



Artículo

Estimación no destructiva del área foliar en plántulas de cacao (*Theobroma cacao* L.) a partir de mediciones lineales en la hoja, Estación Experimental Sapecho

Non-destructive estimation of the foliar area in cacao (*Theobroma cacao* L.) plantules from linear leaf measurements, Sapecho Experimental Station

Marcela Daniela Mollericona Alfaro, Esther Esperanza Laime Calle,
Efraín Adolfo Merma Santos

RESUMEN:

Este estudio realizado en la Estación Experimental Sapecho, durante septiembre y octubre de 2021, tuvo como objetivo obtener modelos estadísticos para estimar y predecir el área foliar de plántulas de cacao (*Theobroma cacao* L.) del tipo Nacional Boliviano (CNB) y foráneo (CF IMC67), basados en el largo (L) y ancho (A) de la hoja, para lo cual se tomaron muestras aleatorizadas en 100 plantas y tres estratos de la planta. Las medidas obtenidas fueron correlacionadas para generar ecuaciones de regresión lineales simples (en función del largo y del ancho) y múltiples (en función del largo por el ancho), además se realizó la validación comparando datos del área foliar estimados y medidos. El área foliar resultó altamente correlacionada con el largo, el ancho y con el largo por ancho, siendo los modelos de mejor ajuste los que comparan el área foliar con el largo por el ancho: $AF = 0.6623 L * A + 1.474$ (CNB), $AF = 0.6668 L * A + 5.1576$ (CF IMC67) y $AF = 0.6877 L * A + 0.5189$ (combinación de ambos cultivares), cuyos coeficientes de determinación fueron $R^2=0.9660$, $R^2=0.9486$ y $R^2=0.9647$. En la validación, el coeficiente de correlación de Pearson (r) presentó valores superiores a 0.9, indicando una relación estrecha entre los datos estimados y observados. Las ecuaciones obtenidas permiten estimar en forma predictiva el área foliar en plántulas de cacao de manera confiable y simple a partir de medidas de largo y ancho fácilmente obtenibles, sin necesidad de destruir las plantas. El mejor modelo obtenido fue el lineal múltiple de largo por ancho.

PALABRAS CLAVE:

área foliar, modelo de regresión, regresión lineal, predicción, cacao.

ABSTRACT:

This study conducted at the Sapecho Experimental Station, during September and October 2021, aimed to obtain statistical models to estimate and predict the leaf area of cacao (*Theobroma cacao* L.) seedlings of the Bolivian National (CNB) and foreign (CF IMC67) types, based on the length (L) and width (A) of the leaf, for which randomized samples were taken in 100 plants and three strata of the plant. The measurements obtained were correlated to generate simple linear regression equations (as a function of length and width) and multiple linear regression equations (as a function of length times width), and validation was performed by comparing estimated and measured leaf area data. Leaf area was highly correlated with length, width and length by width, with the best fitting models being those comparing leaf area with length by width: $AF = 0.6623 L * A + 1.474$ (CNB), $AF = 0.6668 L * A + 5.1576$ (CF IMC67) and $AF = 0.6877 L * A + 0.5189$ (combination of both cultivars), whose coefficients of determination were $R^2=0.9660$, $R^2=0.9486$ and $R^2=0.9647$. In the validation, Pearson's correlation coefficient (r) presented values higher than 0.9, indicating a close relationship between the estimated and observed data. The equations obtained allow the predictive estimation of leaf area in cocoa seedlings in a reliable and simple way from easily obtainable length and width measurements, without the need to destroy the plants. The best model obtained was the multiple linear model of length by width.

KEYWORDS:

Leaves, leaf area, regression model, prediction, cacao.

AUTORES:

Marcela Daniela Mollericona Alfaro: Docente Investigadora, Facultad de Agronomía-UMSA, La Paz-Bolivia. Maestrante Programa de Ingeniería Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-Brasil., marcela.mollericonalfaro@yahoo.com

Esther Esperanza Laime Calle: Auxiliar de Investigación y Tesista de Pregrado, Facultad de Agronomía –UMSA, La Paz-Bolivia. estheresperanzacallelaime11@gmail.com

Efraín Adolfo Merma Santos: Tesista de Pregrado, Facultad de Agronomía –UMSA, La Paz-Bolivia. adolfo.merma@gmail.com

Recibido: 11/11/2021. Aprobado: 10/03/2022.



INTRODUCCIÓN

El cultivo de cacao es un cultivo tradicional de importancia, ya que, desde la época de la colonia, se lo producía con fines de exportación, por lo que se ha constituido en un dinamizador de economías (Sánchez et al. 2019). Los mismos autores destacan que además de los beneficios económicos, el cacao también se considera como alternativa para enfrentar los efectos del cambio climático.

Según Maldonado (2016), el cultivo de cacao se constituye en la base productiva primordial para los pequeños productores de la región del Alto Beni. La misma fuente indica que en Bolivia, el cacao del tipo amazónico y trinitario se introdujo a la región de Alto Beni y el Chapare como semilla híbrida proveniente de Trinidad y Tobago, Ecuador y Perú, considerándose la existencia del cacao denominado “criollo” o nacional. Sobre las plantaciones de cacao Nacional existentes en el Alto Beni, fueron establecidas a partir de pocas plantas y hubo un amplio intercambio de semillas de CNB entre localidades (Villegas y Astorga, 2005).

La determinación del área foliar de las plantas es de suma importancia, tanto en estudios relacionados al crecimiento y desarrollo vegetativo de las plantas, como en investigaciones sobre nutrición. Sin embargo, existen una serie de limitantes al momento de realizar las mediciones, como la necesidad de equipos complejos o métodos que resultan bastante laboriosos y resultan costosos en tiempo y recursos.

