

NOTA CORTA [SHORT NOTE]

*Tropical and
Subtropical
Agroecosystems*

MODELO TEÓRICO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD
RADICULAR DE DOS ESPECIES LEÑOSAS

[THEORETICAL MODEL FOR ESTIMATING THE DENSITY ROOT OF
TWO WOODY SPECIES]

Fernando Casanova Lugo^{1*}, José Armando Escamilla Bencomo^{1†}
and Luis Ramírez Avilés²

¹Unidad de Bioquímica y Biología Molecular de Plantas. Centro de Investigación Científicas de Yucatán, A.C. Calle 43 No 130 Col. Chuburná de Hidalgo. CP. 97200. Mérida, Yucatán, México. Email. fernando215_45@hotmail.com

²Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Autónoma de Yucatán, México. Carretera Mérida-Xmatkuil Km. 15.5 CP. 97100 Mérida, Yucatán, México.

Email: raviles@uady.mx

*Corresponding author

RESUMEN

Los estudios de raíces en especies leñosas son de gran importancia ya que con ellos se puede predecir o modelar el crecimiento vegetal bajo diferentes esquemas de manejo y/o condiciones ambientales. Sin embargo, la metodología para calcular la densidad radicular (L_v) es laboriosa y consume mucho tiempo. Un método alternativo y rápido se basa en el conteo del número de raíces (N) que interceptan un plano de suelo, ya que puede ser convertido a L_v debido a la relación teórica $L_v = 2N$. El objetivo del presente trabajo fue evaluar un modelo teórico para determinar la densidad radicular de dos especies leñosas (*Leucaena leucocephala* y *Zapoteca formosa*) tomando plantas de 11 meses de edad que fueron plantadas en tubos de PVC (\varnothing 15 cm) en una mezcla arenosa (2:1). Una vez que las plantas alcanzaron 11 meses de edad, se obtuvieron muestras de la mezcla y las raíces de tres estratos de cada tubo en incrementos de 10 cm, de los cuales se obtuvieron 4 muestras por cada especie. El número de raíces, se contabilizó a partir de tres tamaños de cubo (10, 7.5 y 5 cm por lado), en tres planos (X , Y y Z). Posteriormente, la densidad radicular se determinó por digitalización de imágenes para después relacionarla con la predicha por el modelo matemático. Los resultados mostraron que N fue diferente por plano de suelo entre especies y que ésta no depende del tamaño del plano, con excepción del plano Z ($P < 0.01$), indicando que la preferencia de crecimiento es más vertical que horizontal para las dos especies. Los coeficientes de la relación entre la densidad radicular y el número de raíces fueron diferentes por especie ($P < 0.01$). El presente estudio se condujo principalmente para encontrar una relación entre la L_v predicha por el modelo matemático y la observada por el método del lavado de raíces. Si ésta

relación hubiera sido alta, sería una muestra de que el modelo matemático pudiera ser utilizado en lugar del método de lavado de raíces, que es mucho más tardado y laborioso. No obstante, la correlación observada fue baja, ya que sólo nos permite inferir en el 35 y 37 % de los casos para *L. leucocephala* y *Z. formosa*, respectivamente.

Palabras Clave: Intersecciones; isotropía; raíces finas.

SUMMARY

Root studies on woody species are necessary to predict or to mathematically model plant growth under different management and/or environmental conditions. Nevertheless, the methodology to calculate root density (L_v) is laborious and time consuming. An alternative and quick method is based on assessment of the root number (N) that intercept a soil profile, since it can be converted into L_v due to the theoretical relationship $L_v = 2N$. The present study was aimed at evaluating a theoretical model to estimate root density of two woody species (i.e. *L. leucocephala* and *Z. formosa*) using eleven-months-old plants sown into PVC tubes (15 cm diameter) containing a luvisol-sand mixture (2:1). When plants reached nine months old, four PVC tubes per species were selected at random; then three 10cm-PVC-layer, containing the soil mixture and roots, were taken from each PVC tube starting from the upper part for both species. Root number were measured from three cube sizes (i.e. 10, 7.5 and 5 cm per side) and three soil profiles (i.e. X , Y and Z). Subsequently, root density was measured using image digitalization and relate with the predicted density from the mathematical model. It was found that, N was different between species for each soil

profile, and it did not depend on the profile size, except for the Z profile ($P < 0.001$), meaning that the growth preference was vertical rather than horizontal for both species. Root density and number correlation coefficients were different ($P < 0.01$) between species. The present study was undertaken mainly to find a relationship between L_v mathematically predicted and the measured L_v using the root washing method. Should this relationship would be high, then it would

