

Morfología foliar y del grano de *Glycine max* L. mediante imágenes digitales

Carlos Patricio Saucedo-Acosta¹
Franklin Gerardo Rodríguez-Cota²
Alberto Borbón-Gracia³
Hugo Beltrán-Peña¹
Juan Fernando Sánchez-Portillo¹
Raúl Hipólito Saucedo-Acosta^{2,§}

1 Universidad Autónoma de Sinaloa-Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte. Calle 16 Av. Japaraqui S/N, Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa, México. CP. 81110. (sucedap@uas.edu.mx; hugobeltran@uas.edu.mx; fernando.sanchez@uas.edu.mx).

2 Campo Experimental Valle del Fuerte-INIFAP. Carretera Internacional México-Nogales km 1609, Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa, México. CP. 81110. (rodriguez.franklin@inifap.gob.mx).

3 Campo Experimental Norman E. Borlaug-INIFAP. Calle Norman E. Borlaug km 12, Valle del Yaqui, Ciudad Obregón, Sonora, México. CP. 85000. (borbongracia@hotmail.com).

Autor para correspondencia: saucedo-raul@hotmail.com

Resumen

La morfología foliar y del grano de soya (*Glycine max* L.) es necesaria para identificar variedades y explicar su comportamiento agronómico, pero requiere medición cuantitativa y fácil de obtener. Lo anterior puede solventarse mediante análisis de imágenes digitales (AID), por ello se implementó para evaluar la morfología foliar y del grano en las variedades Cajeme, Guayparime S-10 y Harbar '88. El AID se automatizó en ImageJ 1.51t para medir, en folíolos (cm) y granos (mm), el tamaño, longitud, anchura, circularidad y color. También se midió el área foliar específica (AFE, $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$), área total del grano (AT, mm^2), número de vainas (NVP) y granos por planta (NGP), peso hectolítrico (PHE, kg hl^{-1}) y de 100 granos (PCG, g). El folíolo central presentó forma elíptica, mayor tamaño y AFE ($p \leq 0.05$), mientras que los laterales fueron ovalados. El área del folíolo (AF) se correlacionó ($p \leq 0.01$) con la longitud, la anchura y su producto ($r \# 0.93$). Cajeme mostró diferente color foliar ($p \leq 0.01$), Guayparime S-10 tuvo mayor AF, PHE, NVP y NGP, pero grano de menor: tamaño, longitud y anchura ($p \leq 0.01$). El PCG se asoció ($p \leq 0.01$) con: AT ($r_s = 0.89$), tamaño ($r_s = 0.88$), longitud y anchura del grano ($r_s \leq 0.71$) y con tamaño foliar ($r_s = -0.5$). Harbar '88 mostró grano más brillante y Guayparime S-10 grano más pequeño ($p \leq 0.01$). La circularidad del folíolo facilita la clasificación objetiva de la forma. El AID es útil para el fenotipaje, permite identificar diferencias en folíolos y granos de las variedades Cajeme, Guayparime S-10 y Harbar '88.

Palabras clave:

Glycine max, color, forma, ImageJ, tamaño.



License (open-access): Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia **Creative Commons**

Introducción

La morfología foliar y del grano de soya (*Glycine max* L.) es importante en fitomejoramiento, fisiología y nutrición vegetal. El área, forma y peso foliar se relacionan con distribución de luz, eficiencia fotosintética (Krisnawati y Adie, 2017; Schwerz *et al.*, 2019), tolerancia a sequía y rendimiento (Jun *et al.*, 2014). El color foliar indica sanidad y nutrición (Kumar *et al.*, 2017). El tamaño, forma y color del grano se asocian con rendimiento y calidad, permiten su clasificación y estudiar su heredabilidad (Hu *et al.*, 2013), útiles para diseñar de equipos de recolección y procesamiento (Rehal *et al.*, 2019).

La forma de los folíolos y del grano se estima cualitativamente y se cuantifica mediante la relación entre longitud y ancho (Krisnawati y Adie, 2017; Liang *et al.*, 2016). El color foliar se asocia con lecturas del SPAD 502[®] (Sauceda *et al.*, 2017a) y el del grano con colorímetros (Rehal *et al.*, 2019). El grosor, tamaño y variación de color foliar limitan las lecturas del SPAD 502[®] y obligan el incremento de repeticiones (Sauceda *et al.*, 2017a), situación similar ocurre con los colorímetros para grano (Yousif, 2014).

El área foliar se estima con modelos de regresión basados en la longitud del folíolo central (Richter *et al.*, 2014) y se mide con LI-COR 3000 (Schwerz *et al.*, 2019). La medición cuantitativa es lenta y tediosa, aun con calibradores digitales (Liang *et al.*, 2016; Richter *et al.*, 2014). La variabilidad foliar restringe utilizar un modelo general para estimar área (Richter *et al.*, 2014). El LI-COR 3000 mide sólo área foliar y con inconvenientes que requieren repetir o impiden la medición (Sauceda *et al.*, 2017a).