Meza y Bautista (1999) mencionan que la determinación del área foliar de las plantas tiene gran importancia en los estudios relacionados con su crecimiento y desarrollo, a causa de que en las hojas se sintetizan los carbohidratos que se reparten a diferentes órganos. El área foliar es una importante observación biométrica que debe hacerse con el propósito de comparar el comportamiento vegetal en función de distintos tratamientos (Casierra et al. 2017). A su vez, el área foliar es un parámetro usado en ecofisiología de cultivos (Astegiano et al. 2001; Casierra et al. 2017).

La determinación del área foliar (AF) se realiza mediante diversos procedimientos, desde modernos y automáticos como planímetros ópticos,

hasta otros laboriosos y tediosos de laboratorio con el planímetro mecánico (Ruiz-Espinoza et al. 2007). Los mismos autores señalan que al ser estos métodos, costosos y de larga evaluación, se intenta desarrollar procedimientos de ejecución fácil; como los métodos no destructivos en lo posible (Calderón et al. 2011). La medición de un elevado número de hojas puede ser un proceso costoso, engorroso y de alto consumo de tiempo (Cabezas et al. 2009). Astegiano et al. (2001) señalan que la medición directa, a pesar de que resulta ser más precisa, requiere de equipos de alto costo que en ocasiones no son utilizables de forma sencilla, en especial con hojas de gran tamaño y profundamente lobuladas.

La determinación se puede hacer mediante procedimientos destructivos y no destructivos (Meza y Bautista, 1999) tanto indirectos como directos (Astegiano et al. 2001; Cabezas et al. 2009; Casierra et al. 2017). Los métodos de cálculo consisten en aproximar en alto grado el área de la hoja, mediante regresiones de tipo lineal y presentan grandes ventajas, debido a que reduce el muestreo destructivo, permite valorar un mayor número de muestras y no depende de equipos ni condiciones como uso de electricidad y energía de trabajo (Cabezas et al. 2009). Estos estudios se refieren a relaciones que consisten en la conversión de una o dos dimensiones lineales de las hojas, a su área foliar (Astegiano et al. 2001).

El desarrollo de modelos a partir de medidas lineales de una hoja para predecir o estimar el área foliar se ha empleado en numerosos estudios como los de Ruiz-Espinoza et al. (2007) que obtuvieron resultados que demostraron la posibilidad de estimar en forma predictiva el área foliar (AF) de manera confiable, a partir de medidas fácilmente obtenibles, sin necesidad de destruir la planta (largo y ancho) en hojas de albahaca. Razquin et al. (2017) validaron ecuaciones para estimar el área foliar en plantas individuales de maíz (*Zea mays* L.) e Interdonato et al. (2015) para dos híbridos comerciales de sorgos. Ayala et al. (2009) construyeron modelos de regresión simple cuya mejor variable explicativa fue el largo de hoja en berenjena (*Solanum melongena* L.) con un R^2 igual a 0.9605, y Astegiano et al. (2001) emplearon medidas lineales de tomate para estimar el área foliar en distintos cultivares.

Otros estudios describen relaciones alométricas, como Montoya et al. (2017), que establecieron y validaron la relación entre el área foliar de la rama y el número de hojas en árboles de café, estableciendo una primera relación entre área foliar y producción en café. Casierra et al. (2017) calcularon funciones matemáticas para estimar el área foliar de cultivares de durazno, encontrando una estrecha relación con el producto del largo por el ancho de la hoja, con valores del coeficiente de correlación de Pearson superiores a 0.9; y de forma similar Meza y Bautista (1999) determinaron el área foliar de plantas jóvenes de níspero (*Manilkara achras*).

Cabezas et al. (2009) también obtuvieron modelos de relación entre el área de la hoja individual y medidas lineales para las especies aliso (*Alnus acuminata* H.B.K), magle (*Escallonia pendula* Pers.) y roble (*Quercus humboldtii* Bompland), con coeficientes de determinación mayores a 0.95. Pire y Valenzuela (1995) estimaron el área foliar en *Vitis vinifera* también a partir de mediciones lineales en las hojas. En condiciones de vivero, Calderón et al. (2011) identificaron que con el largo se logra un buen ajuste para medir el área foliar en plantines de mamey (*Pouteria sapota*) Mediante la consulta en la literatura, no se cuenta con estudios sobre un método de estimación de la superficie foliar de cacao en condiciones de vivero. Como señalan Cabezas et al. (2009), si el método es cuidadosamente probado y validado, se puede emplear en diferentes situaciones, otorgando facilidad para la obtención de datos confiables y repetibles en el tiempo.

De esta forma, con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue establecer un procedimiento sencillo no destructivo, a su vez eficiente en costos y duración, para la determinación del área foliar de las hojas de cacao, a través de modelos de regresión para estimar el área foliar basándose en el largo y el ancho de la lámina en plántulas en fase de vivero, en la Estación Experimental Sapecho, localizada en el municipio de Palos Blancos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El estudio se realizó en predios de la Estación Experimental Sapecho (EES), en condiciones del área

del vivero dedicado a la producción de plantines de frutales y forestales, durante el período septiembre – octubre de 2021. La EES se encuentra ubicada en la cuarta sección municipal de Palos Blancos, Provincia Sud Yungas del departamento de La Paz. La (EES) se encuentra ubicada entre las coordenadas 15° 32' 54.4" de Latitud Sur, 67° 19' 47.8" de Longitud Oeste, a una altitud promedio de 450 msnm y a una distancia de 260 km de la ciudad de La Paz (Ticona et al. 2017).

