

# Modelos cuantitativos desarrollados con estrategias no destructivas para la estimación del área foliar en *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit

## Quantitative Models Developed from Nondestructive Strategies for the Estimation of the Leaf Area in *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit

Claudio Vite Cristóbal,<sup>1,2</sup> Pedro Arturo Martínez Hernández,<sup>1</sup> Enrique Cortés Díaz,<sup>1\*</sup> Ponciano Pérez Hernández,<sup>3</sup> José Manuel Palma García,<sup>4</sup> José Alberto Salvador Escalante Estrada,<sup>5</sup> María Teresa Rodríguez González<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Posgrado en Producción Animal. Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, México

<sup>2</sup>Posgrado en Producción Pecuaria Tropical. Tecnológico Nacional de México - ITS Tantoyuca. Veracruz, México.

<sup>3</sup>Postgrado en Agroecosistemas Tropicales. Colegio de Postgraduados. Veracruz, México

<sup>4</sup>Centro Universitario de Investigación y Desarrollo Agropecuario. Universidad de Colima. Colima, México

<sup>5</sup>Postgrado en Botánica. Colegio de Postgraduados Estado de México, México

\*Autor de correspondencia: ecodia@yahoo.com.mx

### Resumen

Con el objetivo de desarrollar modelos cuantitativos a partir de estrategias no destructivas para describir la acumulación del área foliar (AF), intercepción de radiación (RI) y cambios en altura de planta (AP) en plantaciones de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, se llevó a cabo un estudio en Veracruz con 350 días de duración y otro de 372 días en Morelos, para procedencias distintas. La AP, longitud (L) y ancho (A) de hoja, AF y RI se monitorearon durante el estudio. Se generó un factor de ajuste para L y A que permitió estimar AF, comparada con AF medido con integrador de AF. Estas variables fueron modeladas con análisis de regresión para describir los cambios en acumulación de AP, AF y RI. La estimación de AF obtenida por el producto L x A demandó el ajuste de y

### Abstract

To achieve the developed of quantitative models from nondestructive strategies to describe leaf area (LA) accumulation, solar radiation interception (RI) and changes in plant height (PH) in *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit plantations, a study was carried out in Morelos and Veracruz, from different provenances. PH, leaf length (L) and wide (W), LA, and RI were measured. LA was estimated by L x W times a correction factor and compared to LA determined by a leaf integrator. Models were developed to describe changes in PH, LA, and RI over time by regression and other approaches. The best correction factor was  $y = 0.35 (L \times A)$  for Morelos and Veracruz analyzed together. For the Veracruz site, the highest LA accumulation measured with an integrator and

= 0.35 (LxA) para Morelos y Veracruz analizados en conjunto. En Veracruz, las máximas acumulaciones de AF medidas con integrador y estimada con factor de ajuste se obtuvieron entre los 119 y 143 días de rebrote, mientras que los máximos para AP se dieron entre los 128 y 177 días. Para la plantación en Morelos, las máximas acumulaciones de AF medidas con integrador y estimada con factor de ajuste se obtuvieron entre los 134 y 228 días, y los máximos para AP se dieron entre los 148 y 233 días. Las RI máximas se lograron entre los 203 y 217 días en la estación lluviosa, y entre los 80 y 104 días en la sequía, ambos para la plantación de Veracruz. La variabilidad generada en los momentos de cosecha fue debida a las procedencias evaluadas. Se concluye que con modelos cuadráticos y logísticos basados en variables no destructivas se puede describir el desarrollo de plantaciones de *Leucaena*, que permita una mejor toma de decisión del momento de cosecha para procedencias distintas en plantaciones de Morelos y Veracruz.

### Palabras clave

Patrón de crecimiento, factor de ajuste, radiación interceptada.

estimated with adjustment factor was registered between 119 and 143 days of regrowth, while highest PH was registered between 128 and 177 days of regrowth. For Morelos plantation, the highest LA accumulation measured with an integrator and estimated with adjustment factor was registered between 134 and 228 days of regrowth, while highest PH was registered between 148 and 233 days of regrowth. Highest RI was registered between 203 and 217 days in the rainy season, and between 80 and 104 days in the drought, both for the Veracruz plantation. The variability generated at harvest times was due to the provenances evaluated. In conclusion, quadratic and logistic models from nondestructive variables could describe closely *Leucaena* above-ground development and allow for harvesting decision-making in different provenances from Morelos and Veracruz plantations.

### Keywords

Growth pattern, correction factor, intercepted radiation.

## Introducción

*Leucaena* (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit) es una leguminosa tropical leñosa que supera a otras especies leñosas en adaptación a diferentes condiciones edafo-climáticas, incorporación de N<sub>2</sub> atmosférico al conjunto suelo-planta-animal y en proveer forraje en cantidad y calidad (Estrada *et al.*, 2018; Villanueva *et al.*, 2018). El follaje de *Leucaena* es rico en proteína y puede mejorar el comportamiento productivo de un bovino al conformar hasta 30% del consumo total diario (Piñeiro-Vázquez *et al.*, 2017).

El mayor impacto positivo de la inclusión de *Leucaena*, como de otras forrajeras leñosas a sistemas silvopastoriles o bancos de proteína, es mediante la aplicación de una frecuencia de cosecha que permita que la especie manifieste su potencial de acumulación de follaje en cada cosecha y a lo largo de todas las cosechas, esta frecuencia puede ser intensa cada dos a seis meses, según sean las condiciones para el crecimiento de la especie (Latt *et al.*, 2000; Sánchez *et al.*, 2008). Por tanto, el mejor aprovechamiento de *Leucaena* como fuente de forraje en sistemas silvopastoriles o bancos de proteína, demanda contar con métodos de fácil aplicación en campo para identificar el momento en que la planta alcanza la máxima

acumulación de follaje fresco y efectuar la cosecha de un forraje en abundancia y de calidad (Del Pozo y Álvarez, 2003). Para ello, es necesario desarrollar investigación ecológica sobre la biomasa y la productividad en plantaciones de leucaena enfocada a la selección de especies sobresalientes en condiciones agroclimáticas específicas y mejorar la predicción de rendimientos de forrajes (Kanazaqa *et al.*, 1982).

Las hojas absorben la radiación solar fotosintéticamente activa (400-700 nm) para proveer la energía necesaria para el crecimiento y mantenimiento de la planta, conforme acumula más hojas, medida como área foliar; la intercepción de la radiación fotosintéticamente activa también se incrementa hasta alcanzar un máximo de intercepción, en este punto la planta logra a su vez la máxima acumulación de área foliar, momento adecuado para realizar la cosecha. De mantenerse una frecuencia de cosecha que permita ambas condiciones: máxima área foliar e intercepción de radiación solar, lograrán un máximo rendimiento del forraje (Escalante-Estrada *et al.*, 2017). El desarrollo de ambos (área foliar e intercepción de la radiación solar) son, por tanto, dos variables que determinan el patrón de acumulación de forraje.