INTRODUCCION

La limitada información sobre los sistemas radiculares de las especies arbóreas, comparada con la amplia información generada sobre el sistema aéreo se asocia principalmente con la dificultad de la observación y evaluación, ya que estos se encuentran dentro de la matriz del suelo. Los modelos del crecimiento vegetal requieren de la medida del sistema de la raíz y para ello se utilizan parámetros como el crecimiento radicular y la densidad radicular (Comerford, 2005). Este último se mide como longitud de raíces por el volumen de suelo (cm/cm^3) y se conoce como " L_v ". Esta medición es laboriosa y requiere mucho tiempo, debido a la extracción de muestras de suelo-raíz, las cuales pueden ser inmediatamente procesadas o almacenadas bajo refrigeración, lavadas (manual o mecánicamente) y clasificadas (e.g. raíces vivas y muertas, y basura). Las variables a medir son diversas, siendo las más frecuentes la biomasa de raíces y la densidad de las raíces en longitud, medida en cm de raíz por cm^3 de suelo (Escamilla, 1999, Tamayo *et al.*, 2004).

Uno de los métodos alternativos utiliza el número de las intersecciones de la raíz con un plano del suelo y se reporta como " N " ($\text{puntos}/\text{cm}^2$), y se convierte a L_v debido a la relación teórica $L_v = 2N$, donde se asume que las raíces son isotrópicas, es decir las raíces no crecen en ninguna dirección preferencial del espacio. Si las raíces son anisotrópicas, la ecuación se convierte en $L_v = 2N_{\text{prom}}$, donde está el medio de los valores de N medidos en las tres caras mutuamente perpendiculares de un bloque del suelo (Meluish y Lang, 1968).

Varios autores han encontrado coeficientes diferentes a 2. Por ejemplo, los coeficientes se extienden de $L_v/N=1$ para el pino (*Pinus elliotii Engelm*), lo que sugiere una tendencia vertical preferencial para las raíces (Escamilla *et al.*, 1991), para el trigo (*Triticum aestiva* L.) se obtuvo $L_v/N= 3.9$, con lo que se demostró que las raíces crecen de forma más horizontal (Bland, 1989). Sin embargo, Bennie *et al.* (1977) obtuvieron un coeficiente de 2 para girasol (*Helianthus annuus* L.) y algodón (*Gossypium hirsutum* L.). Realmente, la relación todavía sería válida para un sistema anisotrópico de la raíz usando el

have demonstrated that the mathematical model could be used instead of the root washing method, which is laborious and time consuming. However, it was found that the correlation was low, since it only allows 35 and 37% prediction for *L. leucocephala* and *Z. formosa*, respectively.

Key words: Fine roots, intersections, isotropy.

valor medio del número de las intersecciones de la raíz en las tres dimensiones mutuamente perpendiculares del espacio (Baldwin *et al.*, 1971; Marriott, 1972) entonces, la relación se convierte: $L_v = 2N_{\text{prom}}$.

En las regiones tropicales, se encuentran las especies de leguminosas *Leucaena leucocephala* y *Zapoteca formosa* ambas con alto valor nutricional para la alimentación animal. En particular, *L. leucocephala* es una de las especies de leguminosas multipropósito más versátiles disponible en las regiones tropicales (Shelton, 1998). Por su parte, *Z. formosa* es una leguminosa que, aunque de reciente introducción a los sistemas agrícolas, su calidad forrajera y fácil adaptación le confieren un gran potencial para los sistemas asociados (Newman *et al.*, 1999).

Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo consistió en evaluar un modelo teórico para determinar la densidad radicular en laboratorio de dos especies leñosas: *L. leucocephala* y *Z. formosa*.

MATERIAL Y MÉTODOS

Sitio experimental

El estudio se realizó en la Unidad de Bioquímica y Biología Molecular de Plantas del Centro de Investigaciones Científica de Yucatán (CICY), localizado en la ciudad de Mérida, Yucatán.