El registro visual de la morfología foliar y del grano es fácil y rápido, pero subjetivo, con baja repetitividad y propenso a errores, por ello la UPOV sugiere descripción cuantitativa mediante análisis de imágenes digitales (AID), el cual es poco utilizado (UPOV, 2013). El AID es opción económica al realizarse con escáner y programas libre (Jun *et al.*, 2014), aunque requiere automatización para mayor eficiencia, precisión y facilitar su adopción.

Por lo anterior, se utilizó AID para evaluar la morfología de folíolos y grano de soya, con la hipótesis de que los atributos obtenidos con AID automatizado en ImageJ 1.51t permitirán constatar diferencias entre variedades.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en el Campo Experimental Valle del Fuerte del INIFAP, México, con un suelo arcillo-arenoso. Las variedades de soya Cajeme, Guayparime S-10 y Harbar '88 se evaluaron en suelo arcillo-arenoso, profundo, sin salinidad. El diseño experimental fue de bloques al azar con cuatro repeticiones. La parcela consistió de cuatro surcos con separación de 80 cm y longitud de cinco metros.

La recolecta de hojas frescas maduras fue al azar, durante el llenado de grano, los folíolos se clasificaron de acuerdo con su posición (central, izquierdo y derecho) en la hoja, vista por el haz y con el folíolo central hacia arriba. La digitalización fue con un escáner Epson CX3900, para los folíolos se utilizó fondo blanco y para granos uno color negro. El formato de las imágenes fue jpeg a color, con resolución de 300 pixeles por pulgada (ppp).

El análisis de imágenes digitales (AID) se automatizó con ImageJ 1.51t (Sauceda *et al.*, 2017a) para medir color, tamaño, longitud, ancho y circularidad de folíolos (cm) y granos (mm). El color foliar se midió en RGB y el del grano en Lab. También se midió el color del grano con un colorímetro HunterLab MiniScan, modelo EZ Plus 4500-L (Hunter Associates Laboratory Inc., Reston, Virginia, USA).

La forma del folíolo se clasificó en lanceolada, elongada, elíptica y ovalada, con base en el cociente entre la longitud y anchura del folíolo (CLAF) y en la circularidad de los folíolos laterales y del central representados en las guías de pruebas de distinción, homogeneidad y estabilidad (DHE) para variedades de soya, provistas por la UPOV (UPOV, 1998; 2017).

El producto entre la longitud y la anchura (LAF) de los folios: central, derecho, izquierdo y el promedio de los tres (CDI) junto con su área foliar se usaron para generar modelos de regresión lineal con intercepto forzado a cero, por su mayor explicación biológica (Richter *et al.*, 2014). El AFE por folíolo ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$) se calculó en 57 muestras por variedad, la biomasa (g) se obtuvo después de 72 h de secado a 65°C .

La longitud, anchura y grosor de 60 granos por variedad se midió con vernier digital marca Truper™ (precisión= 0.01 mm) para obtener, por analogía a una esfera, el diámetro geométrico medio ($D_g = (\text{largo} \times \text{ancho} \times \text{grosor})^{1/3}$) y estimar el área total del grano (AT, mm^2) con la ecuación: $AT = \pi D_g^2$ (Rehal *et al.*, 2019). También fue para comparar las dimensiones y el tiempo (s) requerido en medirlas con vernier y AID.

El número de vainas y de granos en diez plantas se obtuvo de cada variedad, en éstos se midió el tamaño del grano de la mitad superior e inferior de la planta. El tamaño del grano se relacionó con el peso de 100 granos (PCG, g) y con el peso del grano por planta (PGP, g). La obtención del peso fue con una balanza Ohaus SC2020 Scout® II.

El peso hectolítrico (PHE, kg hl^{-1}) y la humedad del grano (%) se obtuvieron con un analizador de granos marca Dickey-John, modelo GAC2000. El análisis de los datos se realizó con el programa Past 3.18 (Hammer *et al.*, 2001), se constató normalidad (Shapiro-Wilks), homocedasticidad (Levene) e independencia de los residuos (Durbin-Watson). El área de folíolo se transformó a raíz cuadrada.

El ANDEVA y comparación de medias (Tukey, $p \leq 0.01$) se realizó para el área, longitud y anchura del folíolo, también para el tamaño y longitud del grano. La prueba de t para muestras independientes se utilizó para comparar la anchura del grano de la parte media superior e inferior de la planta. La correlación de Pearson (r) se realizó entre el área del folíolo con su longitud, anchura y el LAF, los modelos generados para estimar el área foliar se evaluaron mediante el coeficiente de determinación (R^2), el error relativo medio (ERM) y la raíz del error cuadrático medio (RECM).