El desarrollo del área foliar y su relación con la acumulación de biomasa en diferentes cultivos impulsa la investigación sobre métodos no destructivos para determinar el área foliar. En *Leucaena* se validó que la superficie de una lámina foliar se puede determinar en función del área de la hoja con la masa seca foliar (Kanazaqa *et al.*, 1982; Del Pozo y Álvarez, 2003), siendo necesario el desarrollo de ecuaciones matemáticas que incluyan el producto: (longitud x ancho de la lámina foliar) x factor de ajuste. También para *Leucaena* es necesario validar la medición de área foliar en campo a partir de estrategias no destructivas y de fácil medición, para luego asociar el desarrollo del área foliar con intercepción de radiación solar y acumulación de follaje, debido a que los estudios para *Leucaena* son basados en modelos alométricos y destructivos (Kanazaqa *et al.*, 1982; Aguirre-Medina *et al.*, 2018).

Además del área foliar, cambios en la altura de la planta, se usa como una variable no destructiva para describir la dinámica de acumulación de biomasa e identificar el momento en que se logra una acumulación máxima (Kanazaqa *et al.*, 1982; Espinoza *et al.*, 1996; Aguirre-Medina *et al.*, 2018).

Actualmente existen instrumentos y equipos, como integradores portátiles de área foliar, sensores digitalizados para medir radiación recibida y capacidades computacionales para desarrollar modelos matemáticos que asocien los cambios en unas variables con cambios en otras. Por lo que la investigación presente tuvo como objetivo desarrollar modelos cuantitativos a partir de estrategias no destructivas, para describir la dinámica de acumulación del área foliar, intercepción de radiación y cambios en altura de planta en plantaciones de *Leucaena*.

## Materiales y métodos

Los datos de campo para el desarrollo de los modelos se obtuvieron de las áreas en Tepalcingo, Morelos y Tantoyuca, Veracruz, donde se encontraban parcelas establecidas de *Leucaena* de diferentes procedencias (tres accesiones elegidas al azar para cada una de las procedencias: Colima, Cunningham, Morelos, Nuevo León y Veracruz). Las accesiones en cada procedencia solamente fueron las sobrevivientes después de seis meses

de aviveramiento y se eligieron cada diez en función del orden adoptado en la base de datos elaborada de un total de 149 sitios de colecta, con excepción de Cunningham, que fueron seleccionadas tres de un total de cuatro accesiones colectadas.

Tepalcingo se localiza a 18° 31' 18.5" N y 98° 56' 25.2" O, y 1,179 msnm, el clima es semicálido subhúmedo con lluvias en verano, precipitación anual de 879 mm y temperatura media de 21.8 °C. La zona de Tantoyuca se localiza a 21° 19' 56.3" N y 98° 13' 22.3" O y 136 msnm, el clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano, precipitación anual de 1,228 mm y temperatura media de 23.9 °C (García, 2005). Ambos sitios tienen suelo vertisol, de acuerdo con la clasificación del sistema FAO/UNESCO 2010 (IUSS Working Group WRB, 2010), obtenido del continuo nacional a escala 1:1,000,000 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). El suelo en Morelos es de textura franco-arenosa, con pH de 6.3, CE de 0.04 dSm<sup>-1</sup> y presentó un contenido de materia orgánica (MO) de 1.8%, con 15.8 mg kg<sup>-1</sup> de N aprovechable y 3.7 mg kg<sup>-1</sup> de P asimilable; en tanto, Tantoyuca tiene un suelo de textura arcillosa, con pH de 7.2, CE de 0.18 dSm<sup>-1</sup>, 4.2% MO, 12.5 mg kg<sup>-1</sup> de N aprovechable y 4.3 mg kg<sup>-1</sup> de P asimilable. El cultivo en ambos casos se desarrolló con la fertilidad de cada suelo.

Cada parcela experimental se estableció al inicio con 16 plantas de *Leucaena* por accesión, posterior al tiempo de establecimiento de las parcelas (12 x 8 m) y número total de plantas por sitio de plantación fueron 11 y 176 para Tepalcingo y 14 y 224 para Tantoyuca. En ambos sitios la plantación fue en hileras con tres metros de separación y con plantas cada dos metros dentro de una misma hilera, para permitir el máximo potencial de crecimiento de la planta. El establecimiento fue por trasplante de plantas desarrolladas por seis meses en un vivero de la Universidad Autónoma Chapingo. Una vez en campo, las plantas fueron protegidas contra corte o pastoreo, a seis meses del trasplante fueron podadas a 50 cm de altura y a partir de este momento se inició la toma de datos.

De cada procedencia y sitio se seleccionaron las cuatro plantas centrales para la toma de datos de campo, en las dos o tres parcelas experimentales por accesión, que al final se tuvieron como repetición. En cada planta se midió con aproximación de 0.1 cm la longitud y ancho de tres hojas del tamaño medio de cada una de las plantas, usando una regla de 30 cm; posteriormente, a estas mismas hojas se les midió el área foliar con un integrador de área foliar (LI-3100 Area Meter, Li-Cor Inc., Lincoln, Nebraska, USA), se contabilizó el número de hojas totalmente expandidas en cada planta y con ambos se calculó el área foliar por planta.

Únicamente en Tantoyuca, además de área foliar y altura de la planta, desde la base a la yema apical del fuste principal, se midió la radiación fotosintéticamente activa (RFA) por arriba (iRFA) y a nivel del suelo por debajo (tRFA) del dosel, para ambas se usó un sensor lineal de quantum (Quantum Line 6 sensor Bar, Spectrum Technologies, Inc., USA) entre las 11:00 y 13:00 horas, el sensor se colocó perpendicular a las hileras de plantación, tanto arriba como por debajo del dosel, la diferencia (iRFA - tRFA) fue la radiación interceptada (RI) que se expresó en  $\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  como en otras leguminosas y gramíneas (Colabelli *et al.*, 2011). Los datos de campo se tomaron a 28 días desde el

inicio y hasta la mitad de las estaciones lluviosa y sequía, cada 14 días posteriormente, para todas las variables.

Además de las mediciones en campo, para ambos sitios se obtuvo la temperatura media mensual máxima ( $T_{\text{máx}}$ ) y mínima ( $T_{\text{mín}}$ ) y precipitación mensual acumulada de marzo 2018 a febrero 2019, a partir de los registros del Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA). Para Tantoyuca se consideró como estación de crecimiento: lluviosa y sequía de marzo a septiembre de 2018 y de agosto 2018 a febrero 2019, respectivamente; y para Tepalcingo, estas estaciones fueron de febrero a agosto de 2018 y de septiembre 2018 a febrero 2019. El traslape en inicio y fin de las estaciones de crecimiento para ambos sitios de plantación se debe a los diferentes ciclos de crecimiento mostrados por las diferentes procedencias de las plantas de *Leucaena*.

El área rectangular de la cual sólo una parte es ocupada por el área de la hoja se obtuvo midiendo longitud y ancho, y se denotó como variable  $X$ ; en tanto, el área obtenida por el integrador de área se denotó como variable  $Y$ . Con cada par de datos  $XY$  se estimó la regresión lineal simple sin ordenada al origen (Berman y Saunders, 2008; Kuhn y Johnson, 2018) y la pendiente de la ecuación se utilizó como el factor de ajuste para obtener el área foliar a partir de los datos generados en campo de longitud y ancho de hoja.

