



Ensayos de tensión y flexión en raíces de dos especies tropicales

Tension and bending tests in roots of two tropical species

Ofelia Andrea Valdés-Rodríguez^{1*}, Ángel Eduardo Jiménez Alonso²,

Alberto Servín Martínez² y José Tejero Andrade²

1 El Colegio de Veracruz. Xalapa, Veracruz, México.

2 Tecnológico Nacional de México campus Veracruz. Veracruz, Veracruz, México.

* Autor de correspondencia. valdesandrea@hotmail.com

RESUMEN

Las raíces de las plantas permiten evitar la pérdida del suelo al formar mallas que lo retienen, especialmente en suelos arenosos debido a la poca cohesión de estos sustratos; sin embargo, la literatura técnica sobre la ejecución de las pruebas para caracterizar raíces es escasa, por lo que se requiere documentar su caracterización. Los objetivos de este trabajo fueron documentar y caracterizar las propiedades mecánicas de dos raíces de especies tropicales mediante pruebas de tensión y flexión. Para ello se diseñaron dispositivos especiales para sujetar raíces de *Jatropha curcas* L. y *Ricinus communis* L. extraídas de suelos arenosos. Las raíces se sometieron a pruebas de tensión y flexión y se estimaron sus módulos de Young en tensión, así como los esfuerzos máximos de flexión. Los módulos de Young en tensión obtenidos variaron en intervalos de 6.27 MPa a 334 MPa para *R. communis* y de 4.56 MPa a 271 MPa para *J. curcas*, con diámetros entre 0.5 mm y 6.8 mm para ambas especies; en las pruebas de flexión las raíces nunca alcanzaron el punto de ruptura, pero los esfuerzos máximos registrados fueron de 21 MPa y 28 MPa, para *Ricinus* y *Jatropha*, respectivamente. Se concluye que las raíces de *Jatropha* y *Ricinus* poseen módulos de elasticidad muy bajos, similares a otras raíces de especies herbáceas y arbóreas, con una muy alta flexibilidad y comparables con las propiedades del polietileno de baja densidad.

PALABRAS CLAVE: *Jatropha curcas*, módulo de Young, *Ricinus communis*, suelos arenosos.

ABSTRACT

Plant roots help to avoid soil loss since they form meshes that retain it, especially in sandy soils with low cohesion. However, technical documentation over the execution of tests to characterize roots is scarce; therefore, a detailed approach is required in order to perform reliable studies. The objectives of this work are to document and characterize the mechanical properties of the roots of two tropical species through tension and bending tests. To this end, special devices were designed to hold roots of *Jatropha curcas* L. and *Ricinus communis* L. extracted from sandy soils. The roots were subjected to tension and bending tests and their corresponding modulus of Young were estimated, as the maximum bending stresses. The Young tension moduli varied between 6.27 MPa to 334 MPa for *Ricinus* and 4.56 MPa to 271 MPa for *Jatropha*, with diameters between 0.5 mm and 6.8 mm for both species; during the bending tests, the roots never reached the breaking point, but they registered maximum stress values of 21 MPa and 28 MPa for *Ricinus* and *Jatropha* respectively. It is concluded that roots of *Jatropha* and *Ricinus* have low moduli of elasticity values, similar to other herbs and trees roots, with a very high flexibility, comparable to low density polyethylene.

KEYWORDS: *Jatropha curcas*, *Ricinus communis*, Young modulus, sandy soils.

INTRODUCCIÓN

La cubierta vegetal que se forma por comunidades de plantas diversas contribuye a reforzar el suelo y evitar deslizamientos superficiales en sitios con pendientes, por lo que se considera que el uso de la vegetación para controlar la erosión superficial constituye una alternativa más económica y ecológica que los métodos tradicionales de ingeniería civil empleados por sí solos (Mickovski, Stokes, van Beek, Ghemest y Fourcaud, 2011). Las plantas, al ser entes vivos, tienen una capacidad de regeneración natural, que las estructuras creadas por los humanos no tienen, lo que les da una ventaja en cuestiones de mantenimiento y reparación. Las raíces de las plantas atenúan las cargas por exceso de agua al extraer la humedad del suelo y disminuyen la erosión, al aumentar la capacidad de infiltración y evitar los escorrentimientos. Adicionalmente, las raíces refuerzan el suelo porque su presencia lo convierte en un material compuesto por fibras que incrementan su resistencia al corte (Saifuddin y Osman, 2014), por lo que conocer las propiedades mecánicas de las raíces es importante para poder estimar los esfuerzos que estas pueden soportar cuando existen cargas ocasionadas por factores como deslizamientos de tierra o vientos huracanados que las tensen o doblen. Sin embargo, caracterizar las propiedades de las raíces requiere enfoques multidisciplinarios, debido a lo complejo de estos materiales. Las raíces se consideran como materiales anisótropos, ya que su morfología y composición cambia a lo largo de su extensión y sus propiedades varían según la dirección en que sean examinadas (Niklas, 1992). Al no haber métodos de prueba estándar, su medición proporcionará resultados diferentes, dependiendo de la metodología utilizada. Además, las raíces poseen fibras con altos contenidos de humedad y su epidermis suele ser resbaladiza, lo que las hace difíciles de sujetar y complica caracterizarlas mecánicamente. Por todo esto, aunque existen publicaciones y referencias sobre pruebas efectuadas para caracterizar raíces (Cofie, 2001; Tosi, 2007), la metodología de pruebas y las herramientas

usadas para sujetar las raíces, así como el montaje de las mismas, no se explican en detalle; esto dificulta su réplica adecuada. Aunque existen aditamentos para ensayar materiales como cables, que podrían ser similares a las raíces, se debe considerar que la sección transversal de una raíz varía a lo largo de su longitud; por esto, se debe documentar si esas variaciones permiten su sujeción adecuada y qué tipo de mordazas serán las más recomendables para realizar ensayos de tensión y flexión sobre las mismas. Debido a ello, y a que en Latinoamérica no se han publicado estudios locales que caractericen raíces de especies forestales tropicales, se considera de suma importancia documentar estas técnicas, así como determinar las capacidades de las raíces cuando se desarrollan en suelos arenosos. Otro aspecto importante sobre las raíces es su estructura interna, constituida por un centro blando y poroso, por donde circulan líquidos y gases (Segura, 2013). Esta constitución implica que algunos tejidos, como los circundantes a ciertos tubos capilares internos, deben soportar los esfuerzos sobre una fracción menor del área transversal total, por lo que las caracterizaciones realizadas podrían subvalorar las propiedades de estos tejidos. Ante esta situación también es importante conocer el porcentaje de tejidos densos contra la parte porosa de las fibras, con la finalidad de comprender mejor la estructura de estas raíces y su funcionamiento, lo que a su vez permitirá una mejor modelación y simulación de estas, en caso de así requerirlo.

OBJETIVOS

Los objetivos de esta investigación fueron: 1) documentar los procesos que se requieren para implementar una metodología para realizar pruebas mecánicas (tensión y flexión) en raíces de *Jatropha curcas* L. y *Ricinus communis* L.; 2) caracterizar sus propiedades mecánicas en relación con su respuesta a esfuerzos de tensión y flexión; y 3) analizar la composición interna de las raíces para determinar el tipo de fibras que las componen.



MATERIALES Y MÉTODOS

Área y material de estudio

Para las pruebas mecánicas en laboratorio se recolectaron muestras de raíces en cuatro zonas de la ciudad de Veracruz, México, con coordenadas: (19° 12' 53.0" N, 96° 11' 45.6" O), (19° 10' 27.2" N, 96° 09' 01.8" O), (19° 10' 10.7" N, 96° 09' 05.0" O) y (19° 10' 16.8" N, 96° 09' 26.6" O). En los tres primeros sitios se extrajeron dos plantas de *Ricinus communis* (*Ricinus*) por cada lugar, con alturas entre 1.0 m y 1.3 m. Las zonas donde se localizaron las plantas de *Ricinus* eran terrenos baldíos u orillas de carretera, donde estas crecen de forma silvestre. En el último sitio se extrajeron cinco plantas de *Jatropha curcas* (*Jatropha*), que fueron sembradas en un terreno citadino, con alturas similares a las de *Ricinus* y edad promedio de un año. Los suelos de todos estos sitios costeros se consideran de textura arenosa (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio], 2013).

Procedimiento de obtención de la raíz

Para extraer la raíz de cada planta, primero se cortó su tallo y posteriormente se excavó cuidadosamente la tierra de alrededor, tratando de no dañar las raíces. La raíz, tan completa como fue posible, se colocó dentro una bolsa plástica para mantenerla húmeda y evitar que perdiera sus propiedades originales. Al concluir las extracciones, los materiales se trasladaron inmediatamente al laboratorio de pruebas mecánicas del Instituto Tecnológico de Veracruz, donde las raíces se lavaron para eliminar el exceso de tierra, se seleccionaron los segmentos de raíz más uniformes y libres de rugosidades y se prepararon para su montaje.

Análisis de las fibras de las raíces

Para conocer la estructura de las raíces, se realizaron cortes transversales y longitudinales de segmentos con diámetros comprendidos dentro de los límites de las pruebas de tensión y flexión (0.70 mm – 8.6 mm), con un total de 10 segmentos por especie. Las fibras de las raíces se visualizaron con ayuda de un microscopio estereoscópico

marca Olympus modelo SZ-CTV con amplificación de 1.8x a 5x. Las medidas concéntricas de los diferentes tipos de fibras identificadas se tomaron con el paquete *Image processing Toolbox* de Matlab V 7.10.0. La denominación de cada tipo de tejido se realizó con apoyo de imágenes e identificaciones encontradas en literatura especializada sobre tejidos vegetales (Azcón-Bieto y Talón, 2013; Zhang *et al.*, 2016). Para estimar la proporción entre las fibras externas e internas, con los sujetos observados se realizaron los ajustes de las curvas correspondientes a cada especie mediante el paquete *Dynamic Fit Wizzard* de SigmaPlot V10.0. La ecuación utilizada fue de la forma ax^n y para cada curva se obtuvo su correspondiente coeficiente de determinación (r^2) mediante dicho programa.

Dado que se observó un alto contenido de humedad en las raíces, para conocer su valor se procedió a seleccionar 10 segmentos de cada especie con diámetros máximos comprendidos entre 1.0 mm y 8.6 mm y longitudes de 10 cm. Cada grupo de raíces se pesó en fresco mediante balanza analítica (0.001 g de resolución), para posteriormente colocarlos en estufa secadora a 70 °C hasta peso constante y, de esta manera estimar su porcentaje aproximado de humedad (CH) (ligeramente inferior al CH real).

Pruebas para estimar esfuerzos en raíces y su preparación

Para determinar las propiedades mecánicas relacionadas con los esfuerzos que soportan las raíces de las plantas se consideraron dos aspectos principales: 1) los esfuerzos por tensión, que se originan cuando existen cortes en la tierra causados por deslizamientos y las plantas sufren esfuerzos que tienden a romper sus raíces, y 2) los esfuerzos por flexión, que ocurren cuando las raíces se flexionan durante un deslizamiento de tierra, sin ser necesariamente extraídas. Las pruebas de tensión axial y flexión se realizaron en una máquina universal de pruebas mecánicas COM-TEM Serie 95. De la raíz principal se tomaron porciones de 10 cm de longitud, diámetros entre 0.5 mm y 7.0 mm para pruebas de tensión. Los diámetros fueron seleccionados con base en la

capacidad de sujeción de las mordazas (0.5 mm para sujetar sin romper raíz) y de las celdas de carga disponibles (hasta 7.0 mm para 133.5 N (30 lb) como carga máxima).

Procedimiento de pruebas de tensión

Para los ensayos de tensión se probaron cuatro tipos de sujetadores (Fig. 1), pero solamente mediante un diseño tipo polea (Fig. 1D) se logró romper las probetas en la región de prueba, ya que la polea permitió distribuir la presión a lo largo de una mayor superficie, evitando el corte y aplastamiento de los extremos, situación que no se dio con los otros sujetadores. Para evitar que la raíz resbalara al momento de ejecutar la carga axial, se colocó una cinta adhesiva de doble cara en las paredes de la mordaza. Una vez montada la raíz, se registró su diámetro, como el promedio de tres mediciones en el centro (con micrómetro de 0.01 mm de resolución) y la longitud inicial (con vernier de 0.01 mm de resolución). Se utilizaron celdas de carga de 89 N (20 lb) y 133.5 N (30 lb), dependiendo del grueso de la raíz, y se aplicó la carga con una tasa constante de 20 mm min⁻¹, hasta que el material alcanzó el punto de ruptura. La deformación se registró a partir del desplazamiento de los

cabezales de la máquina. Una vez realizado el ensayo se registró la carga máxima indicada por la máquina universal. Las pruebas donde los individuos se rompieron fuera de la zona de pruebas se descartaron.

Procesamiento de datos. Una vez obtenidos los registros de prueba, para estimar el módulo de elasticidad de cada elemento se programaron algoritmos en LabView 12.0 mediante los siguientes pasos: 1) leer y convertir datos de prueba al SI. 2) Debido a las características anisotrópicas y a las discontinuidades a lo largo de las raíces, se consideraron dos metodologías para estimar el módulo de elasticidad sobre la región esfuerzo-deformación: a) La región para el módulo inicial, que representa un esfuerzo donde las fibras discontinuas se tensarán (Cofie, 2001), se localizó en 2.5% del desplazamiento total y aplicando el módulo secante, como lo recomiendan López-Amo y Ponds (1981); y b) la región final, donde se supone que ya todas las discontinuidades se han tensado, que presumiblemente se ubica en 50% de la carga total, como se describe por Tosi (2007). 3) Para cada raíz se estimaron ambos módulos considerando el área de su sección transversal estimada antes de la prueba.



FIGURA 1. Dispositivos utilizados para sujetar raíces en pruebas de tensión. A) Mordazas con dientes. B) Pinzas para broca con lijas alrededor de la raíz. C) Ganchos con raíz enrollada y amarrado con ligas. D) Poleas con extremos de raíces sujetos por tornillos prensa.



Procedimiento de pruebas de flexión

Para las pruebas de flexión se diseñó un dispositivo sujetador donde se introdujo la raíz de forma transversal a dos vástagos localizados en la parte inferior del dispositivo, que funcionaron como apoyos, y entre un vástago en el dispositivo superior, donde se aplicó una fuerza positiva que dobló la raíz con velocidad constante de 20 mm min^{-1} (Fig. 2). Raíces con diámetros menores a 1.5 mm no registraron fuerzas en la máquina, por lo que se realizaron pruebas de flexión únicamente en raíces con diámetros superiores a 1.5 mm. El esfuerzo se calculó conforme la carga indicada por la máquina universal. Ninguna raíz alcanzó el punto de ruptura, por lo que el esfuerzo de ruptura no se pudo determinar.

Para cada prueba de flexión se estimaron: 1) el momento de inercia de la sección transversal de la raíz como $I = \frac{1}{4}\pi r^4$, donde r es el radio de la raíz; 2) el momento de flexión equivalente al de una viga simplemente apoyada con una carga concentrada al centro del claro, $M = PL/4$, donde P es la carga aplicada en newtons, L es el claro de carga en milímetros (95.5 mm); y 3) el esfuerzo de flexión $\sigma = Mc/I$ en megapascales, donde c es la distancia desde el centro hasta el diámetro externo de la raíz en milímetros.

RESULTADOS

Análisis de las fibras de las raíces

En los segmentos de las raíces de ambas especies se localizaron tres áreas distintivas que se identificaron como la epidermis, el córtex y el cilindro vascular o medular (Fig. 3). La epidermis y el córtex se caracterizaron por estar constituidos por el tejido más denso, mientras que el cilindro medular se caracterizó por ser un tejido esponjoso formado por numerosos vasos conductores. En ambas especies, las raíces más delgadas (0.7 mm a 2.0 mm) mostraron un mayor porcentaje de epidermis y córtex (hasta 68%), mientras que en las raíces más gruesas (6.0 mm a 8.0 mm) se apreció un porcentaje ligeramente superior en el área medular (con porcentajes de epidermis y córtex reducidos hasta 46%, Fig. 3a). La relación entre el tejido vascular y el radio total de la raíz se logró representar mediante una función potencial de la forma siguiente: radio interno = $0.62 \times (\text{diámetro externo})^{1.05}$ para *Ricinus* y $0.60 \times (\text{diámetro externo})^{1.09}$ para *Jatropha*, ambos con un ajuste de $r^2 = 0.90$. El porcentaje de humedad estimado para las raíces de cada especie fue de 77% para *Jatropha* y de 79% para *Ricinus*.



FIGURA 2. Montaje de la raíz en el dispositivo para prueba de flexión.

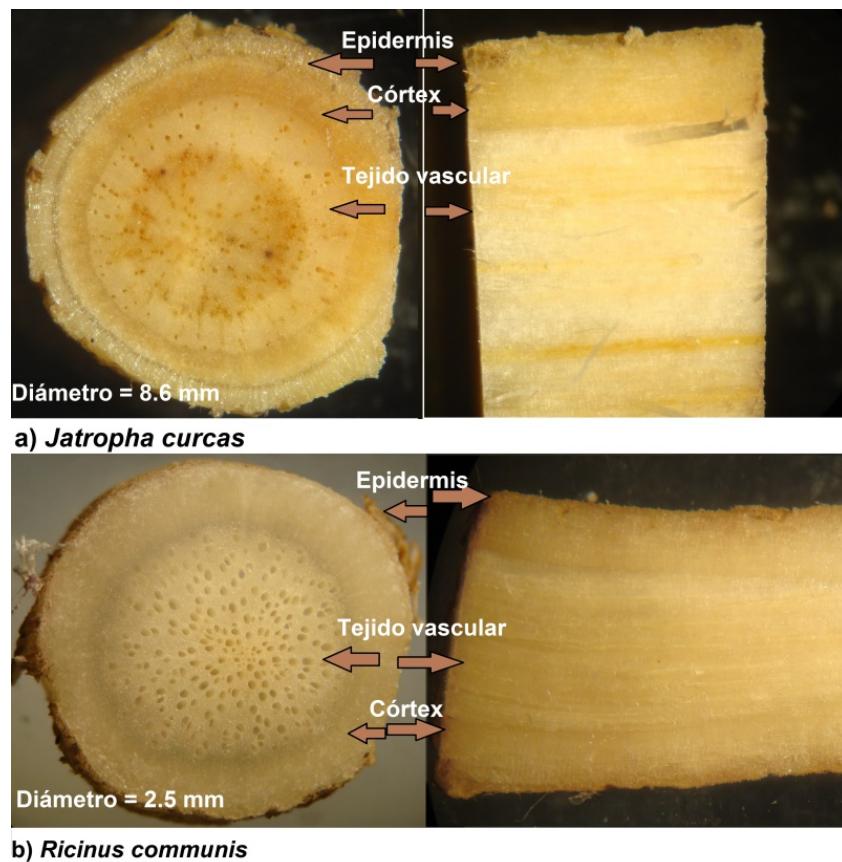


FIGURA 3. Cortes transversales y longitudinales de segmentos de raíces de a) *Jatropha curcas* y b) *Ricinus communis*.

Esfuerzos de ruptura en tensión

Se obtuvieron pruebas exitosas en 38 raíces de *Ricinus*, con diámetro promedio de 2.4 mm y 33 de *Jatropha*, con diámetro promedio de 2.3 mm. Los esfuerzos promedio, sus desviaciones estándar (DE), así como los valores máximos obtenidos se presentan en la tabla 1, mientras que en la figura 4 se presentan dos gráficas esfuerzo-deformación unitaria de dos segmentos de raíces de *Jatropha* y *Ricinus*.

Módulo de Young

Las raíces de *Ricinus* obtuvieron un módulo de Young en tensión mínimo de 6.27 MPa, mientras que el mínimo de *Jatropha* fue de 4.56 MPa. Los promedios y máximos se presentan en la tabla 2, donde se observa que los módulos promedio obtenidos en 2.5% de la deformación total son ligeramente superiores a los módulos obtenidos en 50% de la carga total. Las curvas de ajuste de los esfuerzos y sus

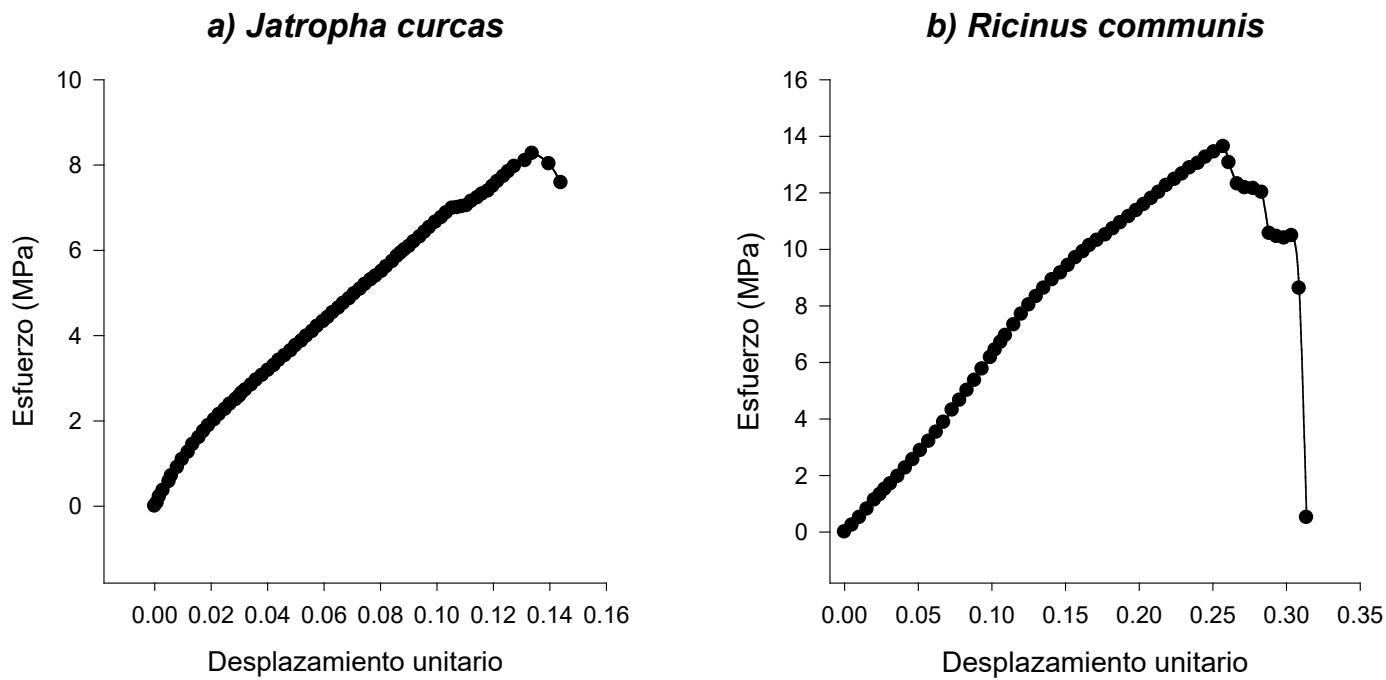
módulos, junto con las ecuaciones que las definen, se muestran en la figura 5. Los valores promedio de esfuerzos de ruptura en tensión son más altos para *Jatropha* que para *Ricinus*, lo que es consistente con los valores de módulo de Young, que siguen el mismo patrón.

Esfuerzos de flexión

Se obtuvieron pruebas de flexión exitosas en 30 raíces de *Ricinus*, con diámetro promedio de 3.2 mm y 15 de *Jatropha*, con diámetro promedio de 3.6 mm. Ninguna raíz alcanzó el punto de ruptura durante la flexión, por lo que solo se registraron las cargas requeridas para doblarlas completamente (Fig. 6). Los momentos de inercia máximos y los esfuerzos se presentan en la tabla 3. El patrón detectado para las propiedades mecánicas en tensión se presenta también para flexión: mayores valores de *Jatropha* y menores en *Ricinus*.

TABLA 1. Cargas y esfuerzos de ruptura en tensión máxima y promedio obtenidos en raíces de *Ricinus communis* y *Jatropha curcas*.

Especie	Carga (N)		Esfuerzo (MPa)	
	Máxima	Promedio ± DE	Máximo	Promedio ± DE
<i>Jatropha curcas</i>	130.78	31.55 ± 31.55	21.15	8.92 ± 5.72
<i>Ricinus communis</i>	144.00	32.21 ± 31.69	22.12	5.92 ± 4.37

FIGURA 4. Gráficas esfuerzo-deformación unitaria típicas de a) *Jatropha curcas* y b) *Ricinus communis* bajo tensión.TABLA 2. Módulo de elasticidad máximo y promedio ± DE obtenido con raíces de *Jatropha curcas* y *Ricinus communis* en 2.5% y 50% de su máximo desplazamiento.