La correlación de Pearson (r) se realizó entre el tamaño del grano, el AT, la longitud, el producto (LAG) y el cociente entre longitud y anchura del grano (CLAG), número de vainas y granos por planta, también entre el área promedio de los tres folíolos y el PCG. La falta de normalidad para: la circularidad y el color de ambos órganos, en el CLAF, anchura del grano y el PCG, motivó utilizar el ANDEVA de Kruskal-Wallis y la prueba de Dunn para la comparación múltiple entre los rangos medios por pares de muestras.

La prueba de Mann-Whitney se utilizó para evaluar el tamaño, longitud, circularidad y color del grano de la parte media superior e inferior de la planta. La prueba de Wilcoxon para comparar el color del grano medido con el colorímetro y con AID. La correlación de Spearman (r_s) se realizó entre el AT, tamaño, longitud, anchura y el PCG y, además, entre el CLAF y la circularidad de la hoja.

Resultados y discusión

El tamaño del folíolo central presentó en promedio $31.17 \text{ cm}^2 \pm 7.61 \text{ cm}^2$ (desviación estándar, DE), los laterales tuvieron menor tamaño (DMS= 2.48, $p \leq 0.01$) y ligera mayor variación (4.5%). El área foliar por hoja de la variedad Harbar '88 fue de 70.62 cm^2 , Cajeme tuvo 88.99 cm^2 y Guayparime S-10 mostró 94.35 cm^2 (DMS= 12.52, $p \leq 0.01$), valores similares al máximo de 85 cm^2 reportado por Jun *et al.* (2014). Guayparime S-10 tuvo 32.02 cm^2 en tamaño de folíolo y fue diferente a Harbar '88 (DMS= 2.3, $p \leq 0.01$).

El folíolo central presentó mayores dimensiones, cuyo tamaño se sitúa entre el mínimo (23.23 cm^2) y el máximo (39.82 cm^2) reportados por Sayama *et al.* (2017) en 12 genotipos de soya. El tamaño de folíolos presentó alto coeficiente de variación (Cuadro 1), también reportado por otros estudios (Park *et al.*, 2013; Khan *et al.*, 2018), en parte atribuible a que las dimensiones varían de acuerdo con su ubicación en la planta (Schwerz *et al.*, 2019), aspecto importante al estimar el área foliar.

Cuadro 1. Dimensiones del folíolo central, derecho y lateral en tres variedades de soya, durante el ciclo OI 2017/2018 en Guasave, Sinaloa, México.

Variedad	Folíolo central			Folíolo derecho			Folíolo izquierdo		
	Área (cm ²)	L (cm)	A (cm)	Área (cm ²)	L (cm)	A (cm)	Área (cm ²)	L (cm)	A (cm)
Cajeme	32.98a	8.98a	5.23a	28.95a	7.6a	5.02a	28.59a	7.63a	4.97a
Guayparime	33.89a	8.99a	5.31a	30.83a	7.83a	5.1a	31.33a	7.88a	5.16a
S-10									
Harbar '88	26.65b	8.08b	4.71b	23b	6.88b	4.42b	22.31b	6.76b	4.36b
Media	31.17	8.68	5.08	27.59	7.44	4.85	27.41	7.42	4.83
CV	22.23	11.61	11.66	26.42	13.14	13.91	25.74	12.63	14.05
DMS	3.79	0.55	0.32	3.99	0.53	0.37	3.86	0.51	0.37

(Tukey _{0.01})

n= 57; L= longitud; A= anchura; CV= coeficiente de variación; DMS= diferencia mínima significativa. Literales distintas en cada columna indican diferencias significativas.

El ambiente influye en las dimensiones del folíolo (Jun *et al.*, 2014), pero también el genotipo *per se*, como ocurrió en Harbar '88, pues mostró folíolos de menor dimensión (Cuadro 1), aspecto a considerar para definir densidad de siembra, ya que genotipos con folíolos pequeños aumentan rendimiento con mayor densidad poblacional, por mejor distribución de luz (Krisnawati y Adie, 2017).

Guayparime S-10 presentó mayor circularidad de folíolo ($H= 10.92$, $p \leq 0.01$), con rango medio de 287.15 y diferencia mínima significativa de 46.81 (Dunn, $p \leq 0.01$). El cociente entre longitud y anchura del folíolo (CLAF) fue similar entre variedades y correlacionado con la circularidad ($r_s = -0.77$, $p \leq 0.01$). La circularidad del folíolo central fue menor (rango medio=138.54) que los laterales ($H= 165.6$, $p \leq 0.01$), donde el CLAF fue menor ($H= 201.14$, $p \leq 0.01$), el folíolo izquierdo tuvo rango de 190.37 y el derecho 192.37 (Dunn= 47.05, $p \leq 0.01$).

La circularidad del folíolo presentó CV desde 3.7 hasta 5.89%, la baja variación se debe a que la forma poco afectada por el ambiente (Chen y Nelson, 2004). La circularidad de folíolos en guías UPOV de 1998 y 2017 fue: 0.49-0.58 lanceolada, 0.59-0.68 alongada, 0.69-0.78 elíptica y 0.79-0.88 ovalada. En las tres variedades, la forma del folíolo central fue elíptica y ovalada en los laterales, pero los tres folíolos son ovalados de acuerdo con Chen y Nelson (2004), que agrupan la forma elíptica con ovalada y sugieren un cociente entre largo y ancho menor o igual a 2 para ovalados, de 2.1 a 3 para elongados, entre 3.1 y 4 para lanceolados, de 4.1 a 5 para lineales y mayor de 5 para ultralineales.

El uso de la circularidad del folíolo para clasificar su forma es viable, ya que hojas con valor de circularidad similar presentan forma semejante (Krieger, 2014). La clasificación de Chen y Nelson (2004) y la obtenida en este estudio permitió automatizar el AID para clasificar la forma en folíolos de soya, para facilitar su obtención por personal sin experiencia y favorecer la repetitividad. La forma del folíolo, excepto la elíptica, dificulta establecer, con vernier, la anchura para estimar el tamaño foliar y la forma, problemática solventada con el AID porque define el eje menor y mayor de manera sistemática.

El área del folíolo mostró correlación ($p \leq 0.01$) con su longitud ($r= 0.93$), anchura ($r= 0.96$) y LAF ($r= 0.99$), la mayor asociación entre tamaño foliar y LAF coincide con Richter *et al.* (2014), quienes señalan mayor precisión y exactitud al estimar área foliar mediante LAF del folíolo central. Estimar área foliar con base en el folíolo central es propenso a error, al diferir en tamaño y forma de los laterales, riesgo en hojas compuestas advertido por Keramatlou *et al.* (2015). La generación y validación de modelos para estimar área foliar puede facilitarse con AID y prescindir de LI-COR 3000.

El área del folíolo medida y estimada con modelo basado en LAF del folíolo central presentó R^2 de 0.99 ($p \leq 0.01$), con mayor error relativo medio (ERM) de 4.73% \pm 4.18% (DE) y menor exactitud (RECM= 1.87 cm²). El modelo con LAF promedio de los tres folíolos (CDI) redujo la precisión ($R^2 = 0.97$), pero aumentó la exactitud (Cuadro 2). La RECM de los modelos fue baja (≤ 1.87 cm²). La precisión fue similar a la obtenida por Richter *et al.* (2014) al estimar el área con el LAF del folíolo central ($R^2 \geq 0.97$), pero señalan menor exactitud (RECM ≥ 6.48 cm²). La menor exactitud al utilizar LAF del folíolo central, en este estudio, se debe que difiere en forma y tamaño con los laterales.

Cuadro 2. Precisión y exactitud de modelos empíricos para estimar el área foliar con el producto de la longitud y anchura del folíolo (LAF), y el promedio de los tres folíolos (CDI).

Folíolo	Modelo	R ²	Error relativo medio (%)				RECM (cm ²)
			Mínimo	Máximo	Media	DE	
Central	AF= 0.6961*LAF	0.99	-13.54	6.27	-4.73	4.18	1.87
Derecho	AF= 0.7512*LAF	0.99	-6.69	14.68	2.81	4.51	1.66
Izquierdo	AF= 0.7502*LAF	0.99	-6.82	14.52	2.67	4.5	1.64
CDI	AF= 0.7277*LAF	0.97	-9.61	11.09	-0.41	4.37	1.35

n= 513; AF= área foliar; DE= desviación estándar; RECM= raíz del error cuadrático medio.

El área del folíolo estimada mediante el LAF promedio de los tres folíolos (CDI) presentó menor ERM y RECM (Cuadro 2), la mejora en exactitud fue por la inclusión de los folíolos laterales, que son similares en forma y tamaño. Esto también evidente al usar modelos específicos para los folíolos derecho e izquierdo, pues decreció el ERM e incrementó la exactitud entre el área del folíolo estimada y la medida con AID (Cuadro 2). Aunque Richter *et al.* (2014) proponen usar el folíolo central por practicidad y ahorro de tiempo, medir un folíolo lateral resulta igual de fácil y ofrece mayor exactitud. No obstante, nuestros resultados indican que es mejor estimar el área foliar con base en el LAF de los tres folíolos.

El área foliar específica (AFE) fue similar entre variedades, pero varió según la posición del folíolo en la hoja (DMS= 14.98, $p \leq 0.05$) y de acuerdo con Schwerz *et al.* (2019) también varía con la posición de la hoja en la planta. El central tuvo el menor AFE con 172.08 cm² g⁻¹ (DE= 5.49), el izquierdo presentó 182.54 cm² g⁻¹ (DE=5.32) y el derecho 190.85 cm² g⁻¹ (DE=10.7). La diferencia en AFE de los folíolos laterales es relevante por su asociación positiva con las lecturas del SPAD 502[®] (Sauceda *et al.*, 2017a). La mayor AFE de los folíolos laterales sugiere una lámina foliar más delgada, como posible adaptación al ambiente, ya que el AFE aumenta por prácticas agronómicas como la siembra de soya intercalada con maíz (Liu *et al.*, 2017) al modificar la radiación.

