

UNIVERSIDAD VERACRUZANA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES TROPICALES



**Estudio de *Jatropha curcas* L. no tóxica: semillas, plántulas y  
primeros estadios del sistema de raíces**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTORA EN ECOLOGÍA TROPICAL

PRESENTA

**Ofelia Andrea Valdés Rodríguez**

Comité tutorial

Tutor: Dr. Odilón Sánchez Sánchez  
Cotutores: Dra. Paz Alejandra Quintanar Isaías  
Dr. Arturo Pérez Vázquez

XALAPA-ENRÍQUEZ, VERACRUZ, MÉXICO

JUNIO DEL 2012

## Agradecimientos

Al CONACyT por la beca no. 5556 otorgada mediante su Programa Nacional de Postgrados de Calidad, de Agosto del 2008 a Marzo del 2012, para realizar mis estudios doctorales, mi estancia en INRA, Francia y por la modificación de beca para concluir esta investigación.

Al Centro de Investigaciones Tropicales y los profesores investigadores, por la formación impartida durante mi estancia en el mismo.

A la LPI3: Energía Alternativa y Biomateriales y a la LPI2: Agroecosistemas Sustentables del Colegio de Postgraduados, por apoyos económicos, equipos, e instalaciones para los experimentos.

Al Dr. Odilón Sánchez Sánchez, por su confianza en mí, por valorar y apoyar mis ideas, su asesoría y tiempo dedicado a la conclusión de las investigaciones aquí reportadas.

A la Dra. Alejandra Quintanar por aceptar ser mi asesora y por su apoyo a pesar de la distancia.

Al Dr. Arturo Pérez Vázquez, con quien siempre he contado, dentro y fuera del Colegio de Postgraduados.

Al Dr. Pedro Guillermo Ángeles Álvarez de Inecol, por darme su valioso tiempo, por su confianza y por las facilidades del Instituto para realizar investigaciones de vital importancia para esta tesis.

Al Dr. Romeo Ruíz Bello de la Facultad de Agronomía de la UV, por darme su tiempo extra clase y por toda la información que de su iniciativa propia ha contribuido a enriquecer este trabajo.

Al Dr. Frederic Dánjón por aceptarme para realizar mi estancia en INRA, por su hospitalidad y su tiempo dedicado.

Al Dr. Fernando Ortega de Inecol, por apoyarme con mis experimentos, por brindarme su tiempo, durante mi estancia en el Instituto, y por seguir apoyando, aun cuando ya no estaba ahí.

A la Maestra Teresita Mayer del Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía, por facilitarme realizar experimentos y por la asesoría prestada durante mi estancia en su facultad.

Al Dr. Joseph Dubrovsky de la UNAM que me asesoró con sus conocimientos sobre raíces.

A mi familia y amigos, que contribuyeron a la ciencia al apoyarme con los experimentos.

*La vida es un reto a la permanencia  
Donde materia y energía buscan la comunión  
En lucha constante por mantener a la forma y al espíritu  
Durante su evolución interminable  
Sin importar quien gane o pierda  
La vida siempre triunfará  
OAVR*

### **Reconocimientos especiales**

Este trabajo es el resultado del apoyo de todos los mexicanos que al pagar sus impuestos contribuyen con proyectos científicos subsidiados por el CONACyT.

También es el resultado de todos aquellos profesores e investigadores nacionales e internacionales que publicaron sus estudios en los artículos científicos y tesis aquí citadas; especialmente aquellos que a pesar de la distancia, y en algunos casos sin conocer a la autora, enviaron material no disponible, contestaron preguntas adicionales y hasta revisaron y corrigieron anotaciones.

El apoyo de todo el personal y profesores de laboratorios y áreas relacionadas de la Facultad de Agronomía de la Universidad Veracruzana, el Instituto Nacional de Ecología, el Colegio de Postgraduados, la Universidad Autónoma de México y la Unité Mixte de Recherche Biodiversité Gènes et Communautés, donde realicé prácticas y estancias; que brindaron su tiempo, material e instalaciones, de manera desinteresada y solidaria.

Y de los productores que con dedicación y esfuerzo por siglos han propagado y mantenido a *Jatropha curcas*, han permitido las colectas de sus semillas, regalado material vegetal y compartido sus experiencias y conocimientos a todos los que hemos estudiado esta especie.

# Índice general

	Página
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>viii</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>xi</b>
<b>I. Introducción general</b> .....	<b>1</b>
<b>II. Antecedentes y propuestas de la investigación</b> .....	<b>2</b>
2.1. Las necesidades alimentarias y los biocombustibles.....	2
2.2. El problema de investigación .....	3
2.3. Objetivos .....	4
2.4. Justificación.....	5
<b>III. <i>Jatropha curcas</i> • Características de la especie y sus formas</b> .....	<b>6</b>
3.1. Introducción .....	6
3.2. Taxonomía, descripción y orígenes.....	6
3.3. Requerimientos agroecológicos de <i>Jatropha curcas</i> .....	8
3.4. Formas o ecotipos diferenciados .....	8
3.5. Características del aceite de las semillas .....	9
3.6. Usos actuales de <i>Jatropha curcas</i> y sus productos .....	10
3.7. Conclusiones .....	10
<b>IV. Alometría de semillas de <i>Jatropha curcas</i>*</b> .....	<b>11</b>
4.1. Introducción .....	11
4.2. Materiales y métodos.....	11
4.3. Resultados y discusión .....	13
4.4. Conclusiones .....	20
<b>V. Germinación y sobrevivencia de <i>Jatropha curcas</i>: su relación con el peso de la semilla y los sustratos</b> .....	<b>21</b>
5.1. Introducción .....	21
5.2. Materiales y métodos.....	22
5.3. Resultados y discusión .....	25
5.3. Conclusiones .....	29
<b>VI. <i>Jatropha curcas</i> y su relación con el peso de la semilla y el tipo de sustrato</b> .....	<b>30</b>
6.1. Introducción .....	30
6.2. Materiales y métodos.....	31
6.3. Resultados y discusión .....	33
6.4. Conclusiones .....	40

<b>VII. Crecimiento de plántulas de <i>Jatropha curcas</i> en tres tipos de suelo*</b> .....	<b>41</b>
7.1. Introducción .....	41
7.2. Materiales y métodos .....	42
7.3. Resultados y discusión .....	44
7.4. Conclusiones .....	50
<b>VIII. Desarrollo del sistema de raíces de <i>Jatropha curcas</i> en diferentes sustratos</b> .....	<b>51</b>
8.1. Introducción .....	51
8.2. Materiales y métodos .....	52
8.3. Resultados y discusión .....	59
8.4. Conclusiones .....	70
<b>IX. Estructura y arquitectura de las raíces de <i>Jatropha curcas</i>*</b> .....	<b>71</b>
9.1. Introducción .....	71
9.2. Materiales y métodos .....	75
9.3. Resultados y discusión .....	79
9.4. Conclusiones .....	83
<b>X. Aislamiento y patogenicidad de un posible <i>Pythium aphanidermatum</i> en <i>Jatropha curcas</i> L. no tóxica*</b> .....	<b>84</b>
10.1. Introducción .....	84
10.2. Materiales y métodos .....	85
10.3. Resultados y discusión .....	89
10.4. Conclusiones .....	96
<b>XI. Discusión y conclusiones</b> .....	<b>97</b>
11.1. Discusión.....	97
11.2. Recomendaciones.....	99
11.3. Conclusiones .....	102
<b>Apéndice A</b> .....	<b>103</b>
Suelos .....	103
<b>Apéndice B</b> .....	<b>106</b>
Estimación de Parámetros .....	106
<b>Apéndice C</b> .....	<b>109</b>
Sitios experimentales .....	109
<b>Bibliografía</b> .....	<b>110</b>