Metodología

El tipo de investigación es descriptiva, empleando el método de regresión, mediante el muestreo de las hojas se realizó en dos tipos de cacao: Nacional Boliviano (CNB) y foráneo CF IMC67. Los plantines de CNB y de CF IMC67 del vivero de la EES fueron producidos con semillas provenientes de mazorcas colectadas en el banco de germoplasma perteneciente a la estación. Se efectuó un muestreo aleatorio simple en 100 plantas para la selección de hojas, tomándose hojas de diferentes tamaños en plantas del tipo cacao “nacional boliviano” (CNB) y del tipo cacao “foráneo” (CF IMC67), cultivadas en bolsas con sustrato de dimensiones 12*22 cm, dispuestas en filas con dos hileras y pasillos de 60 cm.

En las plantas seleccionadas, se escogieron hojas de tres estratos de la planta (superior, intermedio y basal), sin daño mecánico o problemas fitosanitarios, aleatorizadas de distintos tamaños como muestra, para cada uno de los cultivares de cacao, haciendo un total de 200 mediciones. Una vez colectadas, se colocaron en bolsas de polietileno y se transportaron al laboratorio de la EES, con base a la metodología de Cabezas et al. (2009). Las hojas colectadas en los tres estratos de los plantines, se mezclaron, por lo que las ecuaciones obtenidas están representadas por los tres tipos de hojas.

Determinación del área foliar y las ecuaciones

El largo de las hojas (L) fue medido desde la base del peciolo hasta el extremo o ápice de la lámina y el ancho máximo de las hojas (A) fue medido en sentido perpendicular a la longitud máxima con una regla milimetrada. Una vez obtenidas estas medidas se realizaron análisis de regresión simples y múltiples por cada grupo de valores mediante el programa Excel de Microsoft Office v. 2016, utilizando el largo y/o ancho como variables

independientes y el área foliar como la variable dependiente según Meza y Bautista (1999). Para el procesamiento, los datos se agruparon en pares de datos: a) largo contra el área foliar, b) ancho máximo contra el área foliar y c) largo y ancho contra el área foliar. También fueron realizados gráficos de dispersión para la observación de las tendencias, junto al cálculo de las ecuaciones.

Fueron obtenidos modelos estadísticos (ecuaciones) para estimar y predecir el área foliar (AF) basado en el largo (L) y ancho (A) de la hoja de cacao basándose en Ruiz-Espinoza et al. (2007), para obtener ecuaciones de regresión lineales simples (área foliar en función de largo y de ancho) y lineal múltiple (área foliar en función de largo por ancho, L*A) para permitir una adecuada estimación del área foliar.

Validación del grado de ajuste

Posteriormente, fueron recolectadas 25 hojas adicionales por cada cultivar, diferentes a las anteriores, de las cuales se determinó el área según las fórmulas obtenidas y se evaluaron las ecuaciones seleccionadas para cada cultivar. El criterio de selección fue el valor de R² máximo y las menores raíces cuadradas medios del error (RSME) (Razquin et al. 2017).

$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{n}} \quad (1)$$

Donde E_i y O_i son los valores de área foliar estimados y observados, respectivamente; n es la cantidad de hojas evaluadas.

Con la información obtenida se realizó la prueba de correlación de Pearson ($P \leq 0,01$) entre el área foliar observada y la estimada obtenida con las ecuaciones calculadas.

RESULTADOS Y DISUSIÓN

En las Figuras 1, 2, 3 y 4 se observa las frecuencias de distribución para el largo y ancho de las hojas (cm) de ambos cultivares, pudiendo observarse una mayor longitud y ancho en las hojas de cacao IMC67 en comparación a las del cacao Nacional Boliviano.

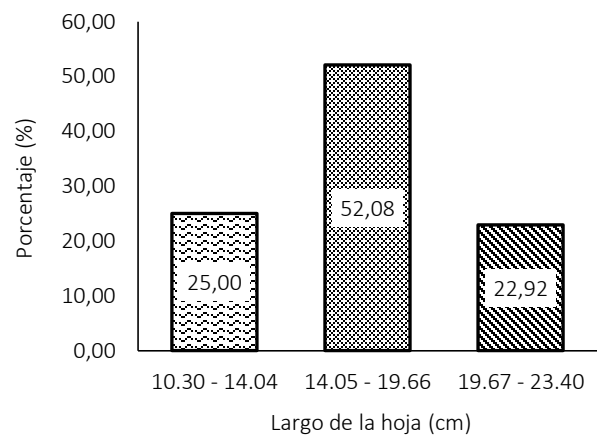


Figura 3. Distribución de frecuencias (%) para el largo de las hojas de cacao Nacional Boliviano (CNB).

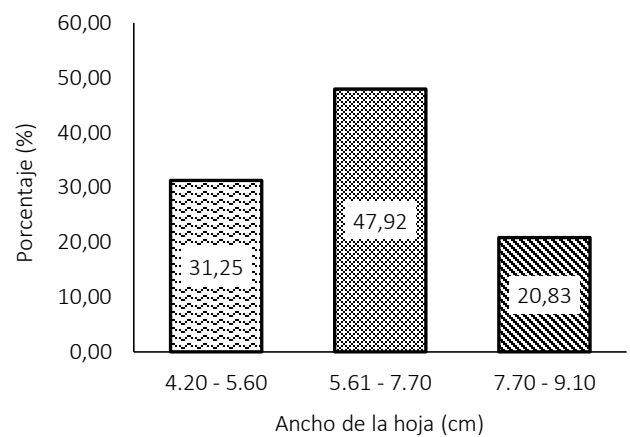


Figura 4. Distribución de frecuencias (%) para el ancho de las hojas de cacao Nacional Boliviano (CNB).