La variedad Cajeme mostró un color foliar diferente, con menor intensidad en rojo (R), verde (G) y azul (B) (Cuadro 3), estos valores bajos indican un verde más intenso y se correlacionan con mayor contenido de clorofila (Kumar *et al.*, 2017) y con lecturas del SPAD 502[®] (Sauceda *et al.*, 2017a). La asociación del color con lecturas del SPAD 502[®] es negativa y se debe a menor reflexión de la luz, ya que una mayor absorción reduce la transmisión y reflectancia de las ondas electromagnéticas (Jacquemoud y Ustin, 2008).

Cuadro 3. Color foliar obtenido mediante el AID en folíolos de tres variedades de soya, durante el ciclo OI 2017/2018 en Guasave, Sinaloa, México.

Variedad	Rojo (R)			Verde (G)			Azul (B)		
	Rangos	Medias		Rangos	Medias		Rangos	Medias	
Cajeme	186.52	b	58.26	203.89	b	64.18	177.05	b	50.62
Guayparime	289.39	a	61.43	294.98	a	66.43	295.28	a	52.8
S-10									
Harbar '88	295.09	a	61.15	272.13	a	65.71	298.68	a	52.71

Variedad	Rojo (R)		Verde (G)		Azul (B)	
	Rangos	Medias	Rangos	Medias	Rangos	Medias
H ($p \leq 0.01$)	58.12		34.96		74.67	

H= estadístico Kruskal-Wallis; diferencia mínima entre rangos (Dunn= 47.05); literales distintas por columna indican diferencias significativas.

Los valores RGB son útiles para diagnosticar estrés fisiológico por nitrógeno o hídrico (Kumar *et al.*, 2017), pero también pueden reflejar diferencias genotípicas, como en la variedad Cajeme, cuya coloración foliar fue distinta pese a condiciones homogéneas. El AID permitió medir el color y las dimensiones foliares en 2.72 s, la automatización favoreció el tiempo por la menor intervención del usuario (Sayama *et al.*, 2017). Digitalizar cuatro hojas por imagen (12 folíolos) ocupó 35 s.

La variedad Harbar '88 presentó el grano de mayor tamaño (29.9 mm²), mientras que Guayparime S-10 tuvo el grano más pequeño (Cuadro 4). El tamaño del grano mostró una asociación negativa significativa ($p \leq 0.01$) con el número de vainas ($r = -0.7$) y granos por planta ($r = -0.72$). Además, el número de granos por planta se relacionó con el peso individual del grano ($r_s = -0.58$, $p \leq 0.01$), dicha relación inversa también es aludida por Sayama *et al.* (2017), incluso entre granos de la misma vaina.

Cuadro 4. Número de vainas, granos y peso del grano por planta (PGP, n=10), dimensiones del grano (n=1,000) y peso hectolítrico (PHE, n=3) en tres variedades de soya, durante el ciclo OI 2018/2019 en Guasave, Sinaloa, México.

Variedad	Núm. por planta		Longitud (mm)	Tamaño (mm ²)		LAG (mm ²)	PHE (kg hl ⁻¹)	PGP (g)
	Vainas	Granos		Área	Total			
Cajeme	22.9 ab	56.2 ab	6.5 b	28.6 b	94.2 b	37.4 b	71.7 b	6.7 b
Guayparime S-10	30.1 a	74.2 a	6.5 b	27.9 c	91.7 c	36.5 c	74.4 c	7.4 b
Harbar '88	17.1 b	38.1 b	6.7 a	29.9 a	98.6 a	39.2 a	70.7 a	4.6 a
Media	23.4	56.2	6.5	28.8	94.8	37.7	72.3	6.3
CV	24.3	25.3	7.1	12.9	12.9	13	0.3	25
DMS	8.1	20.2	0.1	0.5	1.6	0.64	0.6	1.7

(Tukey 0.01)

Literales distintas en cada columna indican diferencias significativas. CV= coeficiente de variación; DMS= diferencia mínima significativa; LAG= largo por ancho del grano.

La mayor producción de granos por planta de la variedad Guayparime S-10 puede relacionarse con su alto potencial productivo (Rodríguez *et al.*, 2017), pues el rendimiento de la soya es favorecido más por el número de granos por planta que por su tamaño o peso individual (Hu *et al.*, 2013; Schwerz *et al.*, 2019), como se refleja en el mayor PGP (Cuadro 4). El mayor peso hectolítrico (PHE) confirmó el menor tamaño del grano de la variedad Guayparime S-10 (Cuadro 4), dado que la relación peso volumen es afectada por el tamaño y la forma del grano, la menor compactación de granos grandes es por más espacios vacíos entre sí, De la O *et al.* (2012) aluden que el grano chico de trigo muestra mayor PHE que los grandes y alargados.