# Índice de Cuadros

	Página
<b>Cuadro 2.1.</b> Requerimientos agroecológicos de <i>Jatropha curcas</i> L. según Zamarripa y Díaz, 2008	4
<b>Cuadro 3.1.</b> Análisis de contenido de ácidos grasos en las formas tóxica y no tóxica de <i>Jatropha curcas</i> .	9
<b>Cuadro 3.2.</b> Contenidos promedio ( $\pm$ ) de aceite y proteína en semillas tóxicas y no tóxicas.	9
<b>Cuadro 4.1.</b> Origen y variedad de semillas de <i>Jatropha curcas</i> de diferentes procedencias.	13
<b>Cuadro 4.2.</b> Estadísticas básicas de las procedencias recolectadas.	16
<b>Cuadro 4.3.</b> Análisis de correlación de pesos <i>versus</i> tallas para la Hipótesis nula $H_0: \rho=0$ .	17
<b>Cuadro 4.4.</b> Estadísticas de pesos de semillas y endospermos de tres procedencias.	18
<b>Cuadro 4.5.</b> Tipos de suelo y manejos de las procedencias analizadas en relación con los pesos y tallas de las semillas de <i>Jatropha curcas</i> obtenidas.	19
<b>Cuadro 4.6.</b> Promedios ( $\pm$ ) de pesos y tallas de semillas de <i>Jatropha curcas</i> reportadas para recolectas en otros sitios del país.	20
<b>Cuadro 5.1.</b> Porcentajes de germinación relacionados con los sustratos.	22
<b>Cuadro 5.2.</b> Experimentos realizados para estudiar efectos de sustratos y pesos de semillas sobre germinación.	25
<b>Cuadro 5.3.</b> Porcentajes de germinación en tres diferentes sustratos en Otoño-2009 y Verano-2010.	26
<b>Cuadro 5.4.</b> Porcentajes finales de germinación por categoría de pesos para Mayo 2010.	27
<b>Cuadro 5.5.</b> Porcentajes finales de germinación por categorías de pesos y sustratos.	28
<b>Cuadro 6.1.</b> Condiciones experimentales para crecimiento de plántulas por categorías de pesos de semillas.	31
<b>Cuadro 6.2.</b> Condiciones experimentales para desarrollo por sustrato y pesos de semillas.	32
<b>Cuadro 6.3.</b> Medidas y tasas de crecimiento promedio ( $\pm$ ) de tallos por categoría de peso de semilla.	34
<b>Cuadro 6.4.</b> Parámetros promedio ( $\pm$ ) medidos a la extracción por categoría de pesos de semillas.	35
<b>Cuadro 6.5.</b> Medidas promedio ( $\pm$ ) a los 35 días para plántulas por categoría de peso de semilla y por sustrato.	38
<b>Cuadro 6.6.</b> Medidas promedio ( $\pm$ ) del sistema de raíces por categoría de peso de semilla y por sustrato.	38
<b>Cuadro 6.7.</b> Pesos secos promedio ( $\pm$ ) por categoría de peso de semilla y por sustrato.	39
<b>Cuadro 7.1.</b> Experimentos de crecimiento de <i>Jatropha curcas</i> en tres diferentes tipos de suelo.	42
<b>Cuadro 7.2.</b> Condiciones ambientales promedio ( $\pm$ desviación estándar) registradas durante los experimentos realizados para determinar desempeño de <i>Jatropha curcas</i> en tres diferentes tipos de suelo.	43

<b>Cuadro 7.3.</b> Láminas de riego promedio semanales (en mm) del experimento 2_MESES.....	47
<b>Cuadro 7.4.</b> Tasas fotosintéticas promedio ( $\pm$ ) del experimento 2_MESES en plantas de <i>Jatropha curcas</i> de 55 días de edad.....	48
<b>Cuadro 7.5.</b> Medidas aéreas promedio ( $\pm$ ) de plantas de <i>J. curcas</i> obtenidas en los experimentos 1_MES, 2_MESES y 3_MESES.....	48
<b>Cuadro 7.6.</b> Medidas promedio ( $\pm$ ) de raíces principales de plantas de <i>J. curcas</i> obtenidas en los experimentos 1_MES, 2_MESES y 3_MESES. ....	49
<b>Cuadro 7.7.</b> Peso seco promedio ( $\pm$ ) de plantas de <i>J. curcas</i> obtenidas en los experimentos 1_MES, 2_MESES y 3_MESES.....	50
<b>Cuadro 8.1.</b> Condiciones experimentales para determinar vigor en diferentes sustratos.....	53
<b>Cuadro 8.2.</b> Condiciones ambientales promedio registradas durante el experimento. ....	57
<b>Cuadro 8.3.</b> Procedencias y propiedades de los sustratos.....	57
<b>Cuadro 8.4.</b> Modelos de crecimiento para plántulas de <i>J. curcas</i> de siete días de edad.....	62
<b>Cuadro 9.1.</b> Índices de simetría promedio ( $\pm$ ) de raíces de <i>Jatropha curcas</i> en tres tipos de suelo. ....	80
<b>Cuadro 9.2.</b> Ángulos de inclinación promedio ( $\pm$ ) de las raíces principales de <i>J. curcas</i> en la ZRT. ....	81
<b>Cuadro 9.3.</b> Medidas promedio ( $\pm$ ) de raíces principales.....	82
<b>Cuadro 10.1.</b> Diseño experimental para determinar patogenicidad pre-emergente con <i>Pythium aphanidermatum</i> en semillas de <i>Jatropha curcas</i> no tóxica.....	87
<b>Cuadro 10.2.</b> Diseño experimental para determinar patogenicidad post-emergente con <i>Pythium aphanidermatum</i> en plántulas de <i>Jatropha curcas</i> no tóxica.....	88
<b>Cuadro 10.3.</b> Porcentajes de germinación de <i>Jatropha curcas</i> bajo condiciones naturales y en germinadora con ambiente controlado en ausencia y presencia del <i>Pythiaceo</i> .....	90
<b>Cuadro 10.4.</b> Porcentajes de sobrevivencia en plántulas germinadas de <i>Jatropha curcas</i> bajo condiciones naturales y en germinadora con ambiente controlado, en ausencia y presencia de <i>Pythium aphanidermatum</i> . ....	92
<b>Cuadro 10.5.</b> Crecimientos diferenciales promedios ( $\pm$ ) de longitud de tallo, altura y número de hojas bajo los tres tratamientos durante un periodo de 31 días.....	93
<b>Cuadro 10.6.</b> Valores promedios ( $\pm$ ) de pesos secos bajo los tres tratamientos durante un periodo de 31 días. ....	93
<b>Cuadro 10.7.</b> Valores diferenciales promedios ( $\pm$ ) de longitud, altura de tallo y número de hojas bajo los tres tratamientos después de un periodo de 64 días.....	94
<b>Cuadro 10.8.</b> Valores promedios ( $\pm$ ) de pesos secos bajo los tres tratamientos al final del periodo de 64 días. ....	95
<b>Cuadro A.1.</b> Resultados del análisis de texturas por Bouyoucos (1963) y NRCS (2010). ....	104
<b>Cuadro A.2.</b> Resultados de análisis de suelos para los sustratos utilizados en los experimentos..	105
<b>Cuadro B.4.1.</b> Modelos de crecimiento lineal y no lineal con base en IS.....	108

# Índice de Figuras

	<b>Página</b>
<b>Figura 2.1.</b> Áreas marcadas como potenciales productoras de <i>Jatropha curcas</i> en México por INIFAP. ....	3
<b>Figura 3.1.</b> Distribución mundial actual (verde) y posibles rutas de propagación (amarillo) de <i>Jatropha curcas</i> L. ....	7
<b>Figura 4.1.</b> Semilla de <i>Jatropha curcas</i> . <b>a)</b> Semilla germinando <b>b)</b> Embrión y cotiledones. ....	12
<b>Figura 4.2.</b> Aproximación de la semilla de <i>Jatropha curcas</i> a un elipsoide. ....	12
<b>Figura 4.3.</b> Distribuciones de pesos de semillas de recolectas 2009 y 2010. ....	14
<b>Figura 4.4.</b> Distribución de largo, ancho y espesor de las semillas de las recolectas 2009. ....	15
<b>Figura 4.5.</b> Distribución de largo, ancho y espesor de las semillas de las recolectas 2010. ....	15
<b>Figura 4.6.</b> Pesos y tallas promedio de semillas ( $\pm \bullet$ ) por recolecta. ....	16
<b>Figura 4.7.</b> Regresiones pesos <i>versus</i> tallas de semillas recolectas 2009 y 2010. ....	17
<b>Figura 4.8.</b> Pesos promedio ( $\pm \bullet$ ) de semilla y endospermo por recolecta. ....	18
<b>Figura 5.1.</b> Tasas y curvas de germinación de semillas de <i>Jatropha curcas</i> . ....	26
<b>Figura 5.2.</b> <b>a)</b> Distribución de pesos de la re-colecta 2009 de Medellín y su relación con <b>b)</b> los promedios de germinación del experimento Mayo 2010. ....	27
<b>Figura 5.3.</b> Curvas de germinación por categorías de pesos del experimento Mayo 2010. ....	27
<b>Figura 5.4.</b> <b>a)</b> Distribución de pesos de la re-colecta 2010 de Alvarado y su relación con <b>b)</b> las curvas de germinación y sobrevivencia del experimento Octubre 2010. ....	29
<b>Figura 5.5.</b> Curvas de germinación por categorías de pesos (mg) y sustratos del experimento Octubre 2010. ....	29
<b>Figura 6.1.</b> Crecimiento semanal de tallos ( $\pm \bullet$ ), y su número de hoja y pesos secos a la extracción por categorías de peso de semillas. ....	34
<b>Figura 6.2.</b> Curvas de crecimientos promedio ( $\pm EE$ ) por categorías de pesos de semilla (mg) y sustratos. ....	36
<b>Figura 6.3.</b> Tasas de crecimiento de longitud y diámetro de tallos promedio ( $\pm EE$ ), por categorías de pesos de semilla (mg) y sustratos. ....	37
<b>Figura 6.4.</b> Tasas promedio ( $\pm EE$ ) de generación hojas y de área foliar total por categorías de pesos de semilla (mg) y sustratos. ....	37
<b>Figura 6.5.</b> Volúmenes promedio ( $\pm \bullet$ ) de tallos y raíces en función del peso de la semilla y tipo de sustrato. ....	39
<b>Figura 6.6.</b> Peso seco promedio ( $\pm \bullet$ ) de plántulas extraídas en diferentes sustratos y con diferentes categorías de peso de sus semillas. ....	40
<b>Figura 7.1.</b> Curvas de crecimiento promedio ( $\pm EE$ ) de longitud de tallos obtenidas de los experimentos 1_MES, 2_MESES y 3_MESES. ....	45

<b>Figura 7.2.</b> Curvas de crecimiento promedio ( $\pm$ EE) de diámetros de tallos de los experimentos 1_MES, 2_MESES y 3_MESES.....	46
<b>Figura 7.3.</b> Número de hojas promedio ( $\pm$ EE) de los experimentos 1_MES, 2_MESES y 3_MESES.....	46
<b>Figura 7.4.</b> Área foliar promedio ( $\pm$ EE) de los experimentos 1_MES, 2_MESES y 3_MESES.....	47
<b>Figura 7.5.</b> Clorofila promedio ( $\pm$ EE) medida durante los experimentos 1_MES, 2_MESES y 3_MESES.....	47
<b>Figura 8.1.</b> Minirizotrones y marcado de raíces de <i>Jatropha curcas</i> en sustrato Arenoso (izquierda), Franco-Arenoso (centro) y Franco-arcilloso (derecha).....	54
<b>Figura 8.2.</b> Crecimiento promedio ( $\pm$ EE) diario de tallos en plántulas germinadas en tres diferentes sustratos: Arenoso, Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso.....	59
<b>Figura 8.3.</b> Crecimiento promedio ( $\pm$ EE) diario de raíces principales en plántulas germinadas en tres diferentes sustratos: Arenoso, Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso. ....	60
<b>Figura 8.4.</b> Gráficas de dispersión de datos edad-longitud de tallo y su modelo a partir de plántulas de siete días en suelos: <b>a)</b> Arenoso, <b>b)</b> Franco-Arenoso y <b>c)</b> Franco-Arcilloso.....	61
<b>Figura 8.5.</b> Gráficas de dispersión de datos edad-diámetro de tallo y su modelo a partir de plántulas de siete días en suelos: <b>a)</b> Arenoso, <b>b)</b> Franco-Arenoso y <b>c)</b> Franco-Arcilloso.....	61
<b>Figura 8.6.</b> Gráficas de dispersión de datos edad-longitud de raíz pivotante y su modelo a partir de plántulas de siete días en suelos: <b>a)</b> Arenoso, <b>b)</b> Franco-Arenoso y <b>c)</b> Franco-Arcilloso. ....	61
<b>Figura 8.7.</b> Gráficas de dispersión de datos edad-longitud de raíces laterales y su modelo a partir de plántulas de siete días en suelos: <b>a)</b> Arenoso, <b>b)</b> Franco-Arenoso y <b>c)</b> Franco-Arcilloso. ....	62
<b>Figura 8.8.</b> Curvas de crecimiento promedio ( $\pm$ EE) después de la emergencia de las raíces principales de <i>Jatropha curcas</i> (pivotante y laterales) en tres sustratos diferentes. ....	63
<b>Figura 8.9.</b> Curvas de crecimiento promedio ( $\pm$ EE) después de la emergencia, del diámetro del tallo de <i>Jatropha curcas</i> en tres sustratos diferentes.....	63
<b>Figura 8.10.</b> Determinación de las zonas de crecimiento lineal con base en un ajuste de regresión lineal. Las curvas con mejor ajuste lineal se localizaron entre el segundo y cuarto día, en los tres sustratos y en los dos tipos de raíces (laterales y pivotantes).....	64
<b>Figura 8.11.</b> Cofias de <i>Jatropha curcas</i> <b>a)</b> aplicando Nomraski sin aclarado y <b>b)</b> aclarado propuesto por Dubrovsky <i>et al.</i> (2009).....	65
<b>Figura 8.12.</b> Células de raíces en diferentes segmentos de la punta. ....	65
<b>Figura 8.13.</b> Puntas de raíz principal de tres días de edad. Se identifican: <b>1)</b> zona meristemática, <b>2)</b> zona de división y elongación celular y <b>3)</b> zona pilífera.....	65
<b>Figura 8.14.</b> Crecimiento de tallos y diámetros promedio ( $\pm$ EE) finales por sustrato.....	66
<b>Figura 8.15.</b> Sistemas de raíces extraídos de tres diferentes sustratos. ....	67
<b>Figura 8.16.</b> Longitudes, diámetros y volúmenes promedio ( $\pm$ EE) ocupados por raíces de <i>Jatropha curcas</i> en tres diferentes sustratos.....	67
<b>Figura 8.17.</b> Sistemas de raíces extraídos de los diferentes sustratos. ....	68

<b>Figura 8.18.</b> Sistemas de raíces extraídos de los diferentes sustratos. ....	69
<b>Figura 8.19.a y b.</b> Sistemas de raíces extraídos de los diferentes sustratos. ....	69
<b>Figura 8.19.c.</b> Sistemas de raíces extraídos de los diferentes sustratos. ....	70
<b>Figura 8.20.</b> Pelos radicales de raíces en los tres sustratos. ....	70
<b>Figura 9.1.</b> Sistemas arquitecturales. <b>a y b:</b> Sistema dicotómico. <b>c:</b> Sistema de columna de Pescado. ....	73
<b>Figura 9.2.</b> Representación esquemática del proceso de registro del formato MTG. ....	73
<b>Figura 9.3. a)</b> Modelo arquitectónico de <i>Jatropha curcas</i> . <b>b)</b> Sistema radical inicial de <i>Jatropha curcas</i> . ....	74
<b>Figura 9.4.</b> Referenciación utilizada para registrar las coordenadas 3D de la arquitectura de las raíces de <i>Jatropha curcas</i> . ....	76
<b>Figura 9.5.</b> Determinación de $\bullet$ Symm a partir del ángulo con la horizontal. ....	78
<b>Figura 9.6.</b> Gráficos de índices de simetría de <i>J. curcas</i> en tres tipos de suelo. ....	80
<b>Figura 9.7.</b> Modelos 3D de raíces de <i>J. curcas</i> en suelo: Arenoso, Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso. ....	82
<b>Figura 9.8.</b> Superficie promedio (+ $\bullet$ ) proyectada por raíces de <i>J. curcas</i> en tres tipos de suelo. ....	82
<b>Figura 10.1.</b> Ooesporas formadas por posible <i>Pythium aphanidermatum</i> . ....	89
<b>Figura 10.2.</b> Porcentaje acumulativo de germinación de semillas de <i>Jatropha curcas</i> en presencia y ausencia de <i>Pythium aphanidermatum</i> . <b>a)</b> Bajo condiciones naturales. <b>b)</b> En germinadora con ambiente controlado. ....	90
<b>Figura 10.3.</b> Aspecto de semillas y plántulas de <i>Jatropha curcas</i> con muerte pre y post emergente causada por <i>Pythium aphanidermatum</i> . ....	92
<b>Figura 10.4.</b> Efectos del ataque de <i>P. aphanidermatum</i> sobre radículas en plántulas de reciente germinación. ....	92
<b>Figura 10.5.</b> Tallas y pesos promedio de plántulas de <i>Jatropha curcas</i> para los tres tratamientos con inoculaciones de <i>P. aphanidermatum</i> por un periodo de 31 días. <b>a)</b> Alturas iniciales y finales. <b>b)</b> Diámetros de base de tallo iniciales y finales. <b>c)</b> Número de hojas al inicio y al final del experimento. <b>d)</b> Pesos secos finales. Las barras de error representan la desviación estándar de la media. ....	94
<b>Figura 10.6.</b> Tallas promedio y pesos secos de plántulas de <i>Jatropha curcas</i> para diferentes inoculaciones con <i>P. aphanidermatum</i> por un periodo de 64 días. ....	95
<b>Figura A.1.</b> Triangulo de texturas de la NCRS. Fuente: NCRS (2010). ....	103
<b>Figura B.1.</b> Hoja cotiledonea y medidas de un elipse. ....	106
<b>Figura B.2.</b> Medidas de longitud de hoja. T=transversal, L=longitudinal. ....	106
<b>Figura B.3.</b> Parámetros considerados para estimar volumen de tallos en plántulas de <i>Jatropha</i> . ....	107
<b>Figura B.4.</b> Parámetros considerados para estimar volumen de raíces en plántulas de <i>Jatropha</i> . ....	107

## Resumen

Las formas o ecotipos no tóxicos de *Jatropha curcas* L. (NTJC) poco han sido documentadas a nivel nacional e internacional, a pesar de su mayor potencial como fuentes energéticas y alimenticias, comparadas con las formas tóxicas (TJC). Es por ello que esta investigación tiene como objetivo analizar las propiedades y desempeño de semillas y plántulas NTJC en suelos con diferentes texturas y contenido nutrimental; así como su respuesta ante un patógeno localmente importante, como es *Pythium aphanidermatum*. La investigación comprendió el estudio de: 1) semillas, 2) plántulas, 3) raíces y 4) la inoculación del patógeno en semillas y plántulas. El estudio de las semillas se realizó mediante la documentación de las cualidades oleicas de semillas NTJC y TJC; mediciones alométricas de cuatro accesiones, y tres experimentos para determinar los efectos de sus pesos sobre su germinación y vigor. Se observó el crecimiento de las plántulas desde su germinación y durante varios periodos (diario, semanal y mensual) en ocho sustratos con diferentes condiciones texturales y nutrimentales. Las raíces y su relación con la parte aérea fueron analizadas en seis sustratos diferentes mediante microscopios óptico y electrónico, y un enfoque sobre su estructura aplicando técnicas tri-dimensionales. La respuesta al patógeno se estudió mediante su inoculación en semillas y plántulas en tres sustratos y durante dos periodos de tiempo diferentes. Los resultados de las investigaciones disponibles sobre las semillas NTJC encontraron cualidades oleicas similares a las semillas TJC; alométricamente las semillas NTJC fueron muy dispersas y tuvieron una relación positiva entre su peso y su vigor. El desarrollo de las plántulas fue mayor en sustratos con contenidos de materia orgánica (MO) superiores al 1.0% y texturas finas a medias, en relación con texturas gruesas y contenidos de MO inferiores, donde las formas NTJC sobrevivieron, pero inhibieron su crecimiento. Su sistema de raíces demostró una mayor capacidad de fijación en suelos con texturas medias a finas, y una fuerte tendencia morfo-genética que permitió mantener su estructura original independiente del sustrato y adaptada para explorar suelos pobres. La inoculación con *P. aphanidermatum* determinó que la forma NTJC fue capaz de sobrevivir en suelos contaminados con este fitopatógeno durante la etapa posterior a la germinación. Por lo que se concluyó que las semillas NTJC energéticamente tienen propiedades similares a las semillas TJC. La dispersión en la alometría de sus semillas y su capacidad para adaptarse a un patógeno local y a suelos pobres son caracteres indicativos de una buena diversidad genética y de ecotipos aptos a las condiciones del trópico y subtrópico mexicano. Sin embargo, su establecimiento en plantaciones comerciales requeriría de fertilizantes en suelos con muy baja fertilidad.

**Palabras clave:** *Jatropha curcas*, semillas, plántulas, sistemas de raíces.

## Abstract

Non toxic ecotypes of *Jatropha curcas* L. (NTJC) have been poorly documented at the national or international scales, despite having higher potential as energy and food sources when compared with the toxic forms (TJC). Therefore, the objective of this research was to analyze the properties and performance of NTJC seeds and seedlings in soils with different textures and nutritional contents, as well as their response to a locally important pathogen, *Pythium aphanidermatum*. This research included the study of: 1) seeds, 2) seedlings, 3) roots and 4) seeds and plants inoculated with the pathogen. The study of seeds was performed by literature research on the oleic qualities of NTJC and TJC; allometric measurements on four sources and three experiments to determine the effects of seed weight on germination and vigor. Plant growth was observed beginning at germination and through several periods (daily, weekly and monthly) in eight different substrates and nutritional content. Roots were analyzed in six different substrates using optic and electronic microscopes, and a study of root structure was performed using three dimensional techniques. Pathogenic response was studied by inoculating seeds and seedlings in three different substrates and at two periods in time. The results on literature review found similar oleic quality between NTJC and TJC seeds; the allometric characters of NTJC were highly variable, and a positive correlation between seed weight and vigor was found. Seedling development proceeded more rapidly in substrates with organic matter content (OM) greater than 1.0% and in medium to fine textures, whereas NTJC forms survived but had inhibited growth in substrates with OM less than 1.0% and coarse textures. Root systems showed higher soil fixation capabilities in medium to fine textures, and a strong morpho-genetic structural pattern adapted to explore poor soils, and not affected by the substrate composition. Inoculation with *P. aphanidermatum* determined that NTJC was able to survive in contaminated soils when it entered the post-germination stage. In conclusion NTJC and TJC seeds have similar energetic properties. Dispersed allometry in seeds and their capability to survive despite a local pathogen and poor soils indicate a good genetic diversity and adaptability to the Mexican tropical and subtropical environments. However, the establishment of NTJC forms in commercial plantations would require additional fertilization on poor soils.

**Keywords:** *Jatropha curcas*, seeds, seedlings, root systems.

## I. Introducción general

*Jatropha curcas* L. es una especie oleaginosa de naturaleza generalmente tóxica (Brittaine y Litaladio, 2010), que se ha establecido en regiones tropicales y subtropicales de América, África y Asia, gracias a su habilidad para sobrevivir en suelos pobres (Heller, 1996). Por lo que sus plantaciones se promueven como cultivos de bajos o nulos requerimientos agroecológicos, que no competirían con especies alimentarias (Brittaine y Litaladio, 2010). Esta situación ha generado altas expectativas entre los productores interesados en los cultivos bioenergéticos, mismas que podrían exceder las capacidades naturales de la especie (Fairless, 2007; FedeBiocombustibles, 2010). Ya que, por encontrarse en proceso de domesticación (Achten *et al.*, 2010), *Jatropha curcas* y particularmente las formas no tóxicas, aun requieren de mayores estudios agronómicos que permitan conocer sus propiedades y respuestas ante diferentes condiciones ambientales. Especialmente en México, donde las plantaciones comerciales son muy recientes, y no se cuenta con experiencias de producción superiores a una década (Solís, 2010). Es por ello que este proyecto recopiló y resumió investigaciones y experiencias prácticas de científicos, productores e instituciones pioneras en el cultivo de la especie a nivel nacional e internacional. Las investigaciones bibliográficas sobre formas tóxicas y no tóxicas se contrastaron con ensayos realizados sobre procedencias no tóxicas y su crecimiento en suelos del trópico mexicano. Los estudios se realizaron durante más de tres años (2008-2012) y se resumen en 11 capítulos. La importancia de la investigación y sus objetivos se definieron en el capítulo II. Las características generales de la especie, y una comparación con base en literatura científica sobre las propiedades de las semillas tóxicas y no tóxicas se reportaron en el Capítulo III. En este capítulo también se reportan investigaciones sobre otras aplicaciones de la especie dadas por los habitantes de las localidades donde se encuentra. Posteriormente se analizaron los parámetros físicos de las semillas y su posible relación con las condiciones ambientales de sus procedencias en el Capítulo IV. Los efectos del peso de las semillas y los sustratos donde se localizan sobre la germinación y vigor de las plántulas se reportaron en los Capítulos V y VI; con experimentos en cinco diferentes tipos de suelo y en cuatro sitios experimentales, mismos que se detallaron en dos apéndices (A y C), por utilizarse en varios capítulos de este trabajo. Para brindar un conocimiento sobre su adaptación a diferentes tipos de suelo, en los Capítulos VII, VIII y XIX se analizaron las relaciones entre los sustratos y su crecimiento, con un enfoque detallado en el sistema de raíces, el cual permitió comprender las demandas y estrategias de sobrevivencia de la especie en diferentes ambientes. Para cubrir un aspecto fitosanitario, en el Capítulo X se presentó un caso de estudio sobre la respuesta de la forma no tóxica de *J. curcas* ante el ataque de un patógeno de suelo localmente importante (*Pythium aphanidermatum*). Finalmente se realizó una discusión general de los resultados encontrados y se dieron las recomendaciones metodológicas para futuras investigaciones y para tomadores de decisiones en el capítulo XI.

## II. Antecedentes y propuestas de la investigación

### 2.1. Las necesidades alimentarias y los biocombustibles

Actualmente vivimos en una época de grandes demandas energéticas ocasionadas por el incremento poblacional y económico mundial (IEA, 2011) que en su mayoría se satisfacen con recursos no renovables, cuyas reservas son cada vez más limitadas y con una producción y uso asociados a la emisión de gases de efecto invernadero que impactan sobre el cambio climático (COM, 2007). Para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles se requieren no sola una, sino diversas fuentes de energía renovables que puedan instalarse con base en las condiciones particulares de cada localidad. Los biocombustibles generados a partir de cultivos vegetales son una alternativa de energías renovables con ventajas sociales y ambientales, dependiendo de su contexto. Desde el punto de vista social, si los cultivos son locales se estimulan las fuentes de trabajo, mismas que impactan benéficamente en la economía de la comunidad (EUR, 2009; Mittelbach *et al.*, 2010). Desde el punto de vista ambiental, si los cultivos son perennes, tienen un uso reforestador y demandan bajos insumos para su producción; su establecimiento permite secuestrar carbono ambiental, mejorar la fijación de suelos y evitar la desertificación (Heller, 1996).

Esta situación ha generado un creciente interés por el cultivo de especies oleaginosas para la producción de biocombustibles. Sin embargo, cultivar plantas oleaginosas para la producción de biocombustibles implica la utilización de amplias superficies de tierra que, además de competir con la demanda alimentaria, cada vez son menos y se encuentran más deterioradas. Adicionalmente, utilizar cultivos tradicionales como canola (*Brassica napus*), cártamo (*Carthamus tinctorius*), girasol (*Helianthus annuus*) y soja (*Glycine max*) para producir biocombustibles implica que los precios de alimentos que utilicen estos productos se incrementen. Por ello se da énfasis particular a cultivos que no necesariamente se emplean como alimento humano o animal, como es el caso de higuera (*Ricinus communis*), palma de aceite (*Elaeis guineensis*) y piñón (*Jatropha curcas*) (Zamarripa y Díaz, 2008).

El piñón se ha difundido ampliamente sobre otros cultivos para la obtención de biocombustibles por que se dice que puede prosperar bien en suelos degradados, en condiciones de sequía y de baja fertilidad (Heller, 1996; Henning 2003; Rajagopal, 2008). Así que se promueve como un cultivo forestal de bajos requerimientos, que puede ser aprovechado para satisfacer las demandas energéticas por las energías verdes. Aunque esta especie es en general tóxica para los humanos, en nuestro país se cuenta con una forma única no tóxica, cuyas semillas pueden ser comestibles (Schmook y Sánchez, 2000; Martínez *et al.* 2004; Makkar *et al.* 2008) y que de ser ampliamente

cultivada podría satisfacer también demandas alimentarias; por lo que el estudio de la forma no tóxica es de mayor importancia para cubrir ambos requerimientos.

## 2.2. El problema de investigación

Con base en datos proporcionados por el Comité Nacional Sistema Producto Oleaginosas, el INIFAP y la SAGARPA (Zamarripa y Díaz; 2008) se ha determinado que México posee un potencial de 6 millones de hectáreas para el cultivo de *J. curcas*. Mismo que aun no se ha evaluado, ya que las plantaciones comerciales establecidas son muy recientes (Félix, 2008) y no se tienen estadísticas sobre las mismas. Sin embargo, como se aprecia en la [Figura 2.1](#), este potencial posiblemente esté estimado a un nivel de macro escala (1:250,000), y no considera análisis sobre condiciones edafológicas ([Cuadro 2.1](#)), de suma importancia para lograr un establecimiento productivo de esta especie en términos energéticos. Un estudio más detallado, que sí considera mapas edafológicos, para el estado de Veracruz, calcula una superficie productiva de 872 mil hectáreas (Inurreta, 2012). Sin embargo, ambas estimaciones se basaron en datos bibliográficos. Mismos que se han obtenido de cultivos localizados en otros países, generalmente en Asia y África, y algunos de ellos solo consideran la capacidad de la planta para sobrevivir en el trópico y subtropical con cualquier tipo de suelo (Heller, 1996; Henning, 2003 y Fairless, 2007; Ouwens *et al.*, 2007); pero no están contrastados con el buen desarrollo y productividad de la planta.



**Figura 2.1.** Áreas marcadas como potenciales productoras de *Jatropha curcas* en México por INIFAP. Este potencial está basado en los requerimientos agroecológicos del [Cuadro 2.1](#). Fuente: Zamarripa y Díaz, 2008.

**Cuadro 2.1.** Requerimientos agroecológicos de *Jatropha curcas* L. según Zamarripa y Díaz, 2008

Variable	Potencial	
	Alto	Medio
Altitud	0 - 1000 msnm	1000 - 1500 msnm
Precipitación	600 - 1200 mm	1200 - 1800 mm
Temperatura	18 - 28 ° C	28 - 34 ° C
Pendiente	0 - 20%	
Uso del suelo	Área agrícola	

Para poder predecir el comportamiento de *J. curcas* en los sitios donde se planea cultivarla se requieren estudios que estén directamente relacionados con la capacidad de supervivencia y el crecimiento de las plantas en los climas y suelos donde mejor se desarrolla. En este sentido se requieren investigaciones sobre *J. curcas* y su relación con los sustratos donde se encuentra, así como las relaciones de crecimiento entre las partes aéreas y sus raíces. De esta manera se podría evaluar la capacidad de la especie de crecer productivamente en cualquier tipo de suelo de las regiones tropicales y subtropicales, como se ha sugerido ampliamente (Jongschaap *et al.*, 2007; Achten *et al.*, 2007 y Fairless, 2007). Adicionalmente, un conocimiento más profundo sobre la distribución y profundidad del sistema de raíces del piñón, permitiría poder predecir su capacidad de competencia por agua y nutrientes, si se planea establecerlo dentro de un policultivo. Por ello se requiere llevar a cabo investigaciones cualitativas y cuantitativas del crecimiento de la planta, con un enfoque en el sistema de raíces bajo las tres clases texturales principales de suelo: arcilloso, franco y arenoso (Casanova *et al.*, 2004). La generación de este conocimiento permitiría determinar los sitios de cultivo para esta especie, que proporcionen las condiciones más adecuadas para su desarrollo saludable y productivo.

## 2.3. Objetivos

### 2.3.1. General

Analizar las propiedades físico-químicas de las semillas, y evaluar la germinación, el crecimiento aéreo y del sistema radical de la forma no tóxica de *Jatropha curcas* en suelos con diferentes propiedades físico-químicas y ante la presencia de un patógeno local importante (*Pythium aphanidermatum*); para determinar las características morfométricas y las capacidades de semillas y plántulas para sobrevivir y establecerse en diferentes suelos y ante un patógeno.

### 2.3.2. Particulares

- Analizar las propiedades físico-químicas de las semillas no tóxicas comparadas contra las tóxicas para determinar similitudes y diferencias.

- Determinar el efecto de diferentes texturas y propiedades químicas del suelo sobre el desarrollo aéreo y del sistema radical a partir de la germinación y durante los primeros estadios de desarrollo de la planta.
- Evaluar diferentes modelos matemáticos de crecimiento con enfoque en el sistema de raíces y determinar el que mejor se ajuste a los periodos observados.
- Evaluar el impacto de un patógeno de suelo localmente importante, durante la germinación y desarrollo de la especie, para determinar su capacidad de sobrevivencia a las condiciones del ataque.

## 2.4. Justificación

*Jatropha curcas* ha recibido gran promoción como una especie con alto potencial para desarrollarse en suelos marginales y aplicarse en la restauración ecológica de los mismos (Achten *et al.*, 2007; Fairless, 2007; Jongschaap *et al.*, 2007; Ouwens *et al.*, 2007). Sin embargo, este hecho está basado principalmente en evidencias empíricas. Por lo que es de suma importancia contar con estudios científicos sobre su crecimiento en relación con las distintas condiciones edáficas donde se pretende cultivar.

El conocimiento sobre el desarrollo parte aérea-raíz y su relación con las características del suelo permitiría elaborar modelos de crecimiento relacionados con el sitio y los métodos de plantación (Gaitán *et al.*, 2005); lo que sería un conocimiento útil para los futuros productores de *J. curcas* en México, que no cuentan con información relevante al respecto.

El estudio del desarrollo del sistema de raíces en diferentes condiciones edáficas y su respuesta a patógenos locales proveería información valiosa que permitiría a los productores determinar si sus suelos son aptos para esta planta, o los posibles problemas que podrían enfrentar con este cultivo.

La forma no tóxica de *J. curcas* es usada por grupos indígenas mexicanos con fines alimenticios, que deben ser preservados y que confieren un mayor valor a este genotipo, que los fines puramente energéticos (Schmook y Sánchez, 2000; Martínez, 2010). Sin embargo, los mayores estudios se han realizado en formas tóxicas, por estar más ampliamente distribuidas en los trópicos del mundo (Heller, 1996). De esta manera, un estudio enfocado en una forma no tóxica mexicana y suelos tropicales mexicanos adquiere una mayor relevancia, al incrementar los conocimientos sobre el potencial de este germoplasma para establecerse en proyectos futuros que satisfagan demandas alimentarias y energéticas de nuestro país.

## III. *Jatropha curcas* – Características de la especie y sus formas

### 3.1. Introducción

El interés comercial por la especie *Jatropha curcas* L., conocida en México como “Piñón”, inició desde la primera mitad del siglo XIX, principalmente por las aplicaciones del aceite de sus semillas en la elaboración de detergentes y como combustible para lámparas (Heller, 1996; Brittain y Litaladio, 2010). Aunque el surgimiento de los detergentes sintéticos con precios menores a partir de 1950, así como el aumento de las lámparas eléctricas, provocó su declinación casi total ya para el año de 1970 (Brittain y Litaladio, 2010). Sin embargo, ante la preocupación por la disminución de las reservas de combustibles fósiles y la posibilidad de producir biodiesel con esta planta, la especie volvió a despertar interés; y para el año 2000 (Foild, 1996; Henning, 2002; Toral *et al.* 2008; Brittain y Litaladio, 2010) ya se difundía ampliamente su establecimiento en plantaciones comerciales en varios países (Brittain y Litaladio, 2010). Si bien, aún se desconocen concretamente sus capacidades ecológicas y ventajas económicas sobre otras especies. Por lo que es importante contar con el conocimiento científico sobre los estudios que se han realizado. En esta investigación se presentan los aspectos generales que caracterizan a la especie *Jatropha curcas* L., la taxonomía, su descripción botánica y los orígenes probables de la planta. Posteriormente se compara a la forma de *J. curcas* no tóxica o de muy baja toxicidad, con la forma tóxica, que posee la mayor distribución geográfica global (Heller, 1996, Brittain y Litaladio, 2010). Finalmente se presentan las posibles aplicaciones alimentarias, comerciales y ecológicas que la especie podría tener, con un énfasis en la forma no tóxica mexicana.

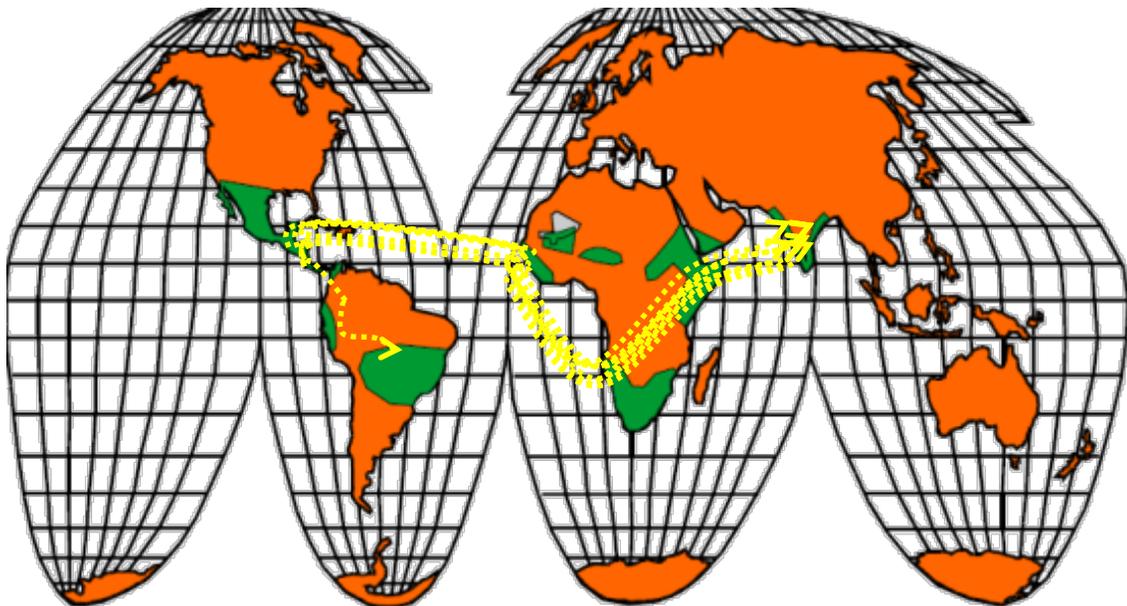
### 3.2. Taxonomía, descripción y orígenes

Carl von Linné, en 1753, fue el primero en describir y clasificar a *J. curcas* y darle su nombre botánico actual. La designación del género *Jatropha* deriva del griego *jatrós*, que significa doctor, un nombre que involucra usos medicinales y *trophé*, que significa comida (Heller, 1996); mientras que *curcas* podría ser un nombre indio o turco (Sánchez, 2010). *J. curcas* se clasifica dentro de la familia Euphorbiaceae y la subfamilia Crotonoideae (GRIN, 2008). El género *Jatropha* contiene dos subgéneros *Curcas* y *Jatropha*; 10 secciones y 10 subsecciones con aproximadamente 175 especies conocidas; la mayoría originarias de América; aunque también existen especies en África y Asia.

*J. curcas* es una planta monoica, caducifolia y de porte arbustivo; que puede alcanzar desde dos hasta más de cinco metros de altura, dependiendo de las condiciones de crecimiento (Brittain y

Lutaladio, 2010). Su tronco varía entre 14 y 18 cm de diámetro, corteza gris o rojiza con escamas verdosas. Los tallos crecen con discontinuidad morfológica en cada incremento. Las hojas son ovaladas, levemente 3-7 lobadas, de 10-25 cm de largo y 9-15 cm de ancho. La disposición de las ramas es alterna, con un largo de 15 a 20 cm y de 3 a 5 cm de diámetro. Las inflorescencias se forman terminalmente en la axila de las hojas en las ramas. Las flores femeninas son menos abundantes que las masculinas y ocasionalmente ocurren algunas flores hermafroditas (Sánchez, 2010). Los frutos poseen de dos a tres y hasta cuatro semillas (Makkar, 2008). Las semillas poseen una capsula externa muy dura cuando seca que encierra dos cotiledones formados por un albumen rico en aceite (Sánchez, 2010).

Investigaciones sobre sus orígenes apuntan a que la especie es originaria de México y América Central (Achten, 2010). Un fósil descubierto en Belem, Perú, coloca la existencia de *Jatropha* en una antigüedad de alrededor de 70 millones de años, siendo *curcas* la forma más primitiva del género (Becker y Makkar, 2008). En México las primeras investigaciones la reportan en las regiones costeras, y en Veracruz se ha reportado como silvestre en dunas costeras (Hernández, 1978); mientras que en Centroamérica la reportan desde Belice hasta Panamá y el Caribe (Heller, 1996). Actualmente *J. curcas* se encuentra distribuida ampliamente en Latinoamérica, África, India y el sur de Asia, debido a que probablemente fue transportada por los portugueses vía las islas de Cabo Verde hacia otros países en África y Asia durante el siglo XVIII (Heller, 1996; Henning, 2003). El mapa de la [Figura 3.1](#) muestra la distribución de la especie y sus posibles rutas en el planeta.



**Figura 3.1.** Distribución mundial (verde) y posibles rutas de propagación (amarillo) de *Jatropha curcas* L. Fuente: mapa modificado de Henning (2003).

### 3.3. Requerimientos agroecológicos de *Jatropha curcas*

Por ser una especie neotropical *J. curcas* tolera climas tropicales y subtropicales y se localiza en altitudes desde los 0 a los 1300 m sobre el nivel del mar (Sánchez, 2010). El piñón puede perder sus hojas y sobrevivir periodos largos de sequía, por lo que se considera capacitado para soportar condiciones semiáridas y áridas, pero no tolera inundaciones prolongadas ni temperaturas por debajo de los cero grados (Heller, 1996; Brittain y Lutaladio, 2010). En plantaciones de India se encontró que la especie puede crecer bien con precipitaciones de hasta 246 mm al año y tratamientos de irrigación salina durante el periodo de sequía, pero no se reportaron datos de producción durante ese tiempo (Jongschaap *et al.*, 2007). En general se ha encontrado que la planta puede sobrevivir con precipitaciones de hasta 300 mm al año, pero se requiere un mínimo de 600 mm para inducir producción de frutos y las precipitaciones óptimas se ubican entre 1000 a 1500 mm anuales. Por otra parte, se dice que un exceso de lluvia y humedad la hace propensa a ataques fungales (Ouwens *et al.*, 2007).

### 3.4. Formas o ecotipos diferenciados

Muchas de las Euphorbias son conocidas por su producción de fitotoxinas (Brittain y Lutaladio, 2010). Por lo que no es extraño que la mayoría de las procedencias de *J. curcas* distribuidas en las áreas tropicales del planeta se reporten como tóxicas para animales domésticos y humanos (Brittain y Lutaladio, 2010; Becker, 2008). A pesar de que todas las semillas de estas plantas poseen factores antinutricionales, en su mayoría éstos se eliminan con el calor, por lo que solo se considera la presencia de los esteroides de forbol (que no degradan a altas temperaturas) como la causa principal por la cual se denomina tóxica para los humanos a una semilla de piñón. Los esteroides de forbol pueden causar vómitos, diarrea, co-carcinógenos e irritaciones de la piel (Martínez *et al.*, 2010). Tomando este factor como clasificador, se consideran dos procedencias de *J. curcas*: la Nicaragüense, o tóxica que posee semillas y aceite tóxicos, la cual probablemente fue transportada al resto del mundo (Heller, 1996); y la Mexicana, conocida también como no tóxica (Henning, 2003) y que se considera originaria de México (Becker y Makkar, 2008; Achten *et al.*, 2010). De acuerdo con Schmook y Sánchez (2000) las procedencias tóxicas, que son capaces de causar síntomas de envenenamiento, pueden contener cantidades de esteroides de Forbol de 2.17 mg/g o más. Mientras las procedencias no tóxicas, que no representan riesgos al ser consumidas después de tostarse o cocerse, poseen cantidades muy limitadas de esta sustancia de 0.11 mg/g o menos. Para Martínez *et al.* (2010) los contenidos de esteroides de forbol de las semillas consideradas tóxicas varían entre 0.6 – 4.05 mg/g, y se encuentran ausentes o no son detectados en las semillas consideradas como no tóxicas.

### 3.5. Características del aceite de las semillas

El aceite de las semillas de *J. curcas* es muy viscoso, altamente adecuado para cocinar y como combustible para la producción de biodiesel (Mittelbach, 2010), con una eficiencia marginal de solo 1.7% menor que el diesel mineral (Becker y Makkar, 2008). Investigadores como Becker (2008), Makkar (2008) y Martínez *et al.* (2004 y 2010) han publicado trabajos comparativos sobre la composición de los aceites de las variedades tóxicas y las no tóxicas de México. De acuerdo con Becker y Makkar (2008) las diferencias entre genotipos son mínimas en relación a sus contenidos de ácidos grasos (Cuadro 3.1).

**Cuadro 3.1.** Análisis de contenido de ácidos grasos en las formas tóxica y no tóxica de *Jatropha curcas*. Fuente: Traducido de Becker y Makkar (2008).

Fórmula molecular	Nombre científico	Nombre sistemático	*No tóxica %	*Tóxica %
14:0	tetradecanoico	Mirístico	0.2	0.1
16:0	hexadecanoico	Palmitito	13.4	15.3
17:0	heptadecanoico	Heptadecanoico	0.1	0.1
18:0	octadecanoico	Estearico	6.4	6.6
20:0	eicosanoico	Arachídico	0.2	0.2
22:0	docosanoico	Behénico	trazas	trazas
24	tetracosanoico	Lignocerico	trazas	trazas
Total saturado			20.3	22.3
16:1n-7	9-hexadecenoic	Palmitoleic	0.8	0.9
18:1n-9	cis-9-octadenoic	Oleico	36.5	41.0
20:1n-9	cis-11-eicosenoic	Eicosenoico	0.1	0.1
Total monoinsaturado			37.3	42.0
18:2n-6	cis-9,12-octadecadienoic	Linoleico	42.1	35.3
18:3n-3	9,12,15-octadecatrienoic	•-linolenico (ALA)	0.2	0.3
Total PUFA			42.3	35.7

\*Resultados presentados como porcentajes de ácidos grasos.

Makkar *et al.* (2008) realizaron análisis en semillas tóxicas y no tóxicas (ambas mexicanas), sin encontrar diferencias significativas en los porcentajes de contenidos de aceites y proteínas entre procedencias, como se muestra en el Cuadro 3.2, con promedios y desviación estándar (•).

**Cuadro 3.2.** Contenidos promedio ( $\pm$ •) de aceite y proteína en semillas tóxicas y no tóxicas. Fuente: Traducido de Makkar *et al.* (2008).

Número de semillas por Fruta	Contenido de aceites (%)		Contenido de proteínas (%)	
	*No tóxicas	*Tóxicas	*No tóxica	*Tóxica
1	34.8 $\pm$ 1.79	35.30 $\pm$ 1.56	16.60 $\pm$ 1.27	18.20 $\pm$ 0.74
2	35.8 $\pm$ 0.78	37.00 $\pm$ 1.09	16.50 $\pm$ 0.63	17.30 $\pm$ 1.39
3	35.2 $\pm$ 1.81	37.10 $\pm$ 0.97	16.30 $\pm$ 1.07	17.30 $\pm$ 0.94
4	35.5 $\pm$ 1.01	36.01 $\pm$ 1.57	16.70 $\pm$ 1.11	18.17 $\pm$ 0.63

\*Los valores de semillas tóxicas y no tóxicas no difieren significativamente ( $P > 0.05$ ).

Con base en estas investigaciones, se hace evidente que tanto las procedencias tóxicas como las no tóxicas poseen un alto potencial para ser utilizadas como fuente de biocombustibles. La procedencia no tóxica, por su parte, posee la ventaja adicional de poder ser utilizada como fuente de alimentación humana y animal.

### **3.6. Usos actuales de *Jatropha curcas* y sus productos**

Aunado a su cultivo por la riqueza del aceite de sus semillas, el piñón también se utiliza en otras aplicaciones: la planta misma como protectora de cultivos (cerca viva) y reforestadora de suelos; su madera para leña; sus hojas como composta y como anti-inflamatorios; sus frutos como fertilizante; su látex contra enfermedades de la piel y el fuego labial; y sus semillas en la producción de jabones (Heller, 1996; Henning, 2003; Jongschaap *et al.*, 2007). Adicionalmente las semillas de la forma no tóxica son utilizadas en la elaboración de platillos regionales en comunidades del estado de Veracruz, Puebla, Morelos y la península de Yucatán (Schmook y Sánchez, 2000; Martínez *et al.*, 2010).

### **3.7. Conclusiones**

Como especie *Jatropha curcas* se ha diseminado globalmente por sus propiedades oleaginosas y su capacidad de sobrevivir en sitios con baja precipitación y suelos pobres. La forma no tóxica, sin embargo, no fue transportada fuera del país y pocos científicos la han estudiado. Por lo que aun no se tienen conocimientos sobre su establecimiento en diferentes ambientes, y si tendrá las mismas capacidades que la forma tóxica. Aunque por principio se ha podido establecer que las propiedades de sus semillas son muy similares a las tóxicas, excepto por el contenido de forbol ésteres, lo que les da una ventaja alimentaria que las formas tóxicas no tienen; cualidad que ha sