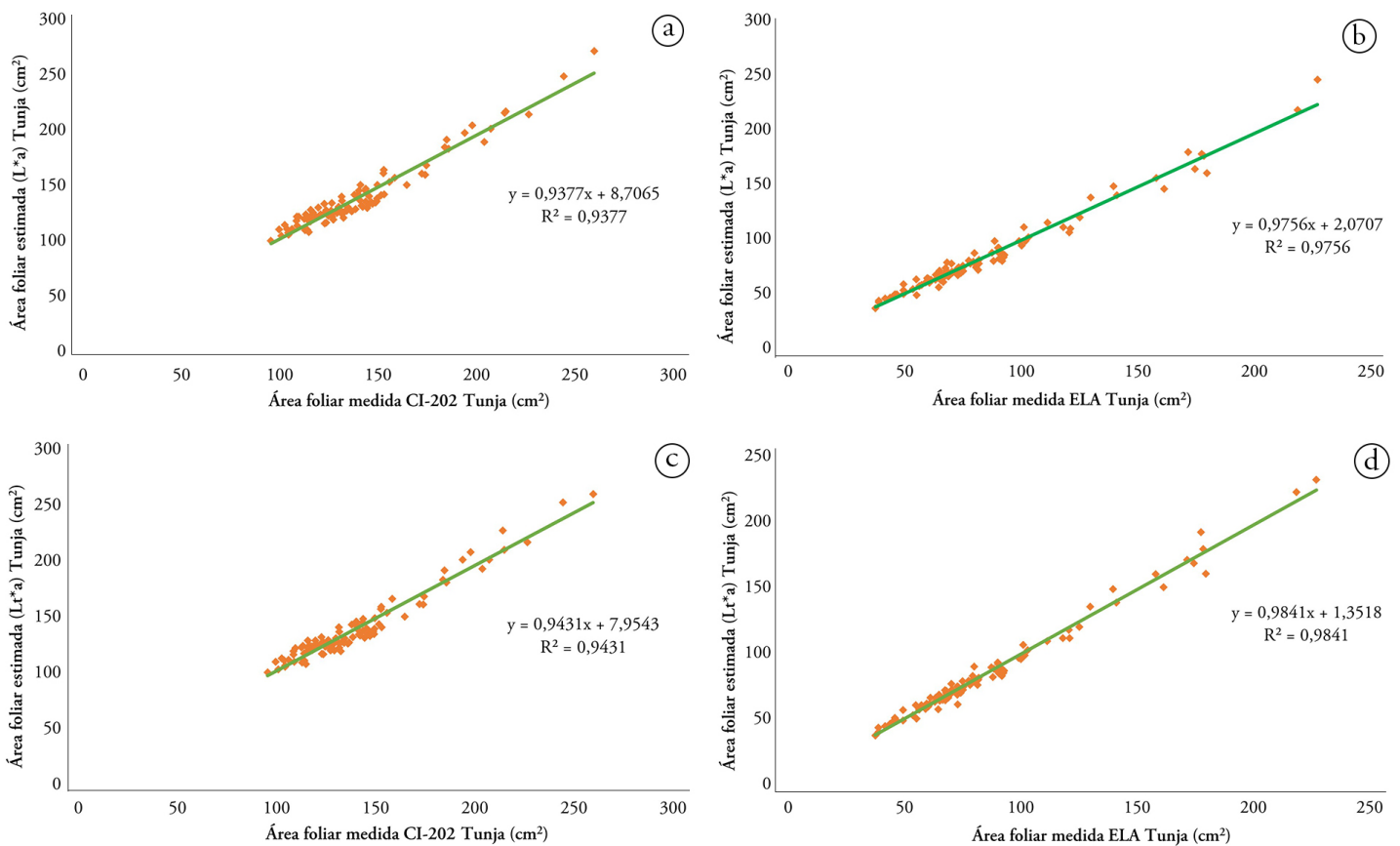


Figura 2. Relaciones entre el área foliar medida y el área foliar estimada. a) Relación entre el área foliar medida en Tunja con el CI-202 y el área foliar estimada en Tunja, con el modelo obtenido para el CI-202, con los datos de L^*a de Tunja; b) Relación entre el área foliar medida en Tunja, con el ELA y el área foliar estimada en Tunja, con el modelo obtenido para el ELA con los datos de L^*a de Tunja; c) Relación entre el área foliar medida en Tunja con el CI-202 y el área foliar estimada en Tunja, con el modelo obtenido para el CI-202, con los datos de L^*a de Tunja; d) Relación entre el área foliar medida en Tunja con el ELA y el área foliar estimada en Tunja, con el modelo obtenido para el ELA, con los datos de L^*a de Tunja.

Debido a que la medición de L^*a mostró las mejores correlaciones, se validó el modelo encontrado en Tunja, tanto para la medición del AF con el CI-202 como con el ELA, reemplazando la variable L^*a de las hojas muestreadas en Arcabuco, dando como resultado los valores de R^2 , plasmados en las figuras 3a y 3b, superiores a los encontrados para la validación de los modelos hallados para los valores de L^*a y que indican que, así como también la relación L^*a tuvo la mayor correlación con el AF, la medición de L^*a tiene el modelo con mayor validación de los datos en otra zona (Arcabuco). Cabe resaltar que los valores de R^2 encontrados para los modelos de validación en función de la variable L^*a son más cercanos a los valores encontrados por Cabezas-Gutiérrez *et al.* (2009) en la validación de modelos para L^*a , en especies forestales, probablemente, debido a que las hojas de gulupa son trilobuladas, por lo tanto, se debe medir la longitud de los tres lóbulos.

(Figura 3c), tuvo mayor correlación que el modelo obtenido para Tunja, con el CI-202 (Figura 3d), para los datos de L^*a , obtenidos a partir de las hojas de Arcabuco, lo que hace más confiable la medición del AF, con el método del ELA.

Todas las correlaciones permiten concluir que es más importante medir el ancho a que el ancho b en las hojas de gulupa, pues presentaron siempre los mejores coeficientes de correlación con los demás parámetros. El AF calculada, a través del software Easy Leaf Area, tiene mayor grado de ajuste, tanto en las correlaciones como en la estimación y validación para obtener el AF. El ancho base en los lóbulos (a) siempre es menor que el ancho entre las puntas terminales de los lóbulos (b). La relación lineal de L^*a frente al AF fue la que presentó mayor correlación, por lo que en hojas de gulupa, medir L^*a es la mejor forma para estimar el AF.

Se puede apreciar, que el AF estimada para Arcabuco, con el modelo obtenido para las hojas muestreadas en Tunja y medidas con el ELA

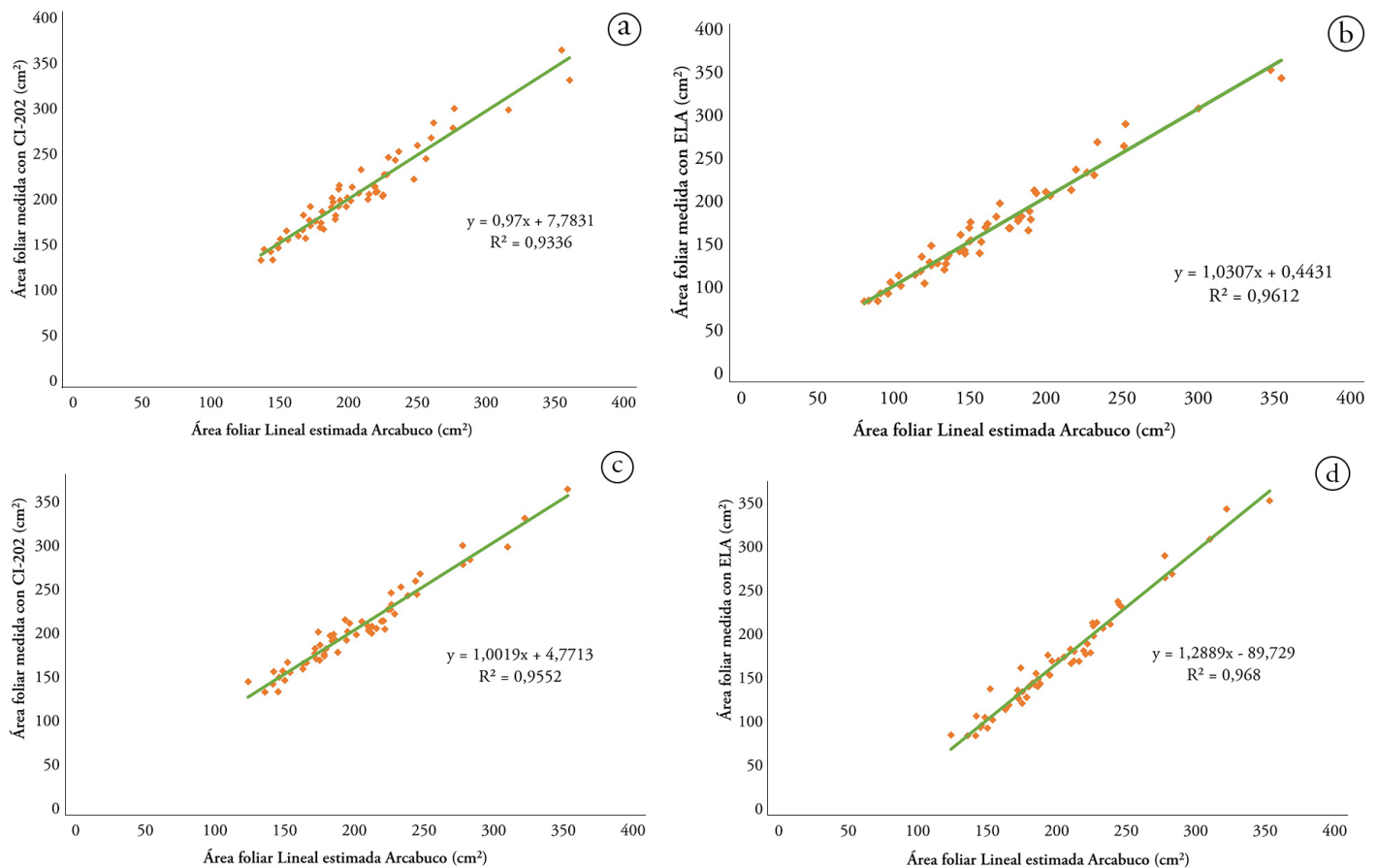


Figura 3. Relaciones entre el área foliar medida y el área foliar estimada. a) Relación entre el área foliar medida en Arcabuco, con el CI-202 y el área foliar estimada en Tunja, con el modelo obtenido para el CI-202, con los datos de L*a de Arcabuco; b) Relación entre el área foliar medida en Arcabuco, con el ELA y el área foliar estimada en Tunja, con el modelo obtenido para el ELA, con los datos de L*a de Arcabuco; c) Relación entre el área foliar medida en Arcabuco, con el CI-202 y el área foliar estimada en Tunja, con el modelo obtenido para el CI-202, con los datos de Lt*a de Arcabuco; d) Relación entre el área foliar medida en Arcabuco, con el ELA y el área foliar estimada en Tunja, con el modelo obtenido para el ELA, con los datos de Lt*a de Arcabuco.

Agradecimientos. Los autores agradecen a los profesores Marco Cabezas Gutiérrez, por la orientación y Pedro José Almanza, por la colaboración; asimismo, agradecen a los ingenieros Oscar Humberto Alvarado y Fabio Andrés Ayala, por facilitar materiales para la realización del estudio. **Conflicto de interés:** el artículo fue escrito, preparado y revisado por todos los autores, quienes no tienen conflicto de interés que ponga en duda la validez de los resultados. **Contribución de los autores:** Marilcen Jaime-Guerrero: metodología, logística, análisis de datos, investigación, escritura borrador original. Javier G. Álvarez-Herrera: metodología, análisis de datos, investigación, conceptualización, escritura, revisión, edición y supervisión. Jesús H. Camacho-Tamayo: escritura, revisión y edición.

REFERENCIAS

1. CABEZAS-GUTIÉRREZ, M.; PEÑA, F.; DUARTE, H.W.; COLORADO, J.F.; LORA-SILVA, 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):121-130. <https://doi.org/10.31910/rudca.v12.n1.2009.648>
2. CABEZAS-GUTIÉRREZ, M.; PEÑA-BARACALDO, F. 2012. Estimación del área foliar del arándano (*Vaccinium corymbosum*) por medio de un método no destructivo. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 15(2):373-379. <https://doi.org/10.31910/rudca.v15.n2.2012.837>
3. CITTADINI, E.D.; PERI, P.L. 2006. Estimation of leaf area in sweet cherry using a non-destructive method. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*. 35(1):143-150.
4. DA SILVA RIBEIRO, J.E.; DOS SANTOS COELHO, E.; ANDRADE FIGUEIREDO, F.R.; FERREIRA MELO, M. 2020. Non-destructive method for estimating leaf area of *Erythroxylum paufferense* (Erythroxylaceae) from linear dimensions of leaf blades. *Acta Botánica Mexicana*. 127:e1717. <https://doi.org/10.21829/abm127.2020.1717>
5. DE ARMAS ACOSTA, R.J.; MARTÍN GÓMEZ, P.F.; RANGEL DÍAZ, J.E. 2022. Gulupa (*Passiflora edulis* Sims), su potencial para exportación, su matriz y su firma de maduración: una revisión. *Revista Ciencia y Agricultura*. 19(1):15-27. <https://doi.org/10.19053/01228420.v19.n1.2022.13822>

6. FISCHER, G.; MIRANDA, D. 2021. Review on the ecophysiology of important Andean fruits: *Passiflora* L. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín. 74(2):9471-9481. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n2.91828>
7. GONÇALVES, M.P.; RIBEIRO, R.V.; AMORIM, L. 2022. Non-destructive models for estimating leaf area of guava cultivars. *Bragantia*. 81:e2822. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20210342>
8. GRANADOS CONDE, C.; TINOCO GUARDO, K.P.; GRANADOS LLAMAS, E.; PÁJARO-CASTRO, N.P.; GARCÍA MILANO, Y. 2017. Caracterización química y evaluación de la actividad antioxidante de la pulpa de *Passiflora edulis* Sims (gulupa). *Revista Cubana de Plantas Medicinales*. 22(2).
9. JIMÉNEZ, Y.; CARRANZA, C.; RODRÍGUEZ, M. 2012. Gulupa (*Passiflora edulis* Sims) En: Fischer, G. (Ed.). Manual para el cultivo de frutales en el trópico. Produmedios. p. 579-597.
10. LOBET, G. 2017. Image analysis in plant sciences: Publish then perish. *Trends in Plant Science*. 22(7):559-566. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.05.002>
11. MAZZINI, R.B.; RIBEIRO, R.V.; PIO, R.M. 2010. A simple and non-destructive model for individual leaf area estimation in citrus. *Fruits*. 65:269-275. <https://doi.org/10.1051/fruits/2010022>
12. MICROSOFT CORPORATION, 2022. Microsoft 365. Disponible desde Internet en: <https://www.microsoft.com/es-co/microsoft-365/excel>
13. MIELKE, M.S.; SANTOS, G.O.; SILVA LOPES, E.C.; SCHILLING, A.C.; SANTANA DOS SANTOS, M.; PÉREZ-MOLINA, J.P. 2023. Allometric models to estimate the individual leaf area of arabica coffee: an approach from frequentist and Bayesian statistics. *Acta Physiologiae Plantarum*. 45(3):39. <https://doi.org/10.1007/s11738-023-03514-x>
14. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, MADR. 2021. Cadena de pasifloras. Indicadores e instrumentos primer trimestre 2021. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Pasifloras/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
15. MIRANDA, D.; FISCHER, G.; CARRANZA, C.; MAGNITSKIY, S.; CASIERRA-POSADA, F.; PIEDRAHÍTA, W.; FLÓREZ, L.E. 2009. Cultivo, poscosecha y comercialización de las pasifloráceas en Colombia: maracuyá, granadilla, gulupa y curuba. Sociedad Colombiana de Ciencias Hortícolas, Bogotá. 357p.
16. MONTOYA, F.; CAMARGO, D.; DOMÍNGUEZ, A.; ORTEGA, J.F.; CÓRCOLES, J.I. 2018. Parametrization of Cropsyst model for the simulation of a potato crop in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*. 203:297-310. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.029>
17. PANDEY, S.K.; SINGH, H. 2011. A simple, cost-effective method for leaf area estimation. *Journal of Botany*. 658240. <https://doi.org/10.1155/2011/658240>
18. PAULL, R.; DUARTE, O. 2012. Tropical fruits. Volumen 2. Segunda edición. CABI International, Wallingford, U.K. p.371.
19. RÍOS VARILLAS, C. 2012. Estadística y diseño de experimentos. Universidad Nacional de Ingeniería. Primera edición. Editorial Universitaria. Perú. p.217.
20. RODRÍGUEZ-POLANCO, E.; BERMEO FÚQUENE, P.; SEGURA-AMAYA, J.; PARRA-ALFERES, E. 2022. Caracterización y tipificación de los sistemas de producción de gulupa (*Passiflora edulis* f. *edulis* Sims.) de las regiones Norte y Centro - Occidente de Tolima. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. 13(1):89-107. <https://doi.org/10.22490/21456453.4583>
21. SONNENTAG, O.; TALBOT, J.; CHEN, J.M.; 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*. 144:200-212. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.03.001>
22. TAY, A.C.; 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):012066. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/943/1/012066>
23. YESHITILA, M.; TAYE, M. 2016. Non-destructive prediction models for estimation of leaf area for most commonly grown vegetable crops in ethiopia. *Science Journal of Applied Mathematics and Statistics*. 4(5): 202-216. <http://dx.doi.org/10.11648/j.sjams.20160405.13>