Especie	Módulo en 2.5% (MPa)		Módulo en 50% (MPa)	
	Promedio ± DE	Máximo	Promedio ± DE	Máximo
<i>Jatropha</i>	70.10 ± 60.75	270.90	62.53 ± 40.22	138.30
<i>Ricinus</i>	59.64 ± 48.90	278.80	52.02 ± 54.50	334.10

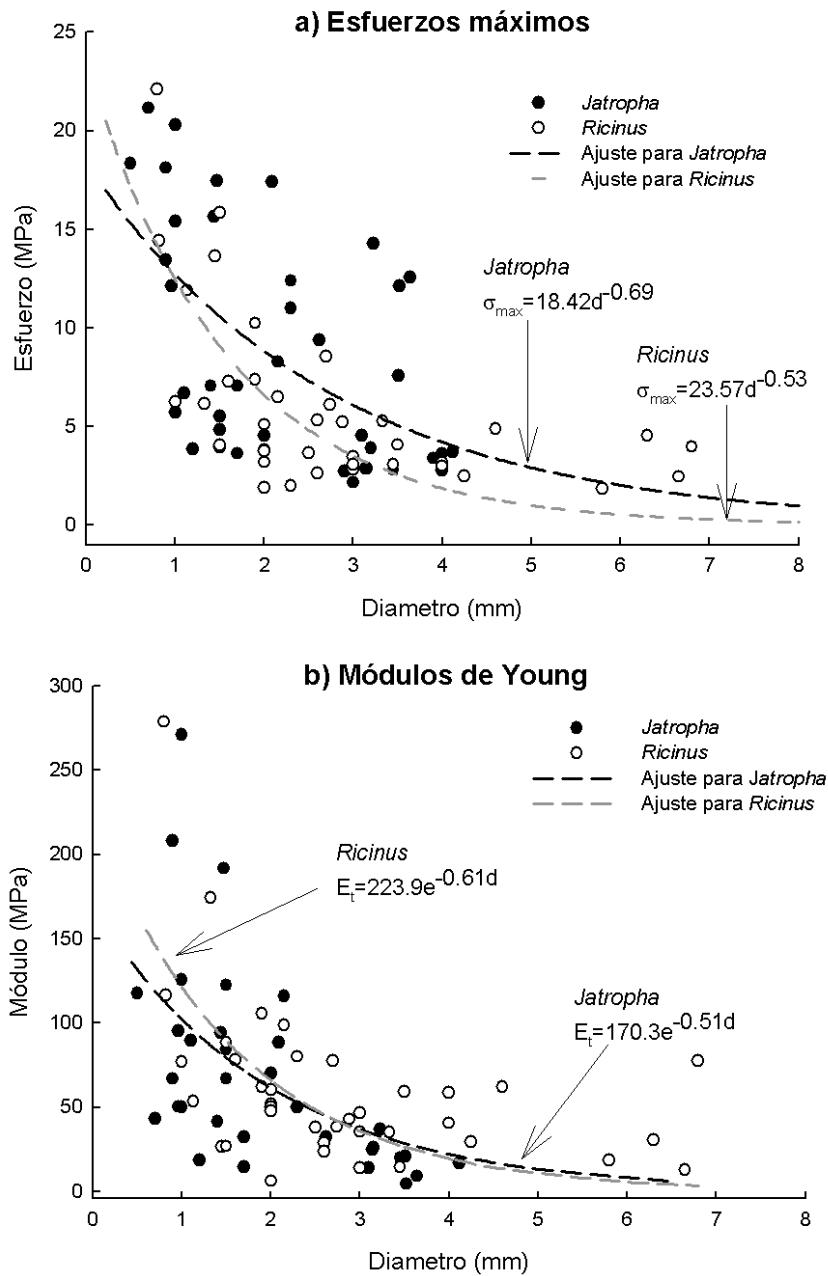


FIGURA 5. Esfuerzos de tensión máximos (σ_{\max}) y módulos de Young (E_t) registrados en raíces de *Jatropha curcas* y *Ricinus communis* y sus curvas de ajuste. La letra **d** de las ecuaciones representa al diámetro de la raíz.

TABLA 3. Momentos de inercia y esfuerzos de flexión obtenidos para raíces de *Ricinus communis* y *Jatropha curcas*.

Especie	Carga aplicada (N)		Momento de Inercia (mm ⁴)		Esfuerzo de flexión (MPa)	
	Promedio ± DE	Máxima	Promedio ± DE	Máximo	Promedio ± DE	Máximo
<i>Jatropha curcas</i>	5.02 ± 6.46	25.22	13.48 ± 16.81	64.47	15.79 ± 5.71	28.11
<i>Ricinus communis</i>	3.24 ± 4.41	19.01	11.29 ± 15.40	64.90	11.27 ± 5.32	21.09

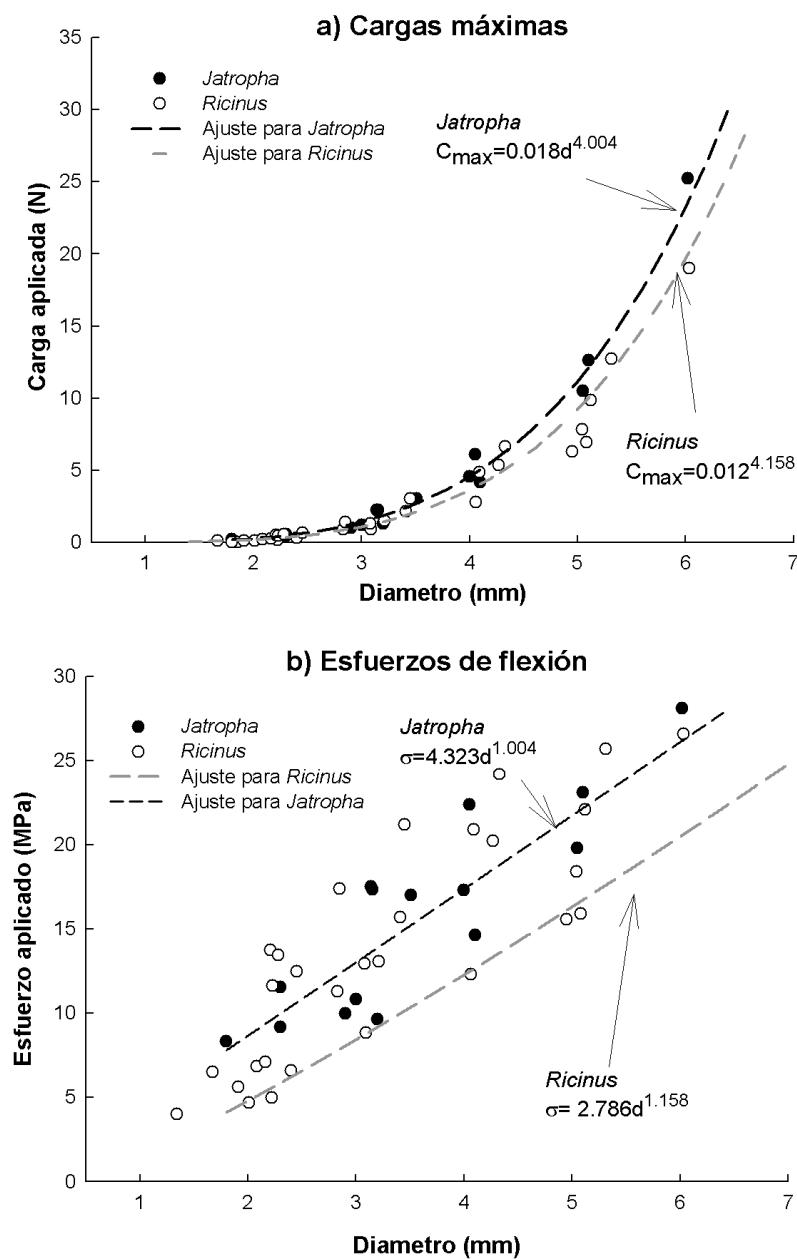


FIGURA 6. Cargas máximas y esfuerzos de flexión obtenidos en raíces de *Jatropha curcas* y *Ricinus communis* y sus curvas ajustadas.

DISCUSIÓN

Las fibras de las raíces

Las fibras analizadas permitieron comprobar que las raíces de ambas especies son materiales compuestos por diferentes tipos de tejidos (Zhang *et al.*, 2016), cuya disposición no permite un análisis mecánico simple, comúnmente aplicado a materiales sólidos, por lo que su

comportamiento se debe evaluar como el correspondiente al de una estructura cuya parte más externa (epidermis y córtex) está integrada por las fibras más densas, lo que le permite soportar mayores esfuerzos (Niklas, 1992). Estudios químicos sobre estas fibras indican que también poseen mayores contenidos de celulosa, lo que las hace más rígidas (Dávalos-Sotelo, 2005), por lo que esta región, además de protegerla del medio exterior, también tiene la

función de servir como soporte (Chao-Bo, Li-Hua y Jing, 2014). Por otra parte, el corte longitudinal de las raíces permitió apreciar que están compuestas por largas fibras cuya estructura pseudocristalina confiere a las raíces una alta resistencia mecánica en dirección de la fibra, pero una resistencia mínima en dirección perpendicular (Azcón-Bieto y Talón, 2013). Algunos autores, como Dávalos-Sotelo (2005), consideran que estudios de esta naturaleza se podrían abordar con el método de la homogeneización, empleado para materiales fibrosos formados por capas de distintos materiales o con conformación variable; sin embargo, esta aproximación aún no se ha explorado.

Dispositivos para pruebas

Es importante mencionar que en este estudio se intentaron pruebas con diferentes dispositivos sujetadores, tales como los que se han documentado en otras investigaciones (Giadrossich *et al.*, 2017); sin embargo, solo un dispositivo permitió una sujeción adecuada para las pruebas de tensión. Esto debido al alto contenido de humedad de las fibras (superior a 70%), lo que ocasionó que los sujetadores de un solo punto redujeran los diámetros de las raíces al oprimirlas y las fibras se deslizaran al ser tensionadas. Por lo que únicamente un dispositivo tipo polea, como el que se utilizó en estas pruebas, permitió distribuir el esfuerzo de tensión en un área de superficie mayor y evitar la reducción de los diámetros. Se considera que el uso de sujetadores de un solo punto podría funcionar con raíces más leñosas o con menor contenido de humedad, o bien utilizando sustancias reforzadoras en los extremos, como en Tosi (2007). Por lo que respecta a las pruebas de flexión, no se encontraron problemas específicos con el uso del dispositivo diseñado, pero tampoco se encontraron investigaciones sobre estas pruebas en raíces con algún diseño especial, dado que no se localizaron publicaciones sobre pruebas de flexión para raíces.

Esfuerzos de ruptura en tensión

Los resultados indicaron que el esfuerzo de tensión al momento de la ruptura de las raíces en ambas especies

decreció significativamente con el incremento del diámetro (Fig. 5). Este comportamiento es congruente con otras raíces de especies arbóreas (Chao-Bo *et al.*, 2014), donde se ha observado que el incremento en diámetro está asociado con un decremento en la relación lignina/celulosa, la cual disminuye la elasticidad de las fibras. Este comportamiento también puede explicarse por el fenómeno detectado por Weibull, aplicable a materiales fibrosos como la madera y otros semejantes, conocido como la “teoría del eslabón más débil” que indica que a mayor volumen bajo esfuerzo, menor es la resistencia del material (Dávalos Sotelo, 1996). En relación con el contenido de humedad, fue de notarse que las raíces obtenidas en este experimento tuvieron contenidos de humedad muy altos, cercanos a los de la única herbácea con contenido de humedad publicado (Sanchez-Castillo *et al.*, 2017), lo que puede deberse a que las plantas eran ejemplares juveniles y a que las raíces de estas especies normalmente poseen altos contenidos de humedad (Valdés-Rodríguez y Pérez-Vázquez, 2019).

Módulo de Young en tensión

Los resultados obtenidos con estas raíces incluyeron el cálculo del módulo de Young en 2.5% del desplazamiento total, donde se presenta la pendiente inicial o elástica, y en 50% de la carga máxima. Estos valores indican que en 50% de la carga máxima las fibras ya se encuentran fuera de su región elástica, así que las recomendaciones de López-Amo y Ponds (López-Amo y Pons, 1981) para fibras textiles, quienes sugieren estimar el módulo de Young en 2.5% de la carga total, se consideran más convenientes para este tipo de raíces.

En relación con los diámetros de las raíces, los esfuerzos obtenidos en *Jatropha* y *Ricinus* fueron similares a los publicados sobre otras raíces de especies herbáceas y arbóreas americanas, pero inferiores a los encontrados en raíces de plantas arbustivas europeas (Tabla 4). A este respecto, Zhang *et al.* (2016) mencionan que las fibras con mayor resistencia son sólidas (como *Z. mays*), mientras que las de menor resistencia son tubulares (como *C. sativus*); por lo que se deduce que los bajos valores registrados en este



TABLA 4. Esfuerzo de tensión promedio de ruptura y módulo de Young registrados en otras pruebas con raíces de diferentes especies de plantas.

Especie	Porte	Diámetro (mm)	Contenido de humedad en raíces (%)	Esfuerzo de tensión (MPa)	Módulo de Young (MPa)
<i>Spartium junceum</i> ¹	Arbustivo	0.65-9.35	13.00	29.93	776.97
<i>Rosa canina</i> ¹	Arbustivo	0.43-9.90	3.20	29.95	542.70
<i>Inula viscosa</i> ¹	Arbustivo	0.40-13.00	16.20	18.91	512.05
<i>Solanum lycopersicum</i> ²	Herbáceo	1.5-2.72	75.00	23.43	1147.59
<i>Zea mays</i> ²	Herbáceo	--	--	79.09	1840.00
<i>Cucumis sativus</i> ²	Herbáceo	--	--	7.35	280.58
<i>Q. rysophylla</i> ³	Arbóreo	1.0-9.0	21.50	8.31	161.80
<i>P. pseudostrobus</i> ³	Arbóreo	1.0-9.0	32.80	7.52	71.30
<i>A. berlandieri</i> ³	Arbustivo	1.0-9.0	55.10	11.86	184.07
<i>J. curcas</i>	Arbustivo	0.5-5.0	76.79	8.92	70.10
<i>R. communis</i>	Arbustivo	0.8-6.8	79.12	5.92	59.54

Fuentes: ¹Tosi (2007); ²Zhang *et al.*, (2016); ³Sanchez-Castillo *et al.* (2017); -- dato no proporcionado.

estudio se deban a los centros porosos relativamente grandes de estas raíces de *Jatropha* y *Ricinus*. Por ejemplo, si se considera que los esfuerzos se soportaron mayormente en epidermis y córtex (área de mayor densidad), por ser estas las fibras de soporte, al despreciar el área del tejido vascular de la raíz se logran obtener esfuerzos 1.48 veces superiores en *Ricinus* y 1.63 veces superiores en *Jatropha*. En relación con otras fibras sintéticas, las características de estas raíces las colocan dentro de las escalas del polietileno de baja densidad, que probado con el método secante a 2%, obtiene módulos entre 149 MPa a 181 MPa, y cuyas características lo definen como un material con alta resistencia mecánica y alta flexibilidad, con el que se elaboran bolsas y mangueras de baja presión (Petróleos Mexicanos [PEMEX], 2015). Es posible que la alta resistencia en tensión y la gran flexibilidad de las raíces se deba a los procesos fisiológicos que en ellas operan: para llegar a los nutrientes y al agua en el suelo deben librar muchos obstáculos y meterse por intersticios complejos,

por lo que requieren al mismo tiempo alta resistencia mecánica y mucha flexibilidad (bajo módulo de elasticidad).

Esfuerzos de flexión

Es importante remarcar que en las pruebas de flexión, al no alcanzarse la ruptura por el alto grado de flexibilidad de estos materiales, las fórmulas para cálculo de resistencia a la flexión no se pueden aplicar, ya que aplican para deformaciones pequeñas, que las raíces no presentaron. Tampoco se encontraron resultados sobre esfuerzos de flexión con otras raíces, lo cual probablemente se debe a que se considera que las raíces son tan flexibles que las fuerzas requeridas para doblarlas normalmente se suponen nulas en las investigaciones publicadas sobre sus propiedades mecánicas y su contribución al reforzamiento de los suelos (Bourrier, Kneib, Chareyre y Fourcaud, 2013), por lo que normalmente estas pruebas se realizan en estructuras más rígidas, como la madera (Dávalos Sotelo, 1996). En este sentido se considera que esta investigación fue pionera al mostrar estos resultados. Los valores

obtenidos indicaron que, aunque las raíces son muy flexibles, las cargas requeridas para flexionar las fibras siguieron una función potencial conforme se incrementaron los diámetros de las raíces (Fig. 6). Lo anterior indica que, entre más gruesas, mayor oposición a ser flexionadas, con una aparente mayor flexibilidad en las fibras de *Ricinus*, aunque para determinar esta diferencia se tendrían que efectuar pruebas con diámetros de raíces mayores. En relación con otras fibras naturales, se encontraron datos sobre flexión en bambú, donde se mostró que se requieren esfuerzos mayores para alcanzar la ruptura de los tallos en plantas más jóvenes que en plantas maduras (97 MPa contra 44 MPa, respectivamente) (Sánchez-Echeverri, Aita, Robert y Rodriguez Garcia, 2014), y se encontraron relaciones positivas directas entre el contenido de fibra soluble, lignina y celulosa, y la flexibilidad de las fibras de las plantas más jóvenes. A este respecto, se sabe que la lignina y la celulosa juntas proporcionan mayor resistencia y rigidez a las paredes de las células (Azcón-Bieto y Talón, 2013; Dávalos-Sotelo, 2005), lo que implica que se requieran mayores esfuerzos para flexionarse. Ahora, si se considera que las raíces de *Ricinus* y *Jatropha* provenían de plantas jóvenes, ya que ambas tenían aproximadamente un año de edad, y además sus diámetros eran considerablemente pequeños, en relación con las probetas de bambú o maderas que se han probado, es posible que las relaciones de contenidos de lignina/alfa celulosa, lignina/celulosa y fibra soluble hayan sido muy altos, lo que les confirió una gran flexibilidad (Chao-Bo *et al.*, 2014); de ahí que no se obtuvieron esfuerzos grandes para su flexión y que las fibras nunca alcanzaran el punto de ruptura.