Manejo Experimental

Se sembraron semillas de *L. leucocephala* y *Z. formosa* en 100 tubetes (4 semillas por cada uno) de plástico tipo Broadway de 16 cm de altura, 5.5 cm en la parte superior y 4.5 cm de diámetro en la parte inferior, los cuales fueron colocados en invernadero de acrílico con regulación automática de temperatura (30 °C) y humedad (80%), y con entrada de 75% de luz solar complementada con luz artificial durante el día. Inmediatamente después de la emergencia de las plántulas, se raleó a un individuo por tubete. A seis meses de la germinación, se trasplantaron 20 plántulas (las más desarrolladas) de cada especie a contenedores (una planta por recipiente) de PVC hidráulico (15 cm de diámetro x 50 cm de profundidad) ubicados en el

mismo invernadero. Dichos contenedores fueron llenados con una mezcla 2:1 de suelo tipo Luvisol, característico de esta zona y arena (de la costa, pero no cercana al mar, sin cribar y con un tamaño de partícula de 0.63 a 2 mm); dicha mezcla se mantuvo a capacidad de campo (-0.015 MPa) mediante la aplicación de riego y el monitoreo con un sensor de humedad tipo Theta Probe®. En la parte inferior de cada tubo de PVC, se colocó una malla fina para evitar el lavado del suelo. Previamente, se cuantificó el porcentaje de humedad a capacidad de campo de la mezcla de tierra:arena, para lo cual se utilizó un tubo de PVC de 15 cm de diámetro por 30 cm de longitud al que se le agregó lenta y uniformemente un litro de agua; a las 12 h se cuantificó la cantidad de agua (gravitacional) recogida en una charola en la parte inferior del tubo. Por diferencia, entre la cantidad de agua agregada y la recogida, se estimó la cantidad de agua requerida (%) para llegar a capacidad de campo. Este dato fue utilizado para mantener la mezcla de suelo a capacidad de campo, durante todo el experimento, mediante la medición del porcentaje actual de humedad del suelo cada segundo día y la adición del volumen de agua requerido.

Conforme desarrollaron las plántulas en cada tubo de PVC y las raíces alcanzaron la profundidad del contenedor, se adicionaron otras secciones de tubo de PVC de 30 cm con la finalidad de no limitar el crecimiento de las raíces. A los 11 meses de trasplante, se tomaron al azar cuatro contenedores de PVC de

cada especie y se dividieron horizontalmente en secciones de 10 cm, de la superficie al fondo del tubo con ayuda de una cierra cinta. Para obtener las muestras para el presente estudio, únicamente se tomaron las primeras tres secciones (profundidades) del tubo (i.e. 0-10, 10-20 y 20-30 cm).

Medición de las raíces (cuantificación de N)

Se utilizaron tres cubos metálicos (desarmables) de diferentes dimensiones (i.e. 10, 7.5 y 5 cm por lado), los cuales fueron previamente identificados en cada uno de sus planos; X, Y, Z (Fig. 1). Para cuantificar el número de intersecciones de las raíces, se modificó la metodología reportada por Lopez-Zamora *et al.* (2002), la cual consiste introducir un cubo de 10 cm por lado (menor al reportado por los citados autores) en cada una de las muestras de suelo y raíces de las plantas evaluadas (secciones de los tubos de PVC, humedecidas con anterioridad). Posteriormente, el cubo metálico de 10 cm por lado, junto con su contenido (i.e. suelo y raíces), fue retirado de la muestra del tubo de PVC, lo que resultó en un cubo de suelo perfectamente definido. A continuación, se cuantificaron las raíces que interceptan el plano Z, sin separar el cubo metálico de su contenido, ya que la muestra podría desmoronarse y perderse. Posteriormente, se retiró momentáneamente el cubo metálico de su contenido para cuantificar las raíces que interceptan los planos restantes (X, Y).

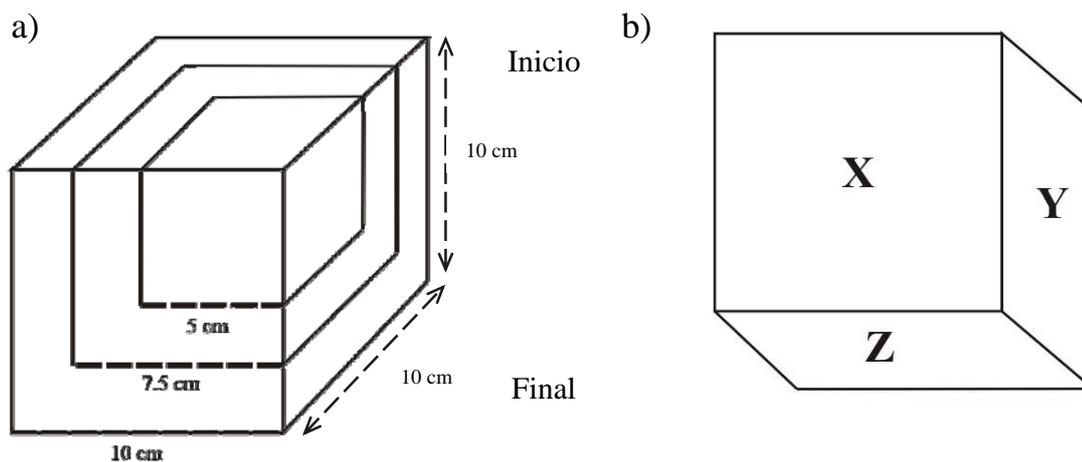


Figura 1. a) Arreglo espacial de tres cuadrantes (10, 7.5 y 5 cm por lado). b) Ubicación de los ejes o planos del cuadrante para el muestreo de raíces en secciones de suelo. En donde los planos X y Y pertenecen a la tendencia de crecimiento horizontal de las raíces y el plano Z pertenece a la tendencia vertical

