

Métodos no destructivos de estimación del área foliar de hojas individuales en dos híbridos de sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]

Jorge O. Roberti*, Santiago S. Bas Nahas*, Juan I. Romero**, Roque Interdonato*, Roque F. Budeguer*, Maria E. Amado*, Juan A. Rodriguez Rey* y Eduardo R. Romero***

RESUMEN

Se estudiaron dos métodos no destructivos de estimación del área de hojas individuales (AFi) en dos híbridos de sorgo azucarado [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. Se trabajó con muestras de 435 y 497 láminas foliares de Argensil 165 Bio y Padrillo, respectivamente, extraídas en sucesivos estadios fenológicos. En cada lámina, se midieron el largo y el ancho máximo y, además, se determinó el área foliar patrón (AFP). Los datos del AFP en función del largo (método 1) y del largo por el ancho máximo de la lámina (método 2) se sometieron a un análisis de regresión para determinar las ecuaciones de mejor ajuste. Los resultados indicaron que en Padrillo, el modelo para el método 1 fue $AFi = 0,260 * \text{largo}^{1.661}$ ($R^2: 0,905$) y para el método 2 fue $AFi = 0,722 * (\text{largo} \times \text{ancho máximo})$ ($R^2=0,986$). En Argensil 165 Bio, la función para el método 1 fue $AFi = 0,205 * \text{largo}^{1.743}$ ($R^2: 0,927$) y, para el método 2, $AFi = 0,7370 * (\text{largo} \times \text{ancho máximo})$ ($R^2=0,983$). En ambos híbridos, el método 2 otorgó la mayor precisión y el test de comparación de las pendientes indicó que debe emplearse el modelo específico para cada híbrido.

Palabras clave: sorgo dulce, métodos de medición de área foliar.

ABSTRACT

Nondestructive methods for estimating individual leaf area of two sweet sorghum hybrids

Two nondestructive methods for estimating the individual leaf area (AFi) of two sweet sorghum hybrids [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] were studied. Samples of 435 and 497 leaf blades of Argensil 165 Bio and Padrillo, respectively, were extracted in successive phenological stages. In each leaf blade, length and maximum width were measured and leaf area pattern (AFP) was determined. AFP data in function of length (method 1) and length by maximum width of leaf blade (method 2) were analyzed by regression analysis to determine the best adjusted equations. Results indicated that for Padrillo, the model for method 1 was $AFi = 0.260 * \text{length}^{1.661}$ ($R^2 = 0.905$), and for method 2, $AFi = 0.722 * (\text{length} \times \text{maximum width})$ ($R^2 = 0.986$). In the case of Argensil 165 Bio, the function for method 1 was $AFi = 0.205 * \text{length}^{1.743}$ ($R^2 = 0.927$), whereas for method 2 it was $AFi = 0.737 * (\text{length} \times \text{maximum width})$ ($R^2 = 0.983$). For both hybrids, method 2 was the most precise and the slope comparison test indicated that it is necessary to use the specific models for each hybrid.

Key words: sweet sorghum, leaf area measurement methods.

*Office of Arid Lands Studies, University of Arizona, USA. rayerza@ag.arizona.edu

INTRODUCCIÓN

La estimación del área foliar de una planta constituye un requisito importante para realizar estudios ecofisiológicos, por su relación con la intercepción de la radiación solar, el proceso fotosintético y la transpiración; además constituye un parámetro útil para evaluaciones de daños por granizo o plagas (Stickler *et al.*, 1961; Pandey and Singh, 2011).

Para su determinación, existen diversos procedimientos destructivos y no destructivos, cuya utilización dependerá del objetivo de la medición, del nivel de precisión deseado, del cultivo, de la cantidad de determinaciones a realizar y de los recursos disponibles (económicos y de infraestructura).

Entre las estimaciones no destructivas más sencillas en especies gramíneas, se destaca el empleo de funciones matemáticas simples, fundamentadas en que el área de cada lámina foliar guarda una estrecha relación con sus dimensiones lineales (largo y/o ancho) y definidas mediante la determinación de modelos específicos para cada especie y/o genotipo. Pandey and Singh (2011) citan el empleo, en maíz, del producto entre el largo y el ancho máximo de la lámina foliar por un coeficiente de ajuste de 0,750.