Las áreas foliares obtenidas con integrador y factor de ajuste, y la altura de la planta se sometieron a un análisis de varianza mediante un modelo mixto que incluyó los efectos fijos de estación de crecimiento ( $E$ ), sitio de crecimiento ( $S$ ), procedencia ( $P$ ), las dobles y triples interacciones entre efectos principales ( $E \times S$ ,  $E \times P$ ,  $S \times P$  y  $E \times S \times P$ ) y los efectos aleatorios de accesión anidado en  $E$  y accesión anidado en  $E \times S$ , con el procedimiento MIXED. Para RI el modelo fue similar con los efectos fijos de sitio de crecimiento ( $S$ ), procedencia ( $P$ ), la interacción  $S \times P$  y el efecto aleatorio de accesión anidado en  $S$ . Para ambos modelos se incluyó además como efecto fijo la covariable de tiempo de muestreo después del corte de uniformización. Cuando fue necesario, las medias de las variables fueron estimadas con la instrucción LSMEANS.

Con el procedimiento NLIN se desarrollaron modelos logísticos y polinomios de segundo grado para describir la dinámica de cambio en radiación interceptada, área foliar y altura de planta para cada uno de los efectos significativos a través del tiempo de rebrote. Para área foliar se desarrollaron modelos independientes con la medición de área foliar por el integrador de área foliar y la calculada por la longitud y ancho de hoja y el factor de ajuste. Los criterios para determinar el modelo con mejor ajuste, fueron lograr el mayor coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el menor error estándar (EE) de la expresión y los intervalos de confianza (IC) más estrechos a 95% de confiabilidad para los parámetros de las ecuaciones. Todos los procedimientos estadísticos se desarrollaron con SAS (SAS® 9.4, SAS Inst. Inc., Cary, NC., USA).

## Resultados

### *Precipitación y temperatura durante el estudio*

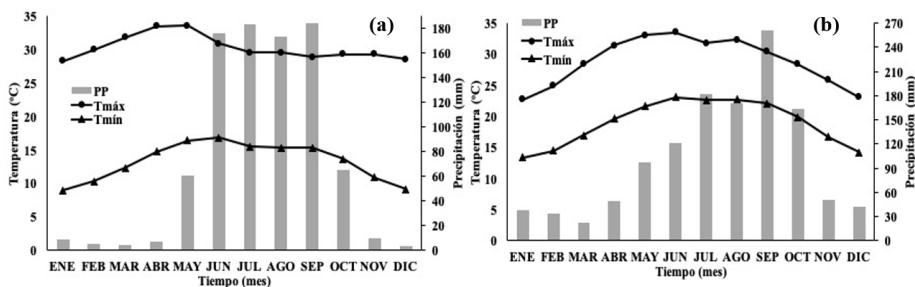
El área de Tepalcingo registró 879 mm de precipitación, 31 y 69% en la sequía y lluviosa, respectivamente; la temperatura máxima mensual varió de 28.3 a 33.6 °C y la mínima mensual de 8.9 a 16.8 °C, mayo y enero registraron la mayor y menor temperatura mensual máxima y mínima, respectivamente. Tantoyuca registró 1,228 mm de precipitación, 45 y 55% en la estación de sequía y lluviosa, respectivamente; la temperatura máxima mensual fue de 22.7 a 33.5 °C y la mínima mensual de 13.4 a 23.1 °C, junio y enero registraron la mayor y menor temperatura mensual máxima y mínima, respectivamente (figura 1).

Tantoyuca recibió 40% más precipitación anual que Tepalcingo, pero en sequía la diferencia en precipitación recibida entre las áreas fue mayor, el primer sitio recibió poco más del doble de precipitación que el segundo en esta estación. Además de una menor precipitación, Tepalcingo mostro mayor temperatura máxima y menor mínima que en Tantoyuca.

Las diferencias entre los sitios de plantación en cantidad y distribución de la precipitación y la variación entre la temperatura máxima y mínima mensual, permite señalar que la información de campo provino de áreas con condiciones climáticas diversas. Tantoyuca fue un sitio cálido y húmedo, mientras que Tepalcingo fue un semicálido subhúmedo, este sitio se consideró semicálido debido a la menor temperatura.

Figura 1

Temperatura media mensual máxima ( $T_{m\acute{a}x}$ ) y mínima ( $T_{m\acute{i}n}$ ) y precipitación (PP) mensual en (a) Tepalcingo, Morelos, México; y (b) Tantoyuca, Veracruz, México



### *Significancia estadística de las variables en estudio*

La significancia estadística de las variables en estudio se muestra en el cuadro 1. Los efectos de procedencia, sitio  $\times$  procedencia y la covariable tiempo influyeron ( $P < 0.0004$ ) sobre las áreas foliares calculadas con factor de ajuste y medidas con integrador, y la altura de planta. El efecto de sitio sólo fue importante ( $P = 0.0786$ ) para la altura de planta. En tanto, la radiación interceptada fue afectada ( $P < 0.006$ ) por los efectos de estación, procedencia, estación  $\times$  procedencia y la covariable tiempo.

Cuadro 1

Significancia estadística de las áreas foliares calculadas con factor de ajuste y medidas con integrador, altura de planta y la radiación interceptada

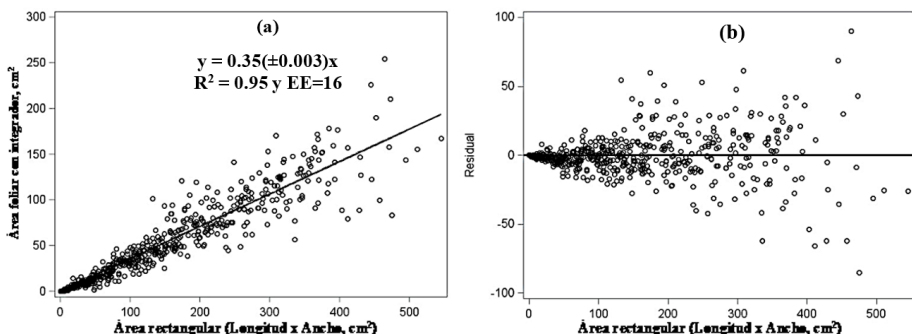
Factor	Área foliar (cm <sup>2</sup> )		Altura (cm)	Radiación interceptada (μE m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )
	Factor de ajuste	Integrador		
Estación (E)	0.2269	0.2474	0.3630	0.0067
Sitio (S)	0.1189	0.1557	0.0786	—
Procedencia (P)	<0.0001	0.0004	<0.0001	<0.0001
E×S	0.3302	0.4218	0.1303	—
E×P	0.1239	0.9200	0.6116	0.0004
S×P	<0.0001	<0.0001	<0.0001	—
E×S×P	0.1287	0.6058	0.3019	—
Tiempo	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Validación del factor de ajuste y ecuaciones de predicción de área foliar

La determinación del factor de ajuste para calcular área foliar con base a las mediciones del área foliar con integrador y a las no destructivas de longitud por ancho de hoja (área rectangular), fue posible y aceptable al lograr una R<sup>2</sup> de 95% y EE de 16 para la expresión (figura 2a). El área foliar con integrador mostró una dispersión amplia cuando ésta superó los 50 cm<sup>2</sup>. Esta tendencia a mayor frecuencia de áreas foliares superiores a los 50 cm<sup>2</sup> fue reflejo del tamaño de la hoja, que fue mayor conforme avanzó la edad de la planta; mismo fenómeno apreciado con los residuales (figura 2b), que se traduce en una variabilidad cada vez más alta a mayores tamaños de hoja.