Para contabilizar las raíces que interceptan los planos del cubo fue necesario utilizar una hoja de acetato transparente para representar la distribución espacial de las raíces por medio de puntos dentro de cada plano. Después, el cubo metálico fue devuelto a su posición original en la sección de tubo PVC correspondiente para evitar confundir los planos, además de evitar que la muestra se desmorone al insertar otro cubo de menor tamaño dentro de la misma sección del tubo de PVC. El procedimiento seguido para el cubo de 10 cm por lado fue similar para los otros tamaños del cubo (i.e. 7.5 y 5 cm); aunque para estos sólo fue necesario cuantificar el plano Z, ya que los planos X, Y son comunes para cualquier tamaño de cubo, tal como se aprecia en la Fig. 1. Cabe mencionar que, se utilizó una pinza y un pincel para tener mayor visibilidad de las raíces.

Para finalizar, los contenidos de los tres tamaños de cubo fueron almacenados e identificados en bolsas plásticas transparentes y refrigeradas a 4 °C hasta su posterior análisis de imágenes.

Medida de las raíces: determinación de la longitud y cálculo de L_v

Las muestras que resultaron de la cuantificación de raíces (N) fueron lavadas manualmente y separadas en raíces vivas y muertas. La densidad radicular (L_v) fue calculada usando el metodología de análisis de imágenes reportada por Escamilla *et al.* (1991), Tamayo *et al.* (2004) y Delgado (2005), la cual consiste en extender las raíces en un recipiente con agua o en una hoja en blanco, prensarlas en un acrílico transparente y digitalizarlas con ayuda de un escáner de alta resolución (1,200 puntos por pulgada). Posteriormente, las imágenes fueron procesadas con el programa RootEdge© versión 2.3b, para obtener la longitud total de las raíces y estimar la densidad radicular (Kaspar and Ewing, 1997; Tamayo *et al.*, 2004).

Análisis estadísticos

Se utilizó un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones ($n=4$), en un arreglo factorial 2 x 3, resultado de la combinación de dos especies (*L. leucephala* y *Z. formosa*), y tres tamaños de cubo metálico (i.e. 10, 7.5 y 5 cm). Se realizó un ANOVA de dos factores para verificar la influencia de los planos de suelo (X, Y, Z). Asimismo, se empleó una prueba de t-student en la comparación de pares de las caras del cubo de suelo para todos los tamaños con el fin de observar si existen diferencias entre los planos de suelo y poder describir la preferencia de crecimiento radicular de la especies.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El número de raíces que interceptaron los planos X, Y, Z (N) fue diferente entre especies ($P<0.01$). No obstante, el número de raíces que intercepta cada plano de suelo no depende del tamaño de la muestra (i.e. tamaño del cubo) ($P>0.05$) con excepción del plano Z ($P<0.01$). De igual manera, la interacción especie y tamaño del cubo no fue significativa ($P>0.05$).

El número promedio de raíces (N_{prom}) que intercepta un plano (todas las muestras) es cuando menos el doble para *L. leucocephala* (0.72) en comparación con *Z. formosa* (0.36), por lo que se estima que su densidad radicular es también dos veces mayor. Asimismo, el número de raíces obtenidas en un volumen de 5 cm en *L. leucocephala* (1.25) y *Z. formosa* (0.66), fue mayor con relación a los otros cubos (7.5 y 10 cm) (Tabla 1).

La estimación de la densidad radicular a partir del valor N (puntos/cm²) es más rápida que a partir de la extracción total de las raíces del suelo (L_v , reportado como cm/cm³). En el presente caso, esta metodología es suficiente cuando se desea saber si una especie produce más raíces que otra. Sin embargo, para estimar la capacidad de absorción de agua y nutrientes del suelo, la estimación de la densidad radicular como L_v es necesaria. Para ello, se pueden extraer las raíces del suelo y determinar su longitud o convertir los valores de N a valores de L_v (López-Zamora *et al.*, 2002).