Igual procedimiento fue evaluado en sorgo granífero por Stickler *et al.* (1961), quienes determinaron un coeficiente de corrección de 0,747, mientras que Solórzano (1976) utilizó un coeficiente de 0,700 en otros cultivares. En caña de azúcar, también se ajustó este método con un coeficiente de corrección de 0,660 para el cultivar LCP 85-384 y de 0,750 en otras variedades (Brito *et al.*, 2003).

En los últimos años se ha incrementado la atención en los cultivos energéticos, es decir aquellos dedicados a la producción de biomasa y biocombustibles. Entre estos se destaca el sorgo dulce, azucarado o sacarino, *Sorghum bicolor* (L.) Moench, que se caracteriza por su elevado potencial para proporcionar productos bioenergéticos (Romero *et al.*, 2011).

Disponer de métodos sencillos y no destructivos para determinar el área foliar de sorgos dulces bioenergéticos facilitará la realización de estudios ecofisiológicos orientados a optimizar su manejo.

El objetivo de este trabajo fue evaluar y seleccionar modelos matemáticos simples y no destructivos para la estimación del área de hojas individuales de dos híbridos comerciales de sorgo azucarado, a partir de la medición del largo y del ancho máximo de la lámina foliar.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material foliar se extrajo de un ensayo en bloques al azar con tres réplicas que comparaba dos híbridos comerciales de sorgo azucarado, Argensil 165

Bio (Argenetics Semillas) y Padrillo (Tobin), establecido por la Cátedra de Fisiología Vegetal en el campo experimental de la Facultad de Agronomía y Zootecnia de la Universidad Nacional de Tucumán (UNT), ubicado en El Manantial, Depto. Capital, Tucumán, R. Argentina (26° 50' 6,9" S – 65° 16' 44,6" O). La siembra se realizó el 22 de diciembre de 2011, con una densidad de 12 plantas por m lineal y a una distancia entre líneas de 52 cm.

La extracción de las muestras foliares se inició el 7/01/2012, cuando las plantas establecieron tres hojas verdes liguladas (fase 1) y se repitieron posteriormente cada 15 días en cinco oportunidades, hasta que el cultivo alcanzó la fase 5, de planta embuchada (Sánchez Ducca *et al.*, 2012).

En cada fecha se extrajeron, de cada híbrido, tres muestras al azar compuestas cada una por la totalidad de plantas establecidas en un metro lineal. De cada planta se extrajeron las láminas foliares de las hojas verdes con lígula visible, en las que se midió el largo y el ancho máximo, determinándose sus áreas mediante el programa ImageJ, de acceso libre (Rasband, 1997), que permite calcular el área de una figura a partir de una imagen digital, acompañada de una escala de referencia. A tal efecto, se tomaron fotografías digitales de cada lámina foliar en evaluación y se procedió a calcular su área, constituyéndose el área foliar patrón (AFP).

En total, se evaluaron 435 láminas foliares de Argensil 165 Bio y 497 de Padrillo. En Argensil 165 Bio, la muestra incluyó un rango de variación desde 6,4 cm a 102,5 cm para el largo, de 0,5 cm a 10,7 cm para el ancho máximo y desde 2,6 cm² a 745,5 cm² para el AFP. En Padrillo, el largo varió de 9,0 cm a 111,5 cm, de 0,7 cm a 10,0 cm para el ancho máximo y de 5,07 cm² a 683,80 cm² para el AFP.

Con dicha información se evaluaron dos métodos no destructivos (Brito *et al.*, 2003; Pandey and Singh, 2011; Solórzano, 1976; Stickler *et al.*, 1961).

Método 1: se determina el área foliar individual (AFi) a partir del largo foliar, según el modelo de regresión de mejor ajuste.

Método 2: se determina el AFi a partir del producto del largo por el ancho foliar máximo, definido según el modelo de regresión de mejor ajuste.

En ambos casos, las ecuaciones de mejor ajuste fueron elegidas según el valor y la significación de R² (mayor al 90%), sobre la base de la observación gráfica de la variabilidad de los valores observados y calculados. En los modelos seleccionados, se estimaron los límites fiduciales correspondientes al 95% de probabilidad.

En el método 1, la ecuación elegida correspondió a un modelo exponencial del tipo $y = a * x^b$, donde y correspondió al AFi y x al largo foliar.