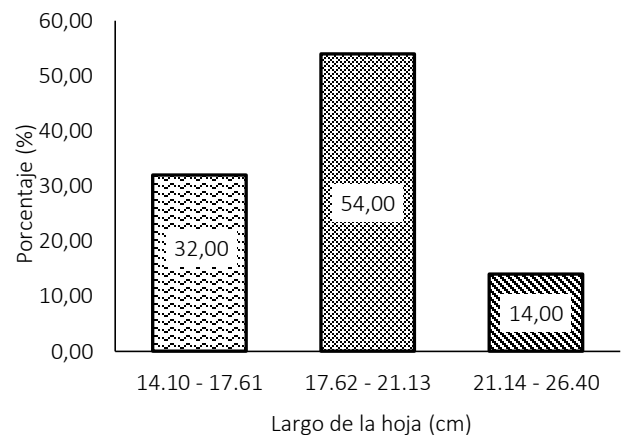


Figura 5. Distribución de frecuencias (%) para el largo de las hojas de cacao foráneo IMC67.

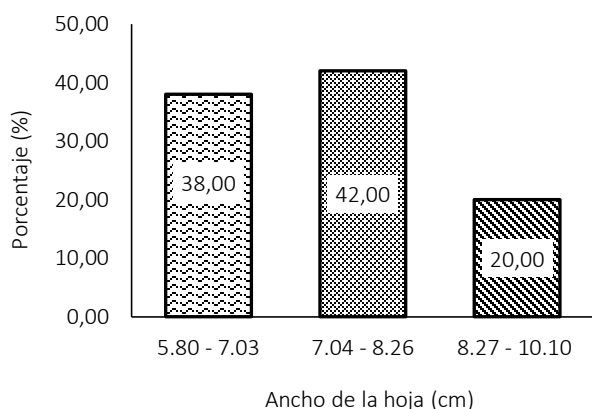


Figura 6. Distribución de frecuencias (%) para el ancho de las hojas de cacao foráneo IMC67.

Mediante el método indicado, las ecuaciones de regresión para la estimación del área foliar se muestran en la Tabla 1, observándose que todos los valores para el coeficiente de determinación R^2 se encuentran en el rango de 0.77 – 0.96. Por lo que entre el 77 y el 96% de la variabilidad de la variable Y (AF: área foliar) es explicada por las funciones de regresión explicadas en la Tabla 1. De esta manera, Casierra-Posada et al.

(2017) que obtuvieron valores entre el 77 y el 83%, señalan que las funciones calculadas son adecuadas para describir la relación entre las variables largo, ancho y largo por ancho.

Se determinaron modelos de la forma lineal simple considerando las variables Largo o Ancho y modelos del tipo múltiple (largo por ancho). En la Tabla 1 se muestra las ecuaciones determinadas para el cultivar del tipo Cacao Nacional Boliviano y del tipo Foráneo IMC 67. También fueron obtenidos los modelos para el conjunto de hojas de ambos tipos de cacao, a fin de determinar la conveniencia de una sola ecuación general para ambos tipos de cultivares.

Las muestras incluyeron los diferentes tamaños de hojas provenientes de todos los estratos de la planta. De forma similar a Astegiano et al. (2001) en su estudio para la estimación del área foliar en distintos cultivares de tomate encontraron que, al no hacer una distinción según el tamaño de las hojas, se evita la incertidumbre que presenta la separación de las hojas pequeñas de las grandes.

Tabla 3. Modelos de regresión para estimar el área foliar (AF) con base en el ancho (A) y largo (L) de la hoja de dos cultivares de cacao (*Theobroma cacao* L.).

Cultivar	Tipo de modelo	Modelo	R^2
CNB	Lineal simple	AF = 6.9926 L - 43.964	0.8942
	Lineal simple	AF = 22.503 A - 68.434	0.8988
	Múltiple	AF = 0.6623 L*A + 1.474	0.9660
CF	Lineal simple	AF = 7.8251 L - 48.89	0.7736
	Lineal simple	AF = 24.243 A - 77.886	0.7957
	Múltiple	AF = 0.6668 L*A + 5.1576	0.9486
CNB y CF (ecuación combinada)	Lineal simple	AF = 7.9632 L - 55.588	0.8515
	Lineal simple	AF = 23.862 A - 75.906	0.8832
	Múltiple	AF = 0.6877 L*A + 0.5189	0.9647

AF: Área foliar; L: Largo; A: Ancho; CNB: Cacao Nacional Boliviano; CF: Cacao Foráneo IMC67; R^2 : Coeficiente de determinación

Comparando los valores de los coeficientes de determinación para los diferentes tipos de cultivares de cacao y la combinación de hojas de ambos cultivares, se obtuvo que al utilizar el Ancho por el Largo (A*L), los coeficientes de determinación presentan mayores valores ($R^2=0.9660$, $R^2=0.9486$ y $R^2=0.9647$) en comparación a los valores de los coeficientes utilizando sólo el largo y el ancho (Tabla 1).

mayores en comparación a los valores obtenidos para el cacao foráneo y para la combinación de ambos cultivares. Los menores valores de R^2 se registraron para el cultivar foráneo al emplear como variables independientes el largo y ancho de hoja ($R^2=0.7736$ y $R^2=0.7957$, respectivamente), por lo que se puede inferir que este cultivar presenta mayor variabilidad en cuanto al tamaño y forma de sus hojas.