La parte media superior de la planta presentó grano de mayor tamaño, longitud, anchura, circularidad y color en comparación con la porción media inferior ($p \leq 0.01$), el menor peso del grano en el estrato inferior corresponde a la menor actividad fotosintética de las hojas situadas en la parte baja (Schwerz *et al.*, 2019), por autosombreo y mayor senescencia foliar en etapas reproductivas, como el llenado del grano. La disminución de la tasa fotosintética se traduce en menor disposición fotosintatos para el grano. Lo anterior resalta lo relevante de la distribución de la luz, en el dosel, sobre la uniformidad del grano.

La longitud del grano obtenida mediante el AID fue diferente entre los genotipos y con bajo coeficiente de variación (Cuadro 4), que concuerda con la reducida variabilidad de esta característica reportada por Hu *et al.* (2013), también evidente en los resultados ($\leq 8.25\%$) de Rehal *et al.* (2019). La anchura del grano de Guayparime S-10 fue de 5.63 mm, mientras que Cajeme mostró 5.73 mm y Harbar '88 presentó 5.87 mm ($H= 142.44$, $p\leq 0.01$). El LAG fue mayor en la variedad Harbar '88 (Cuadro 4). La humedad del grano fue de 7.32%, sin diferencia entre las variedades.

La longitud del grano obtenida con vernier y mediante el AID presentó alta correlación ($r= 0.92$, $p\leq 0.01$), pero la asociación entre ambos métodos para medir la anchura disminuyó ($r= 0.77$, $p\leq 0.01$). Este decremento se asocia con el tamaño y la forma elipsoide del grano de soya, que dificultan medir la anchura con exactitud, aun con calibrador digital, debido a la variabilidad en la ubicación de la medida, lo que afecta la repetitividad.

El AT mostró asociación con el área del grano ($r= 0.87$, $p\leq 0.01$), con el LAG ($r= 0.84$, $p\leq 0.01$) e igual con su longitud y anchura medida con AID ($r= 0.72$, $p\leq 0.01$). El AID necesitó 55.97 s para obtener las dimensiones y el color en muestras mayores de 300 granos, mientras que, medir con vernier, solo la longitud, anchura y grosor de 60 granos, el tiempo fue de 3 718.2 s. La eficiencia y repetitividad para medir la morfología foliar y del grano con AID son favorecidas por la automatización, cuya implementación en programas de uso libre representa una oportunidad para incentivar la adopción de la metodología.

La forma circular del grano fue mayor en Cajeme y Harbar con respecto a Guayparime S-10 ($H = 134.71$, $p\leq 0.01$). El peso de 100 granos (PCG) fue desde 9.6 hasta 12.5 g, con un $CV= 8.61\%$, tuvo fuerte correlación ($p\leq 0.01$) con el tamaño ($r_s= 0.88$), longitud ($r_s= 0.81$), anchura ($r_s= 0.89$), LAG ($r_s= 0.88$), CLAG ($r_s= -0.71$) y AT del grano ($r_s= 0.89$). Estas relaciones coinciden con otros estudios en soya (Hu *et al.*, 2013; Liang *et al.*, 2016).

La menor anchura del grano reduce el peso, pero aumenta el CLAG, reflejándose en la relación negativa entre el CLAG y el PCG. El PCG medio en Harbar '88 fue de 12 g, en Cajeme de 11.89 g y de 10.1 g en Guayparime S-10 ($H = 20.24$, $p\leq 0.01$). El área foliar mostró correlación negativa con el PCG ($r_s= -0.5$, $p\leq 0.01$), asociación similar ($r= -0.41$, $p\leq 0.05$) a la indicada por Khan *et al.* (2018), pero que difiere de la correlación positiva señalada por Park *et al.* (2013) entre el PCG de soya y el área de la tercera hoja trifoliada. Las discrepancias en la relación entre ambas variables se deben a la influencia de la forma, el ángulo y la disposición de las hojas en el dosel de la planta de soya.

El color del grano fue diferente entre las variedades, Harbar '88 presentó grano más amarillo y claro, evidente en la mayor luminosidad (Cuadro 5). Los valores positivos en las coordenadas a (rojo/verde) descartan la presencia de granos inmaduros o verdes, y las coordenadas b (amarillo/azul) confirman la tonalidad amarilla (Rehal *et al.*, 2019).

Cuadro 5. Color (Lab) de grano obtenido mediante AID en tres variedades de soya, durante el ciclo OI 2017/2018 en Guasave, Sinaloa, México.

Variedad	Luminosidad		a		b	
	Rangos	Medias	Rangos	Medias	Rangos	Medias
Cajeme	1087.8	a 56.46	1158.09	a 7.02	1380.08	a 17.92
Guayparime S-10	1619.23	b 57.81	1379.37	b 7.24	1398.02	a 18.07
Harbar '88	1794.48	c 58.12	1964.04	c 7.87	1723.4	b 19.02
H ($p\leq 0.01$)	361		462.23		99.55	

$n= 1\ 000$; literales distintas en cada columna indican diferencias significativas; diferencia mínima entre rangos (Dunn= 47.05).

El color amarillo del grano fue uniforme en las tres variedades: Guayparime S-10 mostró variación del 16.44%, Cajeme del 12.95% y Harbar del 11.64%, lo que indica ausencia de granos dañados. La medición del grano soya el AID presentó precisión, exactitud y eficiencia; sin embargo, su uso en el fenotipaje es aún limitado (UPOV, 2013).

El color difiere entre las mediciones con el AID y el colorímetro HunterLab MiniScan ($p \leq 0.01$). Esta discrepancia podría atribuirse al área de medición restringida del colorímetro, con un diámetro de 25 mm, lo que obliga a incrementar las repeticiones para lograr una mayor representatividad y confiabilidad en muestras heterogéneas. Las repeticiones por muestra de grano son indefinidas, en nuestro estudio fueron diez, pero Yousif (2014) sugiere hasta 60 mediciones para obtener un valor medio para el grano de soya.

El aumento de observaciones reduce la eficiencia por el mayor tiempo invertido; en cambio, con el AID medir el color y las dimensiones de cada grano es de manera rápida y a pesar de ello es poco utilizado, pero cuando los granos se digitalizan con separación manual decrece la eficiencia (Sauceda *et al.*, 2017b), en el presente trabajo la obtención de la morfología y color fue automatizada y con granos en contacto, de este modo se reduce el tiempo de la digitalización y del análisis de las muestras.

Conclusiones

Las diferencias en las variedades de soya Cajeme, Guayparime S-10 y Harbar '88 se confirman mediante características extraídas de imágenes digitales, como tamaño, circularidad y color de folíolos y granos. La forma del folíolo y del grano de soya dificulta medir su anchura de manera consistente con el vernier, mientras que el análisis de imágenes digitales asegura la repetitividad por ser un proceso sistemático.

El promedio del producto de longitud por anchura de los tres folíolos de la hoja de soya mejora la precisión y exactitud en la estimación del área foliar mediante modelos de regresión lineal. La forma del folíolo clasificada con base en su circularidad evita la subjetividad de su estimación. La hipótesis se confirma, la morfología de folíolos y granos obtenida con análisis de imágenes digitales permite identificar diferencias en variedades de soya, por tanto, resulta útil para la descripción y evaluación.

Bibliografía

- 1 Chen, Y. and Nelson, R. L. 2004. Evaluation and classification of leaflet shape and size in wild soybean. *Crop Sci.* 44(2):671-677.
- 2 De la O, O. M.; Rangel, E. E.; López, H. L.; Villaseñor, H. E.; Peña, R. J. y Herrera, J. H. 2012. Calidad física de grano de trigos harineros (*Triticum aestivum* L.) mexicanos de temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícola.* 3(2):271-283.
- 3 Hammer, Ø.; Harper, D. A. T. and Ryan, P. D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontol. Electron.* 4(1):1-9.
- 4 Hu, Z.; Zhang, H.; Kan, G.; Ma, D.; Zhang, D.; Shi, G.; Hong, D.; Zhang, G. and Yu, D. 2013. Determination of the genetic architecture of seed size and shape via linkage and association analysis in soybean (*Glycine max* L. Merr.). *Genetica.* 141(4-6):247-254.
- 5 Jacquemoud, S. and Ustin, S. L. 2008. Modeling leaf optical properties. *Photobiological sciences Online.* 27-35 pp. <http://photobiology.info/Jacq-Ustin.html>.
- 6 Jun, T. H.; Freewalt, K.; Michel, A. P. and Mian, R. 2014. Identification of novel QTL for leaf traits in soybean. *Plant Breed.* 133(1):61-66.
- 7 Keramatlou, I.; Sharifani, M.; Sabouri, H.; Alizadeh, M. and Kamkar, B. 2015. A simple linear model for leaf area estimation in Persian walnut (*Juglans regia* L.). *Sci. Hortic.* 184(5):36-39.