Meluish y Lang (1968) propusieron que esto es posible con la relación $L_v=2N$ asumiendo que el sistema radicular es isotrópico. Esto indica que el número de raíces que intercepta un plano es el mismo para cualquier plano que se evalúe. Cuando se compararon los valores de N por pares de planos del suelo (Tabla 2) se encontró que, el valor de N para el plano Z fue diferente estadísticamente tanto para *L. leucocephala* como para *Z. formosa* ($P<0.01$). Existe un mayor número de raíces interceptando el plano Z que las otras caras, por lo que la preferencia del crecimiento es más vertical que horizontal tanto para *L. leucocephala* ($N_z=0.96$ mayor que $N_x=0.64$ y $N_y=0.56$) como para *Z. formosa* ($N_z=0.49$ mayor que $N_x=0.31$ y $N_y=0.30$). Esto demuestra que el sistema radicular de cada especie no es isotrópico, por lo que la relación $L_v=2N$ no podría aplicarse.

Meluish y Lang (1968) señalan que, la relación mencionada podría aún ser válida si en lugar de N se toma el valor N promedio de los tres planos (X, Y, Z), lo cual implica que para cada estudio, se debe determinar el valor de N en los 3 planos, lo que resulta más laborioso. En el presente estudio, al comprobar

que N_z fue diferente, entonces, la conversión a valores de L_v solamente podría proponerse usando valores de N_{prom} . Estos fueron diferentes solamente entre las dos especies ($P < 0.01$) siendo el doble para *L. leucocephala* ($N_{prom}=0.72$) que para *Z. formosa* ($N_{prom}=0.36$) (Tabla 1).

Tabla 1. Descripción estadística del número de raíces obtenidas en los planos de tres diferentes volúmenes de suelo.

Tamaño del cubo (cm)	Comparación de planos	N (puntos/cm ²)	Error Estándar
<i>L. leucocephala</i>			
5	X	0.64	±0.07
	Y	0.50	±0.07
	Z	1.25	±0.12
	N_{prom}	0.80	±0.08
7.5	X	0.66	±0.07
	Y	0.57	±0.07
	Z	0.86	±0.12
	N_{prom}	0.70	±0.08
10	X	0.61	±0.07
	Y	0.62	±0.07
	Z	0.78	±0.12
	N_{prom}	0.67	±0.08
todas las muestras	X	0.64	±0.04
	Y	0.56	±0.03
	Z	0.96	±0.07
	N_{prom}	0.72	±0.04
<i>Z. formosa</i>			
5	X	0.31	±0.05
	Y	0.34	±0.05
	Z	0.66	±0.08
	N_{prom}	0.44	±0.05
7.5	X	0.32	±0.05
	Y	0.28	±0.05
	Z	0.43	±0.08
	N_{prom}	0.34	±0.05
10	X	0.29	±0.05
	Y	0.27	±0.05
	Z	0.37	±0.08
	N_{prom}	0.31	±0.05
todas las muestras	X	0.31	±0.03
	Y	0.30	±0.04
	Z	0.49	±0.05
	N_{prom}	0.36	±0.03

Tabla 2. Valores de P obtenidos utilizando la t-student en la comparación de pares de los planos del cubo de suelo (todas los tamaños).

Especie	Comparación de los planos	Valor de P
<i>L. leucocephala</i>	X-Y	0.3566
	X-Z	0.0151
	Y-Z	0.0032
<i>Z. formosa</i>	X-Y	0.6813
	X-Z	0.0001
	Y-Z	0.0001

Los coeficientes de la relación L_v y N fueron diferentes entre especies ($P > 0.05$), pero no entre el tamaño del cuadrante o del cubo de donde se determinaron ni para la interacción especie tamaño del cubo ($P < 0.01$). Los coeficientes calculados entre N y L_v observada se usaron como indicativos para determinar si eran diferentes a 2.0. Los coeficientes fueron mayores a 2.0 tanto para *L. leucocephala* como para *Z. formosa* (Tabla 3). Esta preferencia de crecimiento vertical, coincide con lo reportado por López-Zamora *et al.* (2002), quienes encontraron coeficientes de 4.9 y 8.8 para *Melaleuca quinquenervia* y *Bractris gasipaes*, respectivamente. Con esto se asume que, el crecimiento para dichas especies es preferencialmente más horizontal que vertical. Este hecho es congruente con lo reportado por varios autores que han encontrado coeficientes de 1 para el pino (*Pinus elliotii* Engelm), sugiriendo una tendencia vertical preferencial para las raíces (Escamilla *et al.*, 1991). Para el trigo (*Triticum aestiva* L.), se obtuvo un coeficiente de 3.9 sugiriendo un crecimiento más horizontal (Bland, 1989). Para el girasol (*Helianthus annuus* L.) y algodón (*Gossypium hirsutum* L.) los coeficientes se han ajustado a 2 siguiendo la relación teórica propuesta por Meluish y Lang (1968). En este estudio, los sistemas radiculares de las dos especies evaluadas son anisotrópicos y la relación solamente es válida utilizando el valor medio de N para obtener el coeficiente de dicha relación, según sugiere Baldwin *et al.* (1971) y Marriott (1972). Los datos del presente estudio mostraron un coeficiente de 5.4 para *L. leucocephala* y de 3.0 para *Z. formosa* expresando una preferencia horizontal del crecimiento radicular para las dos especies. Como el valor de N_z para cada especie fue diferente, surge la pregunta si el coeficiente de la relación L_v y N para Z es diferente del coeficiente para la relación N_{prom} . Para las especies estudiadas, este coeficiente no es diferente si se calcula de la cara Z o del N_{prom} . Para *L. leucocephala*, el coeficiente calculado de N_z fue de 4.36, el cual es muy similar a 5.42 calculado del N_{prom} ; para *Z. formosa* el coeficiente calculado fue de 2.32, el cual es muy similar a 2.99 calculado del N_{prom} .

Tabla 3. Descripción estadística de los coeficientes obtenidos en los planos de diferentes volúmenes de suelo.

Especie	Comparación de la cara	Tamaño del cubo (cm)	Coficiente	Error Estándar
<i>L. leucocephala</i>	N _{prom}	5	5.9	±0.71
	N _{prom}	7.5	5.6	±0.71
	N _{prom}	10	4.8	±0.71
	N _{prom}	Todas las muestras	5.4	±0.41
	X	5	7.7	±0.88
	X	7.5	5.7	±0.88
	X	10	5.2	±0.88
	X	Todas las muestras	6.2	±0.51
	Z	5	3.7	±0.63
	Z	7.5	5.1	±0.63
	Z	10	4.3	±0.63
	Z	Todas las muestras	4.4	±0.36
	<i>Z. formosa</i>	N _{prom}	5	2.9
N _{prom}		7.5	3.2	±0.50
N _{prom}		10	2.9	±0.50
N _{prom}		Todas las muestras	3.0	±0.29
X		5	4.2	±0.62
X		7.5	3.9	±0.62
X		10	3.1	±0.62
X		Todas las muestras	3.7	±0.36
Z		5	1.9	±0.45
Z		7.5	2.5	±0.45
Z		10	2.5	±0.45
Z		Todas las muestras	2.3	±0.26

La razón que el coeficiente sea mayor de 2.0 puede asociarse, entre otras cosas, con la dificultad para identificar raíces que interceptan un plano de suelo, ya que el visualizar menos raíces (puntos/cm²) en un plano de suelo que las que realmente existen, resultaría en un coeficiente mayor a 2.0 (López-Zamora *et al.*, 2002). En el presente estudio, se propone que este error fue minimizado ya que el conteo de puntos se realizó en condiciones controladas de laboratorio donde las plantas crecieron en contenedores de PVC y además las dos especies estudiadas presentan raíces con diámetros promedios de 0.13 cm, para el caso de *L. leucocephala*, y de 0.12 cm en *Z. formosa* correspondientes a raíces finas con diámetros mayores a otras especies estudiadas como el girasol, trigo, maíz, entre otros, las cuales por su diámetro de raíz más fino es más probable que el número de puntos observados sea menor que el número de puntos que interceptan el plano de suelo.

La arquitectura radicular es un parámetro genético de las especies que dicta la isotropía o anisotropía del

sistema radicular, ya que el número de bifurcaciones, distancia entre ramificaciones y ángulos de los planos radiculares afectará que la arquitectura del sistema sea isotrópica o no (López-Zamora *et al.*, 2004). Tomando esto en cuenta, el tamaño del área de suelo donde se realiza la observación debe afectar la relación entre L_v y N . Los resultados tanto para *L. leucocephala* como para *Z. formosa* no dependieron del tamaño de la superficie o volumen evaluado; sin embargo, las tendencias de los coeficientes en función del tamaño muestreado sugieren que para *L. leucocephala* un tamaño mayor de muestreo de raíces disminuye el coeficiente calculado de N_{prom} (Tabla 3). Mientras que para *Z. formosa* no hubo ninguna tendencia. Lo anterior sugiere que, el tamaño óptimo para determinar la densidad radicular depende de la especie y en el presente caso, para *L. leucocephala* cuando menos debe de ser de 10 cm mientras que para *Z. formosa*, una superficie de 5 cm sería suficiente para realizar estudios de su sistema radicular. Los resultados muestran una baja correlación positiva entre la L_v predicha y la L_v observada para las dos especies, 0.35

para *L. leucocephala* y de 0.37 para *Z. formosa* (Figura 2 y 3). Este valor de correlación bajo, podría deberse al reducido número de las muestras, por lo cual se plantea incrementarlo para el conteo de las raíces. Los resultados de la r^2 muestran que se requieren más

estudios para que la metodología del conteo de puntos describa de manera satisfactoria la densidad radicular para ambas especies, ya que sólo permite inferir que el 35% de los casos correlaciona con la observada para *L. leucocephala* y de 37% para *Z. formosa*.

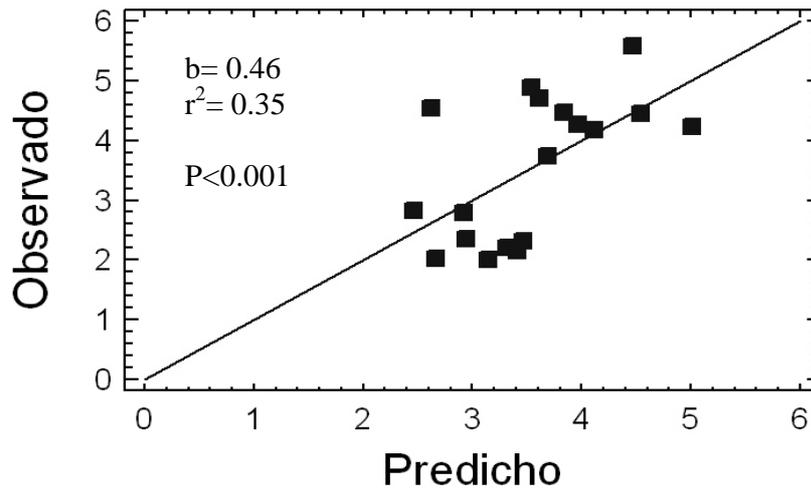


Figura 2. Regresión lineal de la densidad radicular L_v (cm/cm^3) de *L. leucocephala*. Se comparan las N_{prom} multiplicada por su coeficiente obtenido (5.42) para la L_v predicha vs L_v real (observada por análisis de imágenes).

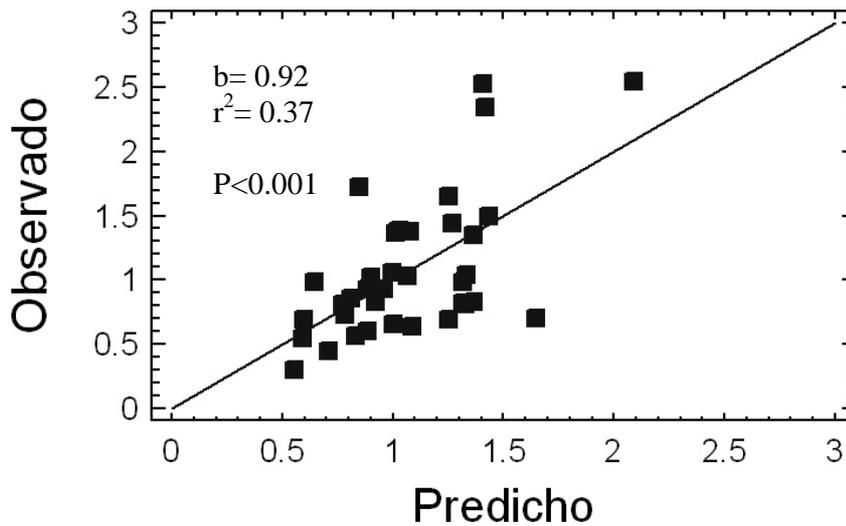


Figura 3. Regresión lineal de la densidad radicular L_v (cm/cm^3) de *Z. formosa*. Se comparan las N_{prom} multiplicada por su coeficiente obtenido (2.99) para la L_v predicha vs L_v real (observada por análisis de imágenes).

CONCLUSIONES

La determinación de la densidad radicular (L_v) de *L. leucocephala* y *Z. formosa* se puede obtener a partir del valor promedio del número de intersecciones de las raíces (N_{prom}) utilizando los coeficientes de 5.4 y 3.0, respectivamente.

Se recomienda un cubo de evaluación de 10 cm por lado para determinar densidades radiculares en *L. leucocephala* y de 5 cm por lado para *Z. formosa*.