También se observa que los coeficientes de determinación para largo y ancho ($R^2=0.8942$ y $R^2=0.8988$) para el cacao Nacional Boliviano son

En los diferentes casos, el coeficiente de determinación es menor cuando se emplea sólo el largo de la hoja ($R^2=0.8942$, $R^2=0.7736$ y $R^2=0.8515$).

Ayala et al. (2009) obtuvieron un valor de $R^2=0.9605$ al relacionar el área foliar con la variable Largo de hojas de berenjena (*Solanum melongena* L.) cultivar “Criollo lila”, lo que indica que existen diferencias entre especies en cuanto a la relación lineal de las variables de las hojas. Pire y Valenzuela (1995) al estimar el área foliar de *Vitis vinifera* L. “French Colombard”, encontraron que la variable ancho se comportó mejor que el largo de la hoja al conferir un mejor ajuste en las ecuaciones, y se tuvo un efecto similar para el producto largo por ancho, como variable independiente

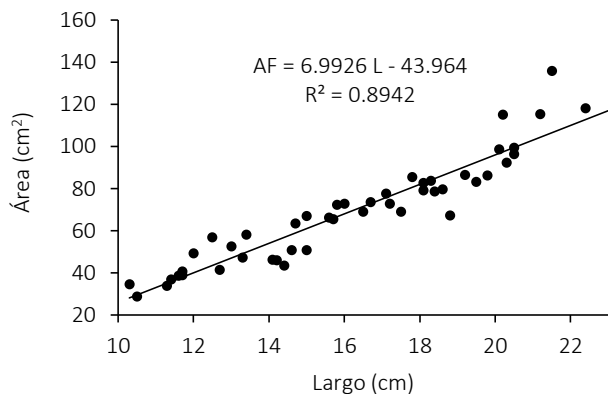


Figura 7. Ajuste para estimar el área foliar en hojas de Cacao Nacional (CNB) basada en el largo (L) de la hoja.

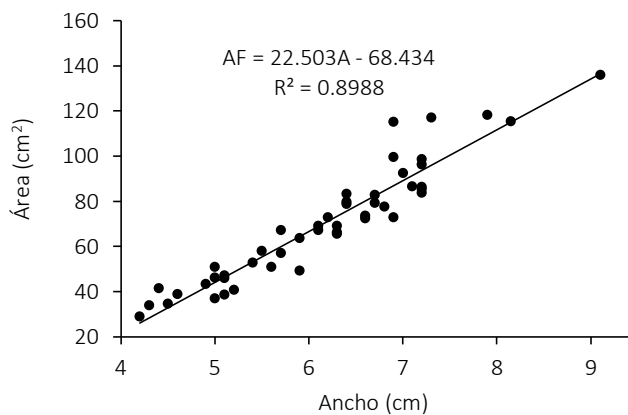


Figura 8. Ajuste para estimar el área foliar en hojas de Cacao Nacional (CNB) basada en el ancho (A) de la hoja.

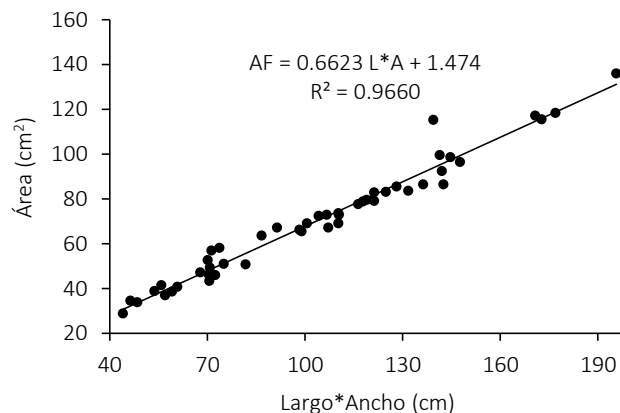


Figura 9. Ajuste para estimar el área foliar en hojas de Cacao Nacional (CNB) basada en el ancho*largo (A*L) de la hoja

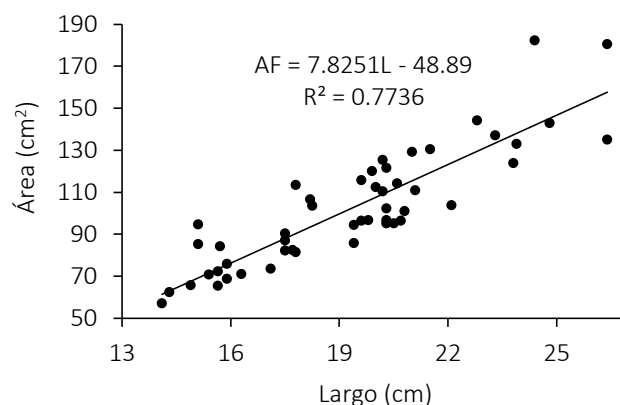


Figura 10. Ajuste para estimar el área foliar en hojas de cacao foráneo (CF IMC67) basada en el largo (L) de la hoja.

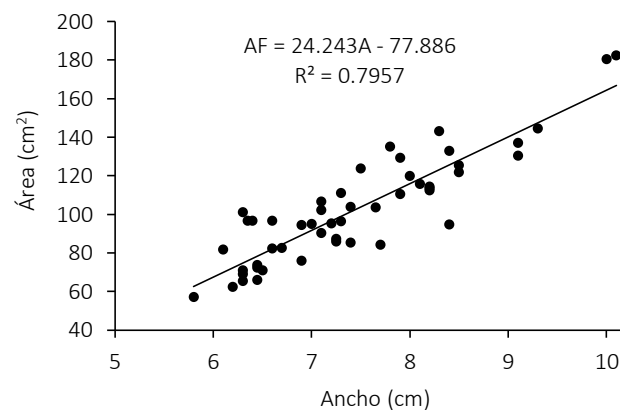


Figura 11. Ajuste para estimar el área foliar en hojas de cacao foráneo (CF IMC67) basada en el ancho (A) de la hoja.

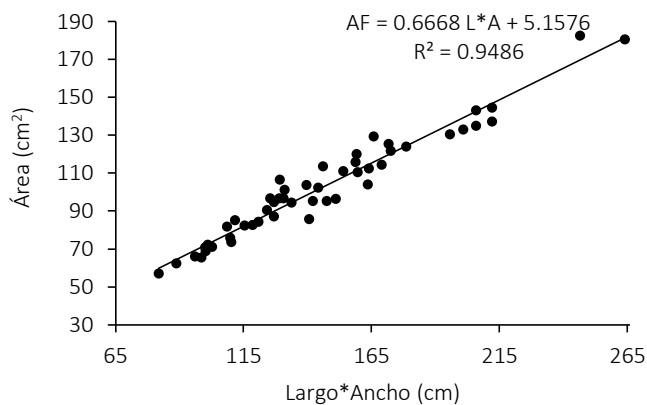


Figura 12. Ajuste para estimar el área foliar en hojas de cacao foráneo (CF IMC67) basada en el ancho*largo (A*L) de la hoja.

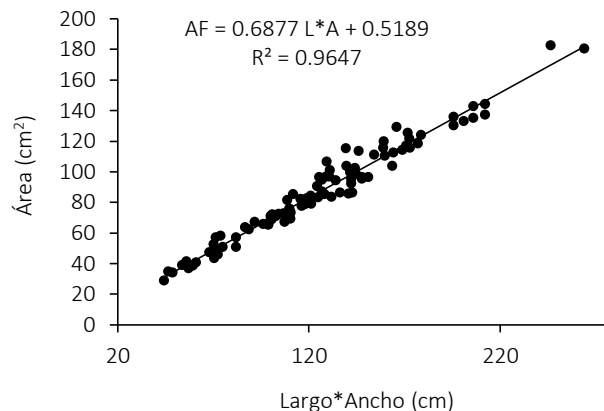


Figura 15. Ajuste para estimar el área foliar en hojas de cacao nacional (CNB) y cacao foráneo (CF IMC67) basada en el ancho*largo (A*L) de la hoja.

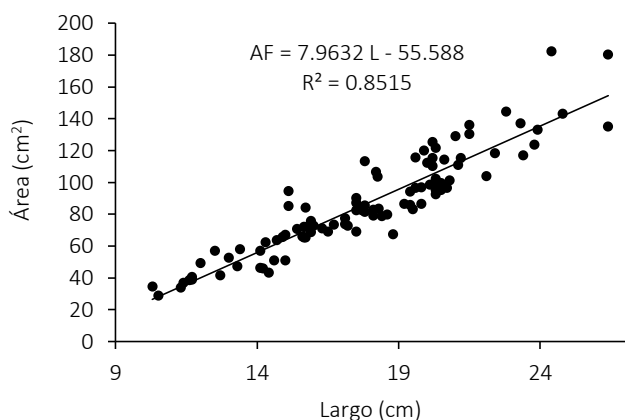


Figura 13. Ajuste para estimar el área foliar en hojas de cacao nacional (CNB) y cacao foráneo (CF IMC67) basada en el largo (L) de la hoja.

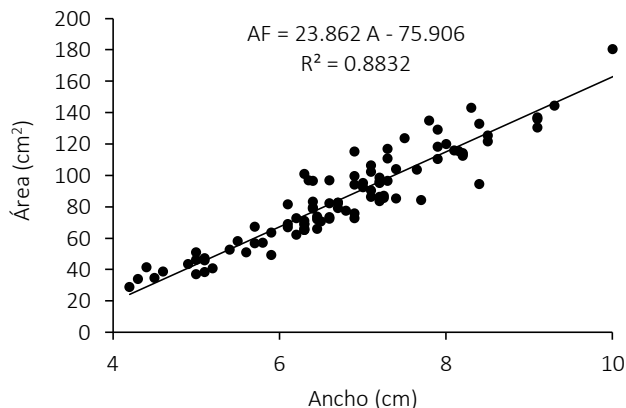


Figura 14. Ajuste para estimar el área foliar en hojas de cacao nacional (CNB) y cacao foráneo (CF IMC67) basada en el ancho (A) de la hoja.

Para el cacao Nacional Boliviano (CNB), los diagramas de dispersión muestran que existe una mayor cohesión de puntos al comparar el área foliar vs largo*ancho (Figura 7), mientras que se tiene una mayor dispersión para el área vs largo y área foliar vs ancho (Figuras 5 y 6, respectivamente). Por tanto, se observa un mejor ajuste para la estimación del área foliar con la variable largo*ancho. De esta forma, la ecuación $AF = 0.6623 L*A + 1.474$ se puede considerar válida para la estimación del área foliar, debido a que la variable largo por ancho explica la variación del área foliar en un 96.60% ($R^2=0.9660$).