En el método 2, la ecuación seleccionada correspondió a un modelo lineal sin ordenada al origen del

tipo $y = b \cdot x$, donde y correspondió al AFi, x al producto del largo x el ancho máximo y b a la pendiente, que estableció el valor del coeficiente de corrección foliar (CCF). Este coeficiente, que define la relación entre el AFP y el producto del largo por el ancho máximo, se calculó para cada hoja en cada híbrido y se estableció el valor observado del CCF, evaluando su repetibilidad y considerando la variabilidad en la población muestral.

Asimismo, para evaluar la posibilidad de emplear el mismo CCF para la estimación del AFi de ambos materiales genéticos, se realizó la comparación estadística de las pendientes (CCF) de las ecuaciones seleccionadas, a través de una prueba T-Student.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figuras 1 y 2 se presentan los modelos seleccionados para el método 1 en cada híbrido evaluado,

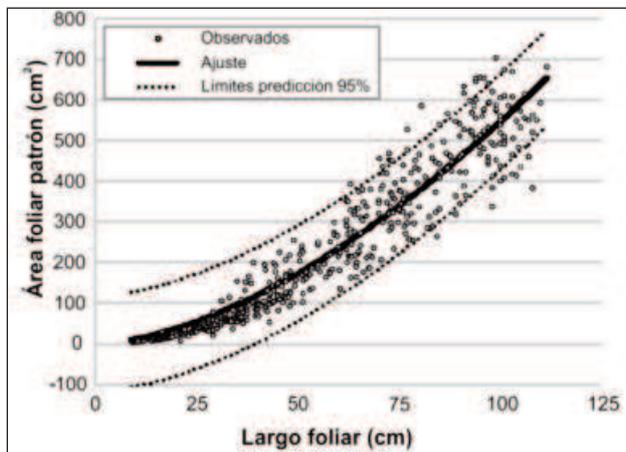


Figura 1. Relación entre el área foliar patrón y el largo de la lámina de hojas individuales del híbrido comercial Padrillo. Se incluyen la ecuación de regresión obtenida, el coeficiente de determinación y los límites fiduciales.

incluyendo las ecuaciones correspondientes, el R^2 y los límites fiduciales.

Las funciones de mejor ajuste para el método 1 en ambos materiales correspondieron a un modelo exponencial. Las ecuaciones seleccionadas fueron, para Padrillo, $Afi = 0,260 \times \text{largo}^{1,6608}$ y, para Argensil 165 Bio, $Afi = 0,2054 \times \text{largo}^{1,7434}$. Ambos modelos seleccionados presentaron elevados coeficientes de determinación, con el largo de la lámina explicando el 90% y 93% de la variación del AFP de hojas individuales de Padrillo y Argensil 165 Bio, respectivamente.

Considerando el método 2, en las Figuras 3 y 4 se observan los modelos de ajuste seleccionados para cada híbrido. La función matemática en ambos materiales correspondió a un modelo lineal (con la ordenada al origen forzada a cero) y el producto del largo x ancho máximo explicó más del 98% (R^2) de la variación del AFP en ambos materiales en estudio; esto permitió efectuar una

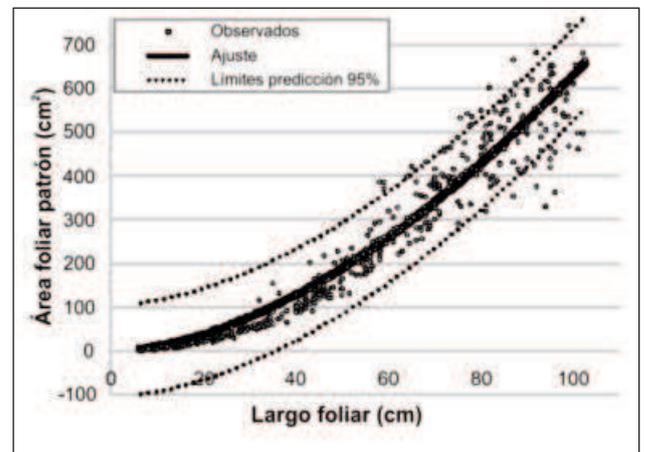


Figura 2. Relación entre el área foliar patrón y el largo de la lámina de hojas individuales del híbrido comercial Argensil 165 Bio. Se incluyen la ecuación de regresión obtenida, el coeficiente de determinación y los límites fiduciales.