Figura 2

Dispersión del área foliar observada por (a) planta y (b) residuales con respecto de la estimada mediante el producto de longitud x ancho de hoja en plantaciones de Morelos y Veracruz. Modelo significativo (P<0.0001)

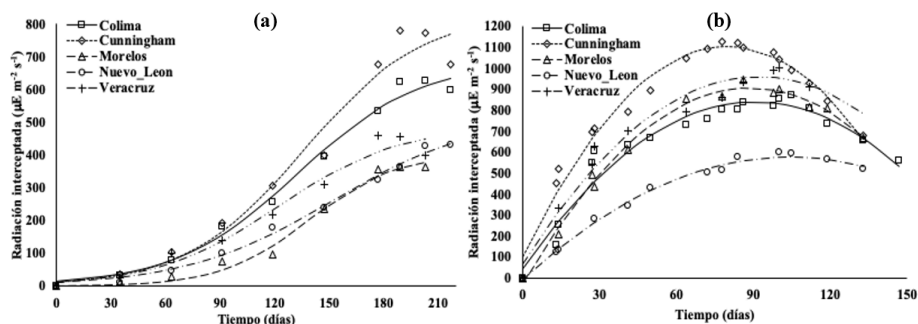


## Modelos descriptivos de la dinámica de radiación interceptada (RI)

El patrón de RI, a lo largo del rebrote, en cada estación de crecimiento (sequía y lluviosa) y procedencia fue descrito por modelos distintos: en sequía, este patrón fue explicado por un modelo cuadrático, la RI se incrementó constantemente desde los 80 (en Cunningham) y hasta los 104 días (en Morelos) para alcanzar un máximo de RI y luego decreció; en la estación lluviosa, el modelo fue logístico con reducción progresiva en la magnitud del incremento de la RI, luego de los 203 (en Morelos y Veracruz) y 217 días de rebrote (en Colima, Cunningham y Nuevo León) el incremento fue mínimo (figuras 3a y 3b). Ambos modelos demuestran que el monitoreo de la RI es una estrategia aplicable en condiciones de campo para la toma de decisiones del momento de la cosecha del forraje por la alta capacidad predictiva observada con la  $R^2$ , EE y los IC a 95% para los parámetros.

Figura 3

Modelos descriptivos de la cantidad de radiación interceptada (RI) medida como  $\mu E m^{-2} s^{-1}$  por procedencia en una plantación de *Leucaena* en las estaciones (a) lluviosa y (b) de sequía



Estación	Procedencia	Ecuación	$R^2$	EE	IC al 95% para los parámetros		
					a	b	c
Lluviosa	Colima	$y=688/[1+51.2e^{(-0.0296x)}]$	0.99	8.0	(585, 791)	(2, 100)	(0.0202, 0.0390)
	Cunningham	$y=833/[1+65.5e^{(-0.0306x)}]$	0.97	18.1	(596, 1071)	(-62, 193)	(0.0122, 0.0491)
	Morelos	$y=406/[1+311.0e^{(-0.0413x)}]$	0.99	5.8	(332, 481)	(-346, 968)	(0.0233, 0.0592)
	Nuevo León	$y=521/[1+42.5e^{(-0.0247x)}]$	0.99	4.1	(416, 627)	(16, 69)	(0.0180, 0.0313)
	Veracruz	$y=489/[1+39.4e^{(-0.0300x)}]$	0.97	10.5	(350, 628)	(-26, 105)	(0.0118, 0.0483)
Sequía	Colima	$y=50.0+17.7x-0.0974x^2$	0.95	13.5	(-36, 120)	(15, 20)	(-0.1142, -0.0806)
	Cunningham	$y=102.5+25.0x-0.1565x^2$	0.97	11.8	(33, 172)	(22, 27)	(-0.1749, -0.1381)
	Morelos	$y=-28.1+21.0x-0.1184x^2$	0.99	8.4	(-78, 22)	(19, 23)	(-0.1315, -0.1052)
	Nuevo León	$y=-7.6+11.2x-0.0538x^2$	0.99	5.1	(-35, 20)	(10, 12)	(-0.0614, -0.0462)
	Veracruz	$y=69.5+19.3x-0.1045x^2$	0.97	19.4	(-49, 188)	(14, 24)	(-0.1483, -0.0607)

$R^2$  = coeficiente de determinación, EE = error estándar e IC = intervalo de confianza. Todos los modelos fueron significativos ( $P < 0.0001$ ).

La RI en sequía fue siempre superior comparada con la estación lluviosa en casi todas las procedencias, con excepción de Nuevo León. Se consideraron las máximas RI de cada procedencia, las de sequía fueron entre 33 y 139% superiores a las registradas para las procedencias durante la estación lluviosa. En contraste, en la estación lluviosa la RI siempre mostró incrementos constantes, no así en sequía, estación en que se registró hasta una caída



en la RI. La dinámica distinta en la RI entre ambas estaciones puede ser reflejo del efecto combinado de la frecuencia de días nublados y disponibilidad de humedad en cada una de ellas.

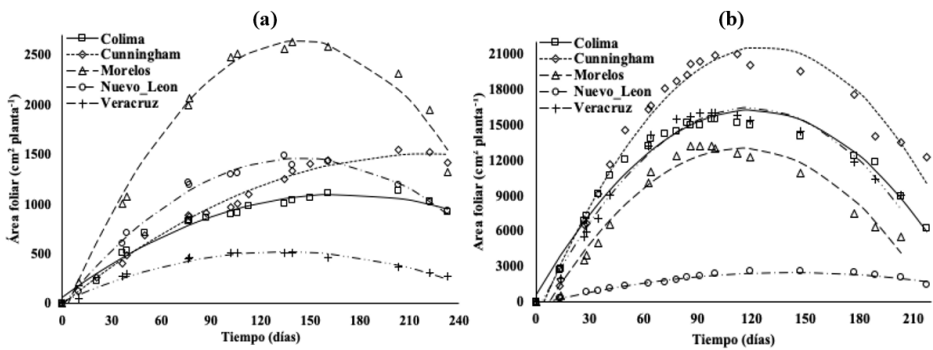
*Modelos descriptivos de la dinámica de acumulación de área foliar*

Los modelos de las plantaciones de Morelos y Veracruz fueron polinomios de segundo grado para las áreas foliares, calculadas con factor de ajuste y medida con integrador (figuras 4 y 5). El área foliar calculada con factor de ajuste incrementó constantemente y alcanzó un máximo entre los 134 (para Veracruz) y 222 días (para Cunningham) en Morelos y entre los 114 (para Morelos) y 141 días (para Nuevo León) en Veracruz, posterior a ello decreció (figura 4). En tanto, el área foliar medida con integrador incrementó constantemente y alcanzó un máximo entre los 139 para Veracruz y 228 días para Cunningham en Morelos, y entre los 119 para Veracruz y 143 días para Nuevo León en Veracruz, posterior a ello decreció (figura 5).

Considerando las máximas áreas foliares de cada procedencia entre los sitios de plantación, las de Veracruz fueron entre 0.7 y 30.3 veces superiores a las registradas en Morelos para ambas áreas foliares, calculada con factor de ajuste y medida con integrador de área foliar (figuras 4 y 5).

Figura 4

Modelos descriptivos del desarrollo del área foliar calculada mediante un factor de ajuste, en plantaciones de Leucaena en (a) Morelos y (b) Veracruz para procedencias distintas



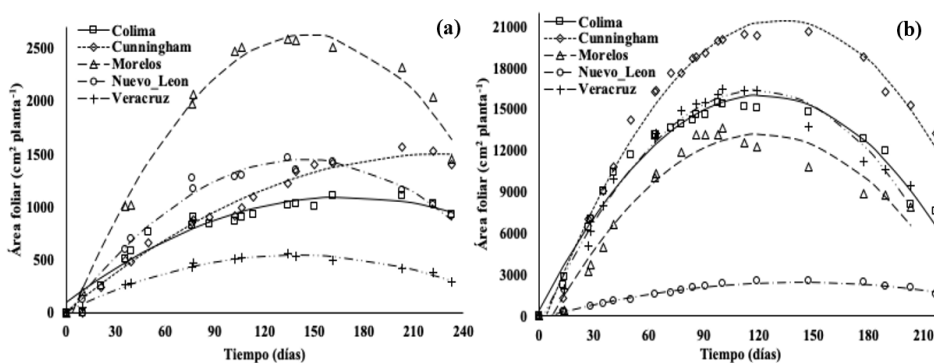
Sitio	Procedencia	Ecuación	R <sup>2</sup>	EE	IC al 95% para los parámetros		
					a	b	c
Morelos	Colima	$y=60.2+12.3x-0.0365x^2$	0.97	13.2	(-19, 139)	(11, 14)	(-0.0426, -0.0304)
	Cunningham	$y=-4.6+13.4x-0.0305x^2$	0.99	13.3	(-84, 75)	(12, 15)	(-0.0366, -0.0244)
	Morelos	$y=-134.4+38.8x-0.1357x^2$	0.99	30.6	(-299, 30)	(36, 42)	(-0.1491, -0.1223)
	Nuevo León	$y=-17.2+20.4x-0.0709x^2$	0.99	13.4	(-89, 55)	(19, 22)	(-0.0768, -0.0651)
	Veracruz	$y=15.3+7.6x-0.0284x^2$	0.98	6.8	(-21, 52)	(7, 8)	(-0.0314, -0.0254)
Veracruz	Colima	$y=582.6+260.3x-1.0864x^2$	0.97	165.2	(-326, 1,491)	(240, 280)	(-1.1767, -0.9960)
	Cunningham	$y=-1,513.3+363.7x-1.4317x^2$	0.97	248.3	(-2,861, -165)	(333, 394)	(-1.5682, -1.2951)
	Morelos	$y=-1,744.3+257.5x-1.1255x^2$	0.96	219.8	(-2,987, -501)	(229, 286)	(-1.2600, -0.9910)
	Nuevo León	$y=-189.7+38.1x-0.1347x^2$	0.98	28.0	(-338, -41)	(35, 42)	(-0.1500, -0.1194)
	Veracruz	$y=826.8+290.1x-1.2178x^2$	0.98	190.3	(-1,903, 249)	(265, 315)	(-1.3343, -1.1014)

R<sup>2</sup> = coeficiente de determinación, EE = error estándar e IC = intervalo de confianza. Todos los modelos fueron significativos (P < 0.0001).

Los modelos desarrollados con las áreas foliares medidas con integrador y calculadas con factor de ajuste fueron aceptables al lograr una  $R^2$  de 82% o superiores y EE de 436.6  $\text{cm}^2$  o inferiores, lo que justifica el monitoreo de área foliar con el factor de ajuste generado como una estrategia no destructiva útil en la toma de decisiones al momento de la cosecha de forraje de *Leucaena* (figuras 4 y 5). El EE fue de una a 33 veces inferior para las procedencias en Morelos en comparación con las de Veracruz (figuras 4 y 5).

Figura 5

Modelos descriptivos del desarrollo del área foliar medida con integrador, en plantaciones de *Leucaena* en Morelos (a) y Veracruz (b) para procedencias distintas



Sitio	Procedencia	Ecuación	$R^2$	EE	IC al 95% para los parámetros		
					a	b	c
Morelos	Colima	$y=100.6+11.7x-0.0347x^2$	0.94	17.9	(-7, 208)	(10, 14)	(-0.0430, -0.0264)
	Cunningham	$y=7.1+13.2x-0.0291x^2$	0.98	15.3	(-85, 99)	(11, 15)	(-0.0361, -0.0220)
	Morelos	$y=-127.9+37.9x-0.1299x^2$	0.99	30.8	(-293, 38)	(35, 41)	(-0.1434, -0.1165)
	Nuevo León	$y=-11.1+20.3x-0.0708x^2$	0.98	16.8	(-101, 79)	(18, 22)	(-0.0781, -0.0634)
Veracruz	Veracruz	$y=4.7+7.8x-0.0281x^2$	0.99	5.8	(-26, 36)	(7, 8)	(-0.0306, -0.0256)
	Colima	$y=382.2+256.9x-1.0534x^2$	0.97	153.8	(-464, 1,228)	(238, 276)	(-1.1375, -0.9693)
	Cunningham	$y=-1,233.9+344.0x-1.2998x^2$	0.98	172.4	(-2,182, -285)	(323, 365)	(-1.3941, -1.2055)
	Morelos	$y=-718.8+207.7x-0.7719x^2$	0.82	436.6	(-3,186, 1,749)	(154, 261)	(-1.0090, -0.5348)
	Nuevo León	$y=-194.8+37.4x-0.1310x^2$	0.98	26.8	(-337, -52)	(34, 41)	(-0.1456, -0.1163)
	Veracruz	$y=654.8+286.4x-1.2003x^2$	0.97	196.0	(-1,763, 453)	(261, 312)	(-1.3202, -1.0803)

$R^2$  = coeficiente de determinación, EE = error estándar e IC = intervalo de confianza. Todos los modelos fueron significativos ( $P < 0.0001$ ).

En la plantación de Morelos, considerando los EE de las expresiones del modelo basado en la estimación por cálculo, se subestimó para casi todas las procedencias entre 0.6 para Morelos y 36% para Colima, con excepción para Veracruz que sobre estimó en más de 15% el área foliar, comparado con el basado en datos del integrador. En tanto, para la plantación de Veracruz, la estimación por cálculo se subestimó en 3% para Veracruz y 98% para Morelos, y sobre estimó entre 4.1 para Nuevo León y 30.6% para Cunningham el área foliar, comparado con el basado en el integrador.

Las máximas áreas foliares fueron superiores a 2,633  $\text{cm}^2$  planta<sup>-1</sup> en la plantación de Morelos y 21,525  $\text{cm}^2$  en la plantación de Veracruz, que correspondieron a las procedencias de Morelos y Cunningham, respectivamente. En contraste, las mínimas

áreas foliares fueron inferiores a  $546 \text{ cm}^2 \text{ planta}^{-1}$  en la plantación de Morelos y  $2,506 \text{ cm}^2$  en la plantación de Veracruz, que correspondieron a las procedencias de Veracruz y Nuevo León, respectivamente. Con base en lo anterior, podría afirmarse que a mayor acumulación de área foliar, también es mayor la diferencia entre modelos desarrollados con datos de área foliar en función de la procedencia y sitio de plantación.

Esta mayor acumulación de área foliar coincide también con la mayor RI en las estaciones de sequía y lluviosa para los casos de Colima, Cunningham y Morelos (figura 3). Por lo que la expansión del área foliar tiene en la cantidad de radiación solar recibida un factor determinante, en función de las procedencias y las estaciones y sitios de crecimiento.

Los intervalos de confianza para los parámetros de las ecuaciones generadas con las áreas foliares medidas con integrador y calculadas con factor de ajuste indican diferencias entre las procedencias evaluadas (figuras 4 y 5). En la plantación de Morelos las procedencias de Colima, Cunningham y Nuevo León mostraron un comportamiento intermedio ( $10$  a  $22 \text{ cm}^2 \text{ día}^{-1}$ ) entre Morelos y Veracruz para la tasa de acumulación de área foliar, Morelos superó en más de cuatro veces la tasa de crecimiento observada para Veracruz. En tanto, para la plantación de Veracruz, las procedencias de Colima, Morelos y Veracruz mostraron un comportamiento intermedio ( $154$  a  $315 \text{ cm}^2 \text{ día}^{-1}$ ) entre Cunningham y Nuevo León para la tasa de acumulación de área foliar, Cunningham superó en más de ocho veces la tasa de crecimiento observada para Nuevo León.

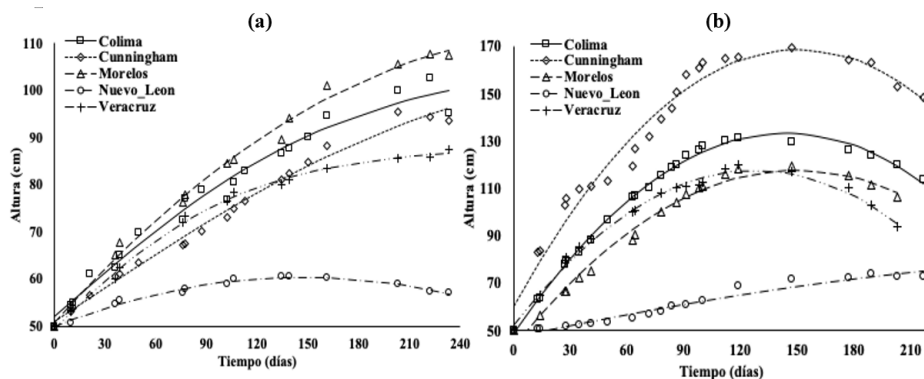
### *Modelos descriptivos de la dinámica de cambio en altura de planta*

Los patrones de cambio en altura de planta fueron similares a los correspondientes en RI (figuras 3 y 6). En la plantación de Morelos el modelo fue logístico para las procedencias de Colima, Cunningham y Veracruz, y cuadrático para Morelos y Nuevo León; en tanto, para la plantación de Veracruz el comportamiento fue cuadrático en casi todas las procedencias, con excepción para Nuevo León que fue explicado por un modelo logístico. Con el modelo cuadrático se registró un incremento en altura hasta un máximo y luego una ligera reducción, mientras que con el modelo logístico la planta siempre mantuvo un incremento de altura, aunque con cambios en la magnitud de este incremento a lo largo de la estación de crecimiento (figura 6).

Las alturas máximas fueron de  $60$  para Nuevo León y  $105$  cm para Morelos (en la plantación de Morelos) y de  $72$  para Nuevo León y  $169$  cm para Cunningham (en la plantación de Veracruz), y se registraron entre los  $148$  a  $203$  y  $151$  a  $177$  días de rebrote, respectivamente. La altura de planta para las procedencias de la plantación de Veracruz superó en  $12$  a  $75\%$  a las de Morelos. Esta situación de máxima altura para Cunningham coincidió con RI en ambas estaciones de crecimiento, lo que permite señalar que los entrenudos en *Leucaena* fueron más largo en la plantación de Veracruz que en Morelos, y esta mayor longitud explica las mayores RI y área foliar acumulada.

Figura 6

Modelos descriptivos de cambios en altura de planta en una plantación de *Leucaena* en (a) Morelos y (b) Veracruz para procedencias distintas



Sitio	Procedencia	Ecuación	R <sup>2</sup>	EE	IC al 95% para los parámetros		
					a	b	c
Morelos	Colima	$y=106.9/[1+1.0559e^{-(0.0117x)}]$	0.98	0.5	(99, 115)	(0.9226, 1.1892)	(0.0090, 0.0144)
	Cunningham	$y=52.9/[1+0.1431e^{-(0.0055x)}]$	0.99	0.3	(51, 55)	(0.0964, 0.1899)	(0.0003, 0.0007)
	Morelos	$y=50.8+0.4006x-0.0007x^2$	0.99	0.4	(48, 53)	(0.3351, 0.4462)	(-0.0008, -0.0005)
	Nuevo León	$y=49.9+0.1419x-0.0005x^2$	0.98	0.1	(49, 50)	(0.1293, 0.1546)	(-0.0005, -0.0004)
	Veracruz	$y=88.1/[1+0.7800e^{-(0.0164x)}]$	0.99	0.2	(87, 90)	(0.7377, 0.8223)	(0.0148, 0.0179)
Veracruz	Colima	$y=48.8+1.1720x-0.0041x^2$	0.99	0.3	(47, 51)	(1.1304, 1.2136)	(-0.0042, -0.0039)
	Cunningham	$y=50.4+0.2689x-0.0003x^2$	0.97	1.2	(49, 52)	(0.2346, 0.3032)	(-0.0004, -0.0002)
	Morelos	$y=50.8+0.4006x-0.0007x^2$	0.98	0.7	(48, 53)	(0.3351, 0.4462)	(-0.0008, -0.0005)
	Nuevo León	$y=88.6/[1+0.8639e^{-(0.0073x)}]$	0.96	0.4	(70, 107)	(0.5273, 1.2005)	(0.0034, 0.0113)
	Veracruz	$y=52.7+1.0216x-0.0040x^2$	0.99	0.4	(50, 55)	(0.9651, 1.0781)	(-0.0043, -0.0037)

R<sup>2</sup> = coeficiente de determinación, EE = error estándar e IC = intervalo de confianza. Ambos modelos fueron significativos (P < 0.0001).

### Discusión

La *Leucaena* prosperó en ambos sitios de plantación con diferencias en cantidad y distribución de las lluvias e incidencia de temperaturas ambientales bajas, esto validó la capacidad amplia de *Leucaena* de adaptarse a diferentes condiciones tropicales, aunque con variaciones importantes en el desarrollo y acumulación de follaje. En Veracruz, que fue el más cálido y húmedo, la magnitud de área foliar acumulada y la altura de planta fueron mayores que en Morelos, que fue más fresco y seco. Las variaciones en clima y respuesta de la *Leucaena* en las variables medidas dan validez a los resultados.

El uso de un factor de ajuste para que las mediciones no destructivas de longitud y ancho de la hoja sirvieran de base para estimar el área foliar en un momento determinado fue válido. La validación del factor de ajuste coincide con lo registrado por Del Pozo y Álvarez (2003) para la estación de sequía, quienes demostraron la utilidad práctica de ecuaciones con R<sup>2</sup> = 0.95 para la estimación del área foliar de la *Leucaena* a partir de los valores de masa seca de sus hojas. El área foliar, calculada por mediciones no destructivas y ajustadas, puede implicar una ligera sub o sobreestimación de esta variable, en comparación con la determinación destructiva; sin embargo, el gran ahorro en tiempo, esfuerzo y mantener la planta en pie favorece este acercamiento (Espinoza *et al.*, 1996).

Los coeficientes de determinación altos de este estudio que resultaron del cálculo del área foliar de forma no destructiva, y basados en medir longitud y ancho de hoja con un factor de ajuste, permite señalar que este es un método adecuado para medir área foliar en plantaciones de *Leucaena* y con ello determinar un criterio para el momento de cosecha. En este sentido, el estudio realizado concuerda con los estudios de Espinoza *et al.* (1996), quienes concluyeron que la confiabilidad estadística lograda por los métodos no destructivos los hace una opción para el seguimiento en campo de cultivos en pie de *Leucaena*.

La intercepción de la radiación solar es producto de una participación compleja de factores externos y propios de la planta, entre ellos la presencia de días nublados, topología y densidad del cultivo, arreglo foliar y longitud de entrenudos; sin embargo, es un factor determinante en el patrón de acumulación de biomasa, por lo que es un parámetro medular en el seguimiento a la producción de un cultivo (Kanazaqa *et al.*, 1982), y con ello la importancia de darle seguimiento en campo a los cultivos en pie para la toma de decisiones, como lo es la cosecha oportuna para maximizar rendimientos en el caso de forrajeras perennes. El patrón de intercepción de radiación solar encontrada en el estudio fue contrastante entre las estaciones de sequía y lluviosa, en la primera la intercepción aumentó rápidamente para alcanzar un máximo en un tiempo corto y superior al registrado en lluvias. El comportamiento en sequía fue similar a lo encontrado en pastizales naturales por Colabelli *et al.* (2011), quienes también encontraron una rápida intercepción de radiación en la estación con menor frecuencia de días nublados.

Con base en intercepción de radiación, el tiempo de rebrote para la cosecha en las estaciones de sequía y lluviosa debe ser distinto. En este estudio, en sequía la plantación de *Leucaena* estaba lista para cosecha entre los 112 y los 123 días de rebrote, más temprano que en la lluviosa; aunque, este comportamiento estuvo en función de las procedencias evaluadas durante las dos estaciones de crecimiento (lluviosa y sequía). Para la sequía, el intervalo propuesto en este estudio es 22 días inferior al propuesto por Aguirre-Medina *et al.* (2018) y para la lluviosa el intervalo de rebrote propuesto en este estudio es 35 días superior a lo recomendado por Espinoza *et al.* (1996). Estas diferencias resaltan la importancia de contar con métodos rápidos y sencillos de aplicar en campo, para decidir el momento de cosechar con base al desempeño real del cultivo y no sólo depender de intervalos prefijados que no incorporan el verdadero desempeño de la plantación o de la especie a cosechar. Sin embargo, sería interesante conocer el comportamiento de la RI a través del tiempo en plantaciones de *Leucaena* con densidades superiores a las de este estudio.

En especies de ciclos anuales o perennes herbáceas, los modelos para describir la dinámica a través del tiempo de la radiación interceptada tienden a ser lineales o logísticos y con menores intervalos de tiempo para alcanzar la máxima radiación interceptada; por ejemplo, Escalante-Estrada *et al.* (2017) en cultivo de frijol ayocote y Gutiérrez-Rodríguez *et al.* (2004) encontraron la máxima intercepción de radiación a los 84 días después de la siembra, y Colabelli *et al.* (2011) quienes reportaron intercepciones máximas de radiación entre los 50 y 60 días de rebrote en diferentes leguminosas y gramíneas herbáceas perennes. Estas diferencias en patrones y tiempos en la cantidad de radiación

interceptada entre especies anuales o perennes herbáceas con respecto de las arbustivas enfatizan la necesidad de considerar a ambos estratos cuando se decidan los momentos de cosechas en sistemas silvopastoriles.

El seguimiento, a través del tiempo de la acumulación de área foliar por métodos no destructivos, fue posible e igual que con intercepción de la radiación; las máximas acumulaciones de áreas foliares se dieron a intervalos de rebrote distintos, aunque en este fue en función de las procedencias para cada una de las estaciones de crecimiento. Espinoza *et al.* (1996) propusieron en *Leucaena* usada como banco forrajero irrigada y fertilizada con NPK cosechas fijas cada 63 días a través del año. Con base en los resultados del presente estudio, mantener un mismo intervalo de cosecha a lo largo del año puede implicar que *Leucaena* no alcance a expresar sus máximos rendimientos, resaltando la importancia de seguimientos no destructivos para decidir el momento de cosecha.

La altura de la planta, como lo fueron las otras variables medidas, permitió identificar las diferentes tasas de desarrollo del cultivo en cada una de las procedencias y sitios de crecimiento. Aguirre-Medina *et al.* (2018) realizaron una cosecha de *Leucaena* a los 120 días del establecimiento y a una altura variable entre 124 y 128 cm, lo que coincidió con la altura de cosecha estimados en este estudio para las procedencias evaluadas en la plantación de Veracruz, aunque con ocho a 57 días más tarde. Espinoza *et al.* (1996) recomendaron la cosecha a los 63 días entre cortes, momento en el cual se lograron 135 y 157 cm de AP durante la sequía y lluviosa, respectivamente, coincidiendo con las AP obtenidas en este estudio también para las procedencias de la plantación de Veracruz.

El seguimiento del desarrollo de *Leucaena* mediante mediciones no destructivas como la intercepción de radiación, área foliar acumulada y altura de planta, mostraron un patrón conjunto de respuesta que permite señalar que todas ellas por sí solas o en conjunto son consistentes en reflejar los cambios asociados al desarrollo de la planta, a la vez de ser sensibles a cambios en este desarrollo asociados a condiciones climáticas como temperatura y disponibilidad de humedad. Este patrón consistente de respuesta de las distintas variables usadas apuntala la conclusión de Espinoza *et al.* (1996), de que la validación de métodos no destructivos para dar seguimiento al desarrollo en pie de cultivos es un importante campo de investigación, por su utilidad práctica.

Por tanto, las variables no destructivas permitieron desarrollar modelos sensibles a describir cambios en el desarrollo de *Leucaena* a través del tiempo y sitios de plantación; sin embargo, queda pendiente la validación de estos modelos para determinar rendimiento de follaje y otros atributos, como interacción con otras especies herbáceas (espontáneas y sembradas), densidad de población, impacto sobre características del suelo (erosión, capacidad de retención de humedad) y aspectos microclimáticos, como humedad relativa. Kanazaqa *et al.* (1982) y Del Pozo y Álvarez (2003) señalaron la existencia de relaciones cuantitativas entre variables, como la acumulación de área foliar, y estos atributos fundamentan la necesidad de continuar con este proceso de validación.

## Conclusiones

La determinación de área foliar y sus cambios a través del tiempo, en las procedencias evaluadas en las plantaciones de Morelos y Veracruz, así como los cambios en la radiación interceptada y altura de planta en plantaciones de *Leucaena* pueden ser determinados por modelos cuantitativos desarrollados a partir de estrategias no destructivas. Los modelos fueron polinomios de segundo grado y logísticos y permitieron determinar los días de rebrote en que se alcanzaron los valores máximos de las variables mencionadas en plantaciones de *Leucaena*. Estos modelos podrían generar la información necesaria para decidir momentos oportunos de cosecha del follaje en plantaciones de *Leucaena* en función de la procedencia del material genético.

## Agradecimientos

Los autores reconocen el financiamiento y apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, la Universidad Autónoma Chapingo y al Tecnológico Nacional de México a través del ITS Tantoyuca para el desarrollo de la disertación doctoral del primer autor. El agradecimiento también es extensivo a los Sres. Claudio y Cleotilde Benítez Cardozo por el espacio facilitado para el desarrollo del trabajo de campo en el ejido Limón, Tepalcingo, Morelos, y al área de Ecofisiología de Cultivos del postgrado en botánica del Colegio de Postgraduados por el apoyo con la instrumentación para la obtención de las variables en estudio.

## Literatura citada

- Aguirre-Medina, J.F.; Gálvez-López, A.L. y Ibarra-Puón, J.C. (2018). Growth of *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit biofertilized with arbuscular mycorrhizal fungi in the nursery. *Rev. Chapingo Ser. Cienc. For. Ambient.* 24(1): 49-58. Doi: 10.5154/r.rchscfa.2017.07.043
- Berman, R. y Saunders, M. (2008). *Dealing with Statistics. What you need to know?* Open University Press. Buckingham, G.B.R. McGraw-Hill Education. London, U.K. 149 p.
- Colabelli, M.R.; Agnusdei, M.G. y Durand, J.L. (2011). Grupos funcionales de plantas, producción de forraje y eficiencia de uso de radiación de pastizales naturales en condiciones potenciales y limitadas de agua y nitrógeno. *Rev. Inv. Agropecu.* 37(1): 62-74.
- Del Pozo, P.P. y Álvarez, A. (2003). Estimación del área foliar de la *Leucaena leucocephala* de la masa seca de sus hojas. En: M.D. Sánchez y M. Rosales, (eds.). *Agroforestería para la Producción Animal en América Latina (II)* No. 155. Dirección de Producción y Sanidad Animal, FAO, Roma, Italia. Pp. 171-181.
- Escalante-Estrada, J.A.S.; Rodríguez-González, M.T. y Escalante-Estrada, Y.I. (2017). Modelos que describen la distribución del rendimiento, sus componentes y radiación solar en ayocote en espaldera de tripie. En: F. Pérez, D. Sepúlveda, R. Salazar, D. Sepúlveda (eds.) *Ciencias Matemáticas aplicadas a la Agronomía*. Handbook T-I.- ©ECORFAN, Texcoco de Mora, México. Pp. 9-17.
- Espinoza, F.; Tejos, R.; Chacón, E.; Arriojas, L. y Argenti, P. (1996). Producción, valor nutritivo y consumo por ovinos de *Leucaena leucocephala*. I. Arquitectura. *Zootec. Trop.* 14(2): 215-239.
- Estrada, L.I.; Esparza, J.S.; Albarrán, P.B.; Yong, A.G.; Rayas, A.A.A. y García M.A. (2018). Evaluación productiva y económica de un sistema silvopastoril intensivo en bovinos doble propósito en Michoacán, México. *Cienc. Ergo-Sum.* 25(3): 1-13.
- García, E. (2005). *Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen*. 4a Edición. Instituto de Geografía. Universidad Autónoma de México. México, D.F. 217 p.

- Gutiérrez-Rodríguez, M.; Escalante-Estrada, J.A.; Rodríguez-González, M.T. y Reynolds, M.P. (2004). Índices de reflectancia y rendimiento del frijol con aplicaciones de nitrógeno. *Terra Latinoam.* 22(4): 409-416.
- IUSS Working Group WRB. (2010). Guidelines for constructing small-scale map legends using the WRB. FAO, Rome. URL: <http://www.fao.org/nr/land/soils/soil/wrb-documents/en/>
- Kanazaqa, T.; Sato, A. y Orsolino, R.S. (1982). Above-ground biomass and the growth of giant ipil ipil [*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit] plantations in Northern Mindanao Island, Philippines. *J. A. R. Q.* 15 (3): 209-217.
- Kuhn, M. y Johnson, K. (2018). *Applied predictive modeling*. New York, USA: Springer. 527 p.
- Latt, C.R.; Nair, P.K.R. y Kang, B.T. (2000). Interactions among cutting frequency, reserve carbohydrates, and post-cutting biomass production in *Gliricidia sepium* and *Leucaena leucocephala*. *Agrofor. Syst.* 50(1): 27-46.
- Piñeiro-Vázquez, A.T.; Jiménez-Ferrer, G.O.; Chay-Canul, A.J.; Casanova-Lugo, F.; Díaz-Echeverría, V. F.; Ayala-Burgos, A.J.; Solorio-Sánchez, F.J.; Aguilar-Pérez, C.F. y Ku-Vera, J.C. (2017). Intake, digestibility, nitrogen balance and energy utilization in heifers fed low-quality forage and *Leucaena leucocephala*. *Anim. Feed Sci. Technol.* 228: 191-201. Doi: 10.1016/j.anifeedsci.2017.04.009.
- Sánchez, G.A.; Fariá, M.J. y Araque, C. (2008). Producción de materia seca en una asociación *Cenchrus ciliaris*-*Leucaena leucocephala* al aplazar su utilización durante la época seca. *Zootec. Trop.* 26(2): 117-123.
- SAS (Statistical Analysis System). (2013). SAS® 9.4 Statements: Reference. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA. 460 p.
- Villanueva, C.; Casasola, F. y Detlefsen, G. (2018). *Potencial de los sistemas silvopastoriles en la mitigación al cambio climático y en la generación de múltiples beneficios en fincas ganaderas de Costa Rica*. Boletín Técnico No. 87. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica. 61 p.

Recepción: 25 de septiembre 2019

Arbitraje: 12 de noviembre 2020

Dictamen: 18 de enero 2020

Aceptado: 13 de junio 2020