En el caso del cacao foráneo IMC-67, la Figura 10 muestra una mayor cohesión de los puntos para el área foliar vs largo*ancho, en comparación a los diagramas que comparan el área vs largo y área vs ancho. Mostrándose que la ecuación $AF = 0.6668 L*A + 5.1576$ resulta como la mejor válida para la estimación del área foliar a partir de valores de largo y ancho de las hojas, al ser que la variable largo por ancho explica la variación del área foliar en un 94.86% ($R^2=0.9486$).

Para el caso del cacao Nacional (CNB) y el cacao foráneo (CF IMC67), de forma similar a los anteriores casos, se observa una mayor cohesión al comparar área foliar vs largo*ancho (Figura 13), en comparación al área foliar vs largo y área foliar vs ancho. De esta manera, la ecuación $AF = 0.6877 L*A + 0.5189$ se muestra como la mejor válida para la estimación del área foliar, dado que la variable largo por ancho explica la variación del área foliar en un 96.47% ($R^2=0.9647$).

Resultados similares fueron obtenidos por Ruiz-Espinoza et al. (2007) al obtener ecuaciones para la estimación no destructiva del área foliar en albahaca (*Ocimum basilicum* L.), siendo que los autores indicaban que es evidente que sólo las ecuaciones múltiples, basadas en el ancho por el largo de la hoja, estiman de forma eficiente el área foliar. Astegiano et al. (2001) también encontraron valores de R^2 que indicaban un buen ajuste para líneas de tendencia que relacionan las magnitudes de largo por ancho y área foliar. Cabezas-Gutierrez et al. (2009) en su estudio de relación entre el área foliar y medidas lineares de hojas de aliso (*Alnus acuminata* H.B.K), magle (*Escallonia pendula* Pers.) y roble (*Quercus humboldtii* Bompland), encontraron como mejor modelo el que relaciona el producto del largo por el ancho de la hoja, con coeficientes de determinación superiores a 0.95. Otros autores como Calderón et al. (2011) concluyeron como la mejor relación para estimar la superficie foliar el

largo por el ancho para plantines de mamey sapote [*Pouteria sapota* (Jacq.) H. E. Moore & Stearn] al obtener el mayor R^2 (0.8979), en comparación a las relaciones que emplearon sólo largo o ancho de hojas.

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran en los tres casos una mayor cohesión de puntos, tendencia rectilínea y la pendiente de forma aproximada a una relación 1:1 para las comparaciones del área foliar vs largo*ancho, evidenciándose una mejor capacidad de estimación del área foliar para los modelos múltiples. En el caso de las ecuaciones o modelos simples, que incluyen una variable (largo o ancho), los coeficientes de determinación son menores a los modelos múltiples (largo por ancho). Por tanto, para una mejor estimación del área foliar de hojas de cacao se hace necesario contar con dos mediciones (largo y ancho).

Tabla 4. Análisis de correlación de Pearson entre los datos observados y los datos estimados de área foliar en diferentes cultivares de cacao (*Theobroma cacao* L.).

Cultivar	Variable independiente	Correlación de Pearson (r)	RSME
CNB	Largo (L)	0.93	11.06
	Ancho (A)	0.95	8.99
	Ancho*Largo (A*L)	0.99	6.99
CF	Largo (L)	0.94	9.88
	Ancho (A)	0.88	12.74
	Ancho*Largo (A*L)	0.99	4.58
CNB y CF	Largo (L)	0.95	10.90
	Ancho (A)	0.94	11.20
	Ancho*Largo (A*L)	0.99	5.55

CNB: Cacao Nacional Boliviano; CF: Cacao Foráneo IMC67; RSME: Raíz cuadrada media del error expresada en cm^2

En la Tabla 2 se muestran los resultados del cálculo de los coeficientes de correlación de Pearson (r) para la validación entre los datos estimados con los modelos obtenidos y los datos medidos. También se realizó el cálculo de las raíces cuadradas medias del error (RSME).

Los valores del coeficiente de correlación oscilan entre 0.88 y 0.99 para los tres casos estudiados, mostrándose los mayores valores ($r=0.99$) para el área foliar y el producto del largo por el ancho de las hojas. No obstante, para los modelos que consideran las variables largo y ancho, los valores también se encuentran próximos a la unidad (mayores a 0.9), lo que indica una dependencia casi total, con excepción del modelo con la variable

ancho de hoja para el cacao foráneo IMC67. Casierra-Posada et al. (2017) también validaron funciones calculadas y reportaron resultados semejantes para datos observados y estimados para el área foliar y el producto del largo por el ancho de hojas relacionadas linealmente, para cuatro cultivares de ciruelo (*Prunus salicina*) y cuatro cultivares de durazno (*Prunus persica*), con valores que oscilaban entre 0.92 y 0.97. Los mismos autores mencionan que los rasgos funcionales de las hojas, como su forma, longitud y ancho, tienen fundamento genético y por tanto son estables y confiables para ser utilizadas con el propósito de proponer funciones matemáticas para la estimación del área foliar. En este mismo sentido, dado que el coeficiente de correlación de Pearson permite medir el grado de

asociación entre dos variables, al momento de validar el área foliar estimada con funciones matemáticas y el área foliar medida, es posible asumir que el área foliar estimada tiene un alto grado de ajuste con la realidad, especialmente al mostrar valores por encima de 0.9 (Casierra-Posada et al. 2017).

Los valores de RMSE para los modelos múltiples (largo*ancho) fueron los menores en los tres casos (RMSE=6.99, RMSE=4.58 y RMSE=5.55), demostrando que son los modelos que presentan mayor precisión para la estimación del área foliar en plantines de cacao en condiciones de vivero.