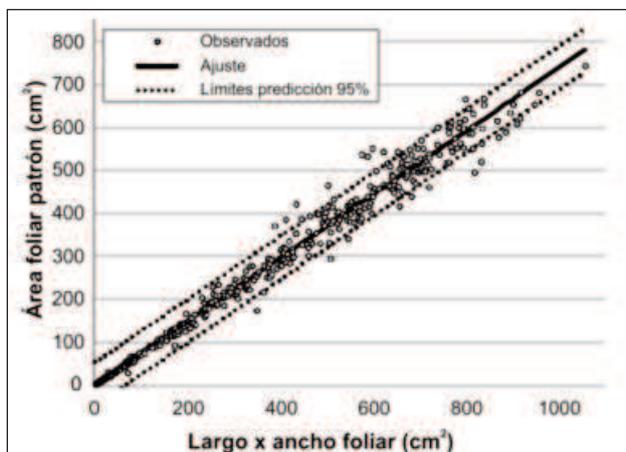


Figura 3. Relación entre el área foliar patrón y el producto del largo por el ancho máximo de hojas individuales del híbrido comercial Argensil 165 Bio. Se incluyen la ecuación de regresión, el coeficiente de determinación y los límites fiduciales.

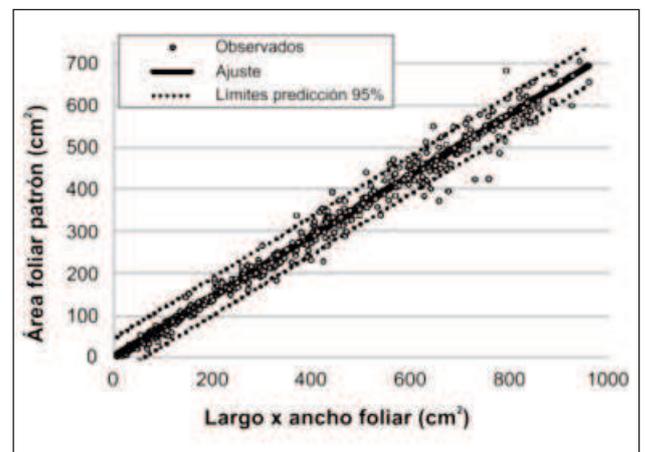


Figura 4. Relación entre el área foliar patrón y el producto del largo por el ancho máximo en hojas individuales del híbrido comercial Padrillo. Se incluyen la ecuación de regresión obtenida y el coeficiente de determinación.

estimación simple y precisa del área foliar de hojas individuales en ambos híbridos durante todo el ciclo de desarrollo del cultivo.

Para el método 2, las ecuaciones de estimación del AFi fueron las siguientes: para Padrillo, **AFi = 0,722 x (largo x ancho máximo)** y para Argensil 165 Bio, **AFi = 0,737 x (largo x ancho máximo)**.

En la Figura 5 se observa el comportamiento del CCF de las 497 y 435 hojas evaluadas en Padrillo y Argensil 165 Bio, respectivamente, en función de la variación del AFP individual. En ambos materiales, el ajuste del CCF no resultó significativo, la pendiente no difirió de cero y el valor de la ordenada al origen resultó similar al CCF determinado mediante el análisis de regresión, demostrando su elevada estabilidad en el amplio rango de dimensiones y áreas foliares medidas en las sucesivas fases fenológicas evaluadas.

Por último, se procedió a comparar estadísticamente las pendientes (CCF) de las funciones definidas en cada material genético estudiado (Tabla 1).

Se determinó que existen diferencias significativas entre las pendientes de ambas ecuaciones, por lo que el valor del CCF resultó específico de cada híbrido estudiado; deberá utilizarse el modelo específico para cada híbrido a fin de mantener la precisión de la estimación. Este comportamiento estaría posiblemente asociado a diferencias en las relaciones dimensionales de las láminas foliares de cada genotipo en los distintos estadios fenológicos.

Por lo tanto, el método 2 ofrece una mayor precisión, siempre que se utilice el CCF específico de cada híbrido, mientras que el método 1 (de menor precisión) resultará de mayor practicidad cuando se necesite realizar un gran número de mediciones en campo.