- 8 Khan, A. Z.; Farhatulla, D.; Munir, I.; Begum, S. and Ara, N. 2018. Genotypic comparison of determinate and indeterminate soybean lines for yield and yield components. *Pak. J. Bot.* 50(1):131-134.
- 9 Krieger, J. D. 2014. A protocol for the creation of useful geometric shape metrics illustrated with a newly derived geometric measure of leaf circularity. *Appl. Plant Sci.* 2(8):1-6.
- 10 Krisnawati, A. Y. and Adie, M. M. 2017. The leaflet shape variation from several soybean genotypes in Indonesia. *Biodiversitas.* 18(1):359-364.
- 11 Kumar, M.; Govindasamy, V.; Rane, J.; Singh, A. K.; Choudhary, R. L.; Raina, S. K.; George, P.; Aher, L. K. and Singh, N. P. 2017. Canopy temperature depression (CTD) and canopy greenness associated with variation in seed yield of soybean genotypes grown in semi-arid environment. *S. African J. Bot.* 113(2017):230-238.
- 12 Liang, H.; Xu, L.; Yu, Y.; Yang, H.; Dong, W. and Zhang, H. 2016. Identification of QTLs with main, epistatic and QTL by environment interaction effects for seed shape and hundred-seed weight in soybean across multiple years. *J. Genet.* 95(2):475-477.
- 13 Liu, X.; Rahman, T.; Song, C.; Su, B.; Yang, F.; Yong, T.; Wu, Y.; Zhang, C. and Yang, W. 2017. Changes in light environment, morphology, growth and yield of soybean in maize-soybean intercropping systems. *Field Crops Res.* 200(2017):38-46.
- 14 Park, G. H.; Baek, I. Y.; Han, W. Y.; Kang, S. T.; Choung, M. G. and Ko, J. M. 2013. Correlation between leaf size and seed weight of soybean. *Korean J. Crop Sci.* 58(4):383-387.
- 15 Rehal, J.; Beniwal, V. and Gill, B. S. 2019. Physico-chemical, engineering and functional properties of two soybean cultivars. *Legume Res.* 42(1):39-44.
- 16 Richter, G. L.; Zanon, A. Z.; Streck, N. A.; Guedes, J. V.; Kräulich, B.; Rocha, T. S.; Winck, J. E. M. and Cera, J. C. 2014. Estimating leaf area of modern soybean cultivars by a non-destructive method. *Bragantia.* 73(4):416-425.
- 17 Rodríguez, C. F. G.; Manjarrez, S. P.; Cortez, M. E.; Saucedo, A. R.; Valenzuela, H. V.; González, G. D.; Garzón, T. J. y Velarde, F. S. 2017. Guayparime S-10, nueva variedad de soya resistente a mosca blanca y geminivirus para Sinaloa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícola.* 8(1):241-245.
- 18 Saucedo, A. C.; González, V. A.; Sánchez, B. H.; Saucedo, R. H.; Ramírez, H. M. y Quintana, J. G. 2017a. MACF-IJ, Método automatizado para medir color y área foliar mediante imágenes digitales. *Agrociencia.* 51(4):409-423.
- 19 Saucedo, A. C.; Villaseñor, H. E.; Lugo, G. A.; Partida, R. L.; González, V. A. y Reyes, O. A. 2017b. Tamaño y número de granos de trigo analizados mediante procesamiento de imagen digital. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícola.* 8(3):517-529.
- 20 Sayama, T.; Tanabata, T.; Saruta, M.; Yamada, T.; Anai, T.; Kaga, A. and Ishimoto, M. 2017. Confirmation of the pleiotropic control of leaflet shape and number of seeds per pod by the Ln gene in induced soybean mutants. *Breed. Sci.* 67(4):363-369.
- 21 Schwerz, F.; Caron, B. O.; Elli, E. F.; Stolzle, J. R.; Medeiros, S. L.; Sgarbossa, J. and Rockenbach, A. P. 2019. Microclimatic conditions in the canopy strata and its relations with the soybean yield. *An. Acad. Bras. Cienc.* 91(3):1-16.
- 22 UPOV. 1998. International Union for the Protection of new Varieties of Plants. Guidelines for the conduct of tests. For distinctness, uniformity and stability. (*Glycine max* (L.) Merr.). Ginebra, Suiza. 30-39 pp. <http://www.upov.int/edocs/tgdocs/en/tg080.pdf>.
- 23 UPOV. 2013. International Union for the Protection of new Varieties of Plants. Technical Working Party on Automation and Computer Programs-Revision of Document TGP/8: Part II: Techniques Used in DUS Examination, New Section: Examining Characteristics Using Image Analysis. Ginebra, Suiza. 27-36 pp. <http://www.upov.int/edocs/mdocs/upov/en/twc-31/twc-31-20.pdf>.

- 24 UPOV. 2017. International Union for the Protection of new Varieties of Plants). Guidelines for the conduct of tests. For distinctness, uniformity and stability. Soya bean (*Glycine max* (L.) Merr.). Ginebra, Suiza. 28-34 pp. <http://www.upov.int/edocs/mdocs/upov/en/twa-46/tg-80-7-proj-3.pdf>.
- 25 Yousif, A. M. 2014. Soybean grain storage adversely affects grain testa color, texture and cooking quality. J. Food Qual. 37(1):18-28.



Morfología foliar y del grano de *Glycine max* L. mediante imágenes digitales

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 July 2024
Date accepted: 01 September 2024
Publication date: 11 November 2024
Publication date: Oct-Nov 2024
Volume: 15
Issue: 7
Electronic Location Identifier: e2912
DOI: 10.29312/remexca.v15i7.2912

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

Glycine max

color

forma

ImageJ

tamaño

Counts

Figures: 0

Tables: 5

Equations: 0

References: 25

Pages: 0