CONCLUSIONES

En las condiciones del presente estudio, los modelos que emplean la relación del Largo por el Ancho proporcionan una forma simple, rápida, no destructiva y confiable para la estimación del área foliar en hojas de plantines de cacao en condiciones de vivero, sin necesidad de eliminar las hojas o destruir las plantas.

Las ecuaciones encontradas, en las condiciones mencionadas permiten estimar el área foliar de plantines de cacao, empleando el largo por el ancho de la hoja, para diferentes estratos (alto, medio y bajo) en los plantines de cacao. Las ecuaciones $AF = 0.6623 L * A + 1.474$; $AF = 0.6668 L * A + 5.1576$ y $AF = 0.6877 L * A + 0.5189$ estiman mejor el área foliar para hojas de cacao Nacional Boliviano (CNB), cacao foráneo (CF IMC67) y la combinación de ambas, respectivamente.

La selección de las ecuaciones a utilizarse queda sujeta al grado de exactitud que se requiera, pudiendo diferenciarse según el cultivar o la variable a ser empleada, ya sea el largo, ancho o el largo por el ancho para estimar el área foliar, quedando a criterio de los investigadores el empleo de los modelos.

El uso de este método no destructivo permitiría la estimación rápida del área foliar, para su utilización en campo, vivero o laboratorio, dado que las dimensiones largo y ancho se pueden medir fácilmente.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Estación Experimental Sapecho, a el área del Vivero, locaciones donde fueron obtenidas las muestras para la realización del presente estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Astegiano, E.D., Favaro, J.C., Bouzo, C.A. (2001). Estimación del área foliar en distintos cultivares de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) utilizando medidas foliares lineales. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.* 16(2)
- Calderón, A.P.; Calderón, M.V.; Fundora, L.R.S. y Jerez, E.M. (2011). Estimación de área foliar en posturas de mamey (*Pouteria sapota* (Jacq) en fase de vivero, a partir de las medidas lineales de las hojas. *Cultivos Tropicales*, 32(2), 30 -34. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193222422005>
- Ayala, C. E. C., Tatis, H. A., & Barrera, C. (2009). Modelo para Estimación de Área Foliar en Berenjena (*Solanum melongena* L) Basado en Muestreo no Destructivo. *Temas Agrarios*, 14(2), 14-22.
- Cabezas-Gutiérrez, M.; Peña, F.; Duarte, H.W.; Colorado, J.F.; Silva, R.L. (2009). Un modelo para la estimación del área foliar en tres especies forestales de forma no destructiva. *Revista U.D.C.A. Actualidad y Divulgación Científica*, 12(1), 121-130.
- Casierra, F. P.; Zapata, C.V.; Cutler, J. (2017). Comparación de métodos directos e indirectos para la estimación del área foliar en duraznero (*Prunus persica*) y ciruelo (*Prunus salicina*). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 30 – 38. <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.6143>
- Interdonato, R.; Romero, J.I; Bas Nahas, S.S.; Roberti, J.O.; Rodríguez, J.A. y Romero, E.R. (2015). Estimación no destructiva del área foliar por planta en sorgos bioenergéticos. *Rev. Agron. Noroeste Argent.*, 35 (1), 51 – 53.
- Maldonado, F. C. (2016). Genotipos de cacao en Alto Beni Bolivia: Catálogo de selecciones locales de cacao, *Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal*, 134 p.

- Meza, N. y Bautista, D. (1999). Estimación del área foliar en plantas jóvenes de níspero (*Manilkara achras* [Miller] Fosberg) sometidas a dos ambientes de luz. *Bioagro* 11(1): 24 – 28.
- Montoya, E.C.R.; Hernández, J.D.A.; Unigarro, C.A.M. y Flores, C.P.R. (2017). Estimación del área foliar en café variedad Castillo a libre exposición y su relación con la producción.
- Pire, R. C. y Valenzuela, I. (1995). Estimación del área foliar en *Vitis vinifera* L. “French colombar” a partir de mediciones lineales en las hojas. *Agronomía Trop.* 45(1), 143- 154.
- Razquin, C.J.; G.A. Maddonni y C.R.C Vega. (2017). Estimación no destructiva del área foliar en plantas individuales de maíz (*Zea mays* L.) creciendo en canopeos. *Agriscientia* 34: 27-38
- Ruiz-Espinoza, F. H.; Murillo-Amador, B.; García-Hernández, J. L.; Troyo-Diéguez, E.; Palacios-Espinoza, A.; Beltrán-Morales, A.; Fenech-Larios, L.; Zamora-Salgado, S.; Marrero-Labrador, P.; Nieto-Garibay, A.; Cruz de la Paz, O. (2007). Mediciones lineales en la hoja para la estimación no destructiva del área foliar en albahaca (*Ocimum basilicum* L.), 13 (1), 29-34.
- Sánchez, V.; Zambrano, J. L.; Iglesias, C.; Rodríguez, E.; Villalobos, V.; Díaz, F. J.; Carrillo, N.; Gutierrez, A.; Camacho, A.; Rodríguez, O. (2019). La Cadena de Valor del Cacao en América Latina y el Caribe: Cacao 2030 – 2050, FONTAGRO, 104 p.
- Ticona J., Manzaneda F., Cortes H., Chungara V., Oviedo E., Albarracin W. (2017). Investigación y formación, “Pilares del Desarrollo Productivo Sostenible. La Paz – Bolivia.
- Villegas, R.C.; Astorga, C.D.(2005). Caracterización morfológica del cacao Nacional Boliviano, Alto Beni, Bolivia. *Agroforestería de las Américas*, (43-44), 81-85.