CONCLUSIONES

Las raíces de *Jatropha* y *Ricinus* poseen un alto contenido de humedad, de tal forma que los dispositivos para probarlas en tensión deben permitir una mayor superficie para distribuir la tirantez en el prensado, por lo que las mordazas con poleas se consideran las más adecuadas para sujetarlas.

Los módulos de elasticidad de las raíces de *Jatropha* y *Ricinus* incrementan conforme disminuyen sus diámetros de

manera potencial, lo cual indica que una densidad alta de raíces delgadas brindará un mayor reforzamiento del suelo, que una menor densidad de raíces, aunque sus diámetros fuesen más gruesos. Adicionalmente, se encontró que los valores promedio de todas las propiedades mecánicas evaluadas muestran que los de *Jatropha* son consistentemente más altos que los de *Ricinus*.

Las raíces de ambas especies tienen una flexibilidad muy alta, por lo que las pruebas de deflexión no alcanzaron la ruptura, aunque si se registraron esfuerzos de flexión directamente proporcionales a los diámetros de las raíces.

RECONOCIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el apoyo otorgado durante la estancia postdoctoral de la primera autora.

REFERENCIAS

- Azcón-Bieto, J. & Talón, M. (2013). *Fundamentos de Fisiología vegetal. Universitat de Barcelona* (2a ed., Vol. 1). Barcelona, España: McGraw-Hill -Interamericana de España.
- Bourrier, F., Kneib, F., Chareyre, B., & Fourcaud, T. (2013). Discrete modeling of granular soils reinforcement by plant roots. *Ecological Engineering*, 61(1 PARTC), 646–657. doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.05.002
- Chao-Bo, Z., Li-Hua, C., & Jing, J. (2014). Why fine tree roots are stronger than thicker roots: The role of cellulose and lignin in relation to slope stability. *Geomorphology*, 206, 196–202. doi: 10.1016/j.geomorph.2013.09.024
- Cofie, P. (2001). *Mechanical properties of tree roots for soil reinforcement models*. Holand: Wageningen University.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio] (2013). *Estrategia para la conservación y uso sustentable de la biodiversidad*. En Cruz Angón, A., M. E. González Díaz, & S. J. Solís Jerónimo (Eds.) (1a ed.). Xalapa, México: CONABIO.
- Dávalos-Sotelo, R. (2005). Determination of elastic properties of clear wood by the homogenization method in two dimensions. *Wood Science and Technology*, 39(5), 385–417. doi: 10.1007/s00226-005-0288-2
- Dávalos Sotelo, R. (1996). Comportamiento de la madera como material estructural: estado del conocimiento. *Ciencia*, 47, 76–91.
- Giadrossich, F., Schwarz, M., Cohen, D., Cislaghi, A., Vergani, C., Hubble, T., ..., & Stokes, A. (2017). Methods to measure the



- mechanical behaviour of tree roots: A review. *Ecological Engineering*, (January), 1–16. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.08.032
- López-Amo, F., & Pons, J. M. (1981). Método de ensayo para la determinación del módulo inicial de elasticidad de las fibras individuales. *Boletín Intexter del Instituto de Investigación Textil y de Cooperación Industrial*, 80, 15–23. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/6177/1/Article04.pdf>
- Mickovski, S. B. S. B., Stokes, A., van Beek, R., Ghemest, M., & Fourcaud, T. (2011). Simulation of direct shear tests on rooted and non-rooted soil using finite element analysis. *Ecological Engineering*, 37(10), 1523–1532. doi: 10.1016/j.ecoleng.2011.06.001
- Niklas, K. J. (1992). *Plant Biomechanics: An engineering approach to plant form and function*. Brittonia (1a ed., Vol. 46). Chicago: The University of Chicago Press. doi: 10.2307/2807461
- Petróleos Mexicanos [PEMEX] (2015). Polietileno baja densidad. Recuperado el 10 de mayo de 2019, de <https://www.pemex.com/comercializacion/productos/Especificaciones/petroquimicos/POLIETILENO%20PX-20020X.pdf>
- Saifuddin, M., & Osman, N. (2014). Evaluation of hydro-mechanical properties and root architecture of plants for soil reinforcement. *Current Science*, 107(5), 845–852.
- Sanchez-Castillo, L., Kubota, T., Cantu-Silva, I., Yañez-Díaz, M., Hasnawir, & Pequeño-Ledezma, M. (2017). Comparisons of the root mechanical properties of three native Mexican tree species for soil bioengineering practices. *Botanical Sciences*, 95(2), 259–269. doi: 10.17129/botsci.802
- Sánchez-Echeverri, L. A., Aita, G., Robert, D., & Rodriguez García, M. E. (2014). Correlation between chemical compounds and mechanical response in culms of two different ages of *Guadua angustifolia* Kunth. *Madera y Bosques*, 20(2), 87–94. doi: 10.21829/myb.2014.202166
- Segura, J. (2013). Introducción al desarrollo. Concepto de hormona vegetal. En Azcón-Bieto, J. & M. Talón (Eds.), *Fundamentos de fisiología vegetal* (2a ed., Vol. 1, pp. 357–376). Barcelona, España: McGraw-Hill -Interamericana de España.
- Tosi, M. (2007). Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy). *Geomorphology*, 87(4), 268–283. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.09.019
- Valdés-Rodríguez, O. A., & Pérez-Vázquez, A. (2019). Seedling characteristics of three oily species before and after root pruning and transplant. *Plants*, 8(8), 258. doi: 10.3390/plants8080258
- Zhang, X., Guo, Q., Xu, Y., Li, P., Chen, C., & Wu, S. (2016). Mechanical testing of tomato plant stem in relation to structural composition. *Agricultural Research*, 5(3), 236–245. doi: 10.1007/s40003-016-0209-7.

Manuscrito recibido el 18 de febrero de 2018

Aceptado el 27 de agosto de 2019

Publicado el 17 de junio de 2020

Este documento se debe citar como:

Valdés-Rodríguez, O. A., Jiménez A., A. E., Servín M., A., & José Tejero A., J. (2020) Ensayos de tensión y flexión en raíces de dos especies tropicales. *Madera y Bosques*, 26(2), e2621716. doi: 10.21829/myb.2020.2621716



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.