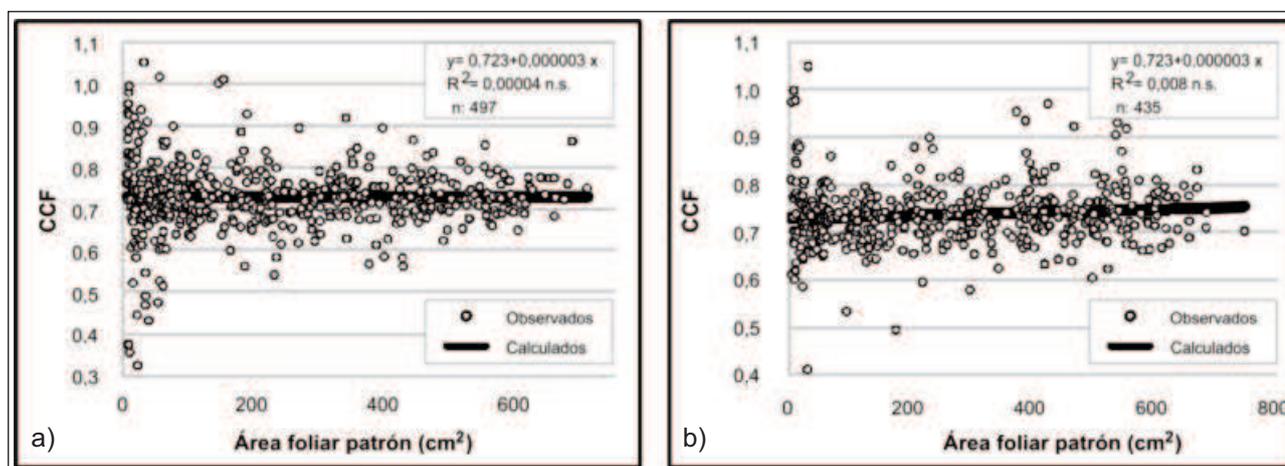


Figura 5. Variación del coeficiente de corrección foliar (CCF) en función del área foliar patrón: A) Padrillo y B) Argensil 165 Bio.

Tabla 1. Prueba T-Student utilizada para comparar las pendientes (CCF) de los modelos de regresión obtenidos para cada híbrido de sorgo dulce.

Prueba de comparación de coeficientes de las dos regiones con los datos ORIGINALES						
Tratamiento	$\sum X^2$	$\sum XY$	$\sum XY^2$	Res. SS	Res. DF	b
Argensil	1712237,25	8737308,6	47653070	3E+06	433	5,103
Padrillo	1968633,40	9158072,5	46109495	4E+06	495	4,652
Common regre.	3680870,65	17895381,0	93762566	7E+06	929	4,862

Test para diferencias entre pendientes			
S2 YX	7084,04027		
Sb1-b2	0,087953315		
t calculado	5,12620718		
t _{0,05 gl=}	1,96	t _{0,01 gl=}	2,58
Conclusión	DIF.	Conclusión	DIF.

BIBLIOGRAFIA CITADA

- Brito, E.; E. R. Romero; S. Casen y L. Alonso. 2003.** Estimación no destructiva del área foliar de hojas individuales de caña de azúcar, variedad LCP 85-384. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* 80 (1-2): 1-4.
- Pandey, S. K. and H. Singh. 2011.** A simple, cost-effective method for leaf area estimation. *J. of Botany*. [En línea]. Volume 2011, Article ID 658240. Disponible en <http://www.hindawi.com/journals/jb/2011/658240/> (consultado 11 septiembre 2013).
- Rasband, W. 1997.** ImageJ. [En línea]. Disponible en <http://rsb.info.nih.gov/ij/> (consultado 8 agosto 2012). National Institutes of Health, Bethesda, USA.
- Romero, E. R.; G. J. Cárdenas; M. Ruiz; S. Casen; P. Fernández González; A. Sánchez Ducca; B. S. Zossi; G. De Boeck; C. Gusils; J. Tonatto; M. Medina; R. Caro y J. Scandaliaris. 2011.** Integración del sorgo azucarado a la cadena de aprovechamiento bioenergético de la caña de azúcar en Tucumán, R. Argentina. *Avance Agroind.* 33 (1): 13–17.
- Sánchez Ducca, A.; E. R. Romero; S. D. Casen; P. Fernández González; M. M. Medina y M. J. Tonatto. 2012.** Fenología asociada a criterios de manejo de sorgos bioenergéticos. *Avance Agroind.* 33 (4): 37-42.
- Solórzano, P. R. 1976.** Determinación del área foliar en sorgo granero (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) a diferentes edades. *Agronomía Tropical* 26 (1): 39-45.
- Stickler, F. C.; S. Wearden and A. Pauli. 1961.** Leaf area determination in grain sorghum. *Agron. J.* 53 (3): 187-188.