El presente estudio se desarrolló principalmente para encontrar una relación entre la L_v predicha por el modelo matemático y la observada por el método del lavado de raíces. Si ésta relación hubiera sido alta, sería una muestra de que el modelo matemático pudiera ser utilizado en lugar del método de lavado de raíces, que es mucho más tardado y laborioso. No obstante, la correlación observada fue baja, ya que sólo nos permite inferir en el 35 y 37 % de los casos para *L. leucocephala* y *Z. formosa*, respectivamente.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es en memoria del Dr. José Armando Escamilla Bencomo (q.e.p.d.) un gran amigo y maestro. Asimismo se agradece, al CICY, por todas las facilidades brindadas en equipo e instalaciones, así como la valiosa asistencia técnica del Ing. Agro. Adolfo Guzmán Antonio y de la M. en C. Manuela Tamayo Chim.

REFERENCIAS

- Baldwin, I. P., Tinker, P. B. and Marriott, F. H. C. 1971. The measurement of length and distribution of onion roots in the field and laboratory. *Journal of Applied Ecology*. 8, 543–554.
- Bennie, A. T., Taylor, H. M. and Georgen, P. G. 1977. An assessment of the core break method for estimating rooting density of different crops in the field. *Soil and Tillage Research*. 9: 347-353.
- Bland, W. L. 1989. Estimating root length density by the core-break method. *Soil Science Society of American Journal*. 53:1595-1597.
- Comerford, N. B. 2005. Soil factors influencing soil nutrient availability and uptake by plant roots: Soil Nutrient Bioavailability. In H. BassiriRad, Ed. *Ecological Studies; Nutrient Acquisition by Plants: An Ecological Perspective*. Springer-Verlag. pp 1-14.
- Delgado, G. H. 2005. Rendimiento de Forraje, densidad radicular y relaciones suelo-agua de *P. maximum* Jacq., solo y asociado con diferentes densidades de *L. leucocephala* Lam. Universidad Autónoma de Yucatán. Tesis de Doctorado. Yucatán, México. 198 p.
- Escamilla, B. J. A. 1999. Estudios de Suelos y de Ecosistemas Vegetales. In: Orellana, R.; Escamilla, B.J.A. y Larqué, S.A. (eds.). *Ecofisiología Vegetal y Conservación de los Recursos Genéticos*. Centro de Investigación Científica de Yucatán. Mérida, Yucatán, México. pp.121-123.
- Escamilla, J. A., Comerford, N. B. and Neary, D. G. 1991. Soil core-break method to estimate pine root distribution. *Soil Science Society of American Journal* 55: 1722-1726.
- Kaspar, T. C. and Ewing, R. P. 1997. Rootedge: Software for measuring root length from desktop scanner images. *Agronomy Journal*. 89, 932–940.
- Lopez-Zamora, I., Comerford, N. B. and Muchovej, R. M. 2004. Root development and competitive ability of the invasive species *Malaleuca quinquenervia* (Cav.) S.T. Blake in the South Florida flatwoods. *Plant and Soil*. 263: 239-247.
- Lopez-Zamora, I., Falcaño, N., Comerford, N. B. and Barros, N. F. 2002. Root isotropy and an evaluation of a method for measuring root distribution in soil trenches. *Forest Ecology and Management*. 166:303–310.
- Newman, Y., Delgado, H., Zambrano, J. y Sthormes, G. 1999. *Zapoteca formosa* (Kunth) H. Hern. subsp. *formosa*: nueva especie forrajera arbustiva natural para Venezuela. I. Estudio de fenología y contenido nutricional. *Revista de la Facultad de Agronomía-LUZ*. 16: 196-203.
- Marriott, F. H. C. 1972. Buffon's problem for non-random distribution. *Biometrics*. 28: 621-624.
- Melhuish, F. W. and Lang, A. G. R. 1968. Quantitative studies of roots in soil. I. Length and diameters of cotton roots in clay-loam soil by analysis of surface ground blocks of resin impregnated soil. *Soil Science*. 106: 16-22.
- Shelton, H.M. 1998. The *L. leucocephala* Genus: New Opportunities for Agriculture (A review of

Workshop Outcomes). ACIAR Proceedings No. 86: 15-24.

Tamayo, M. J., Casanova, L. F., Guzmán, A. A., Quintal, T. F., Ramírez, A. L. y Escamilla, B. J. A. 2004. Descripción del componente

radical de cinco especies leñosas como indicadores del potencial de establecimiento. XXXII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Versión electrónica en disco compacto. León, Guanajuato, México.

Submitted June 16, 2008 – Accepted November 24, 2009
Revised received February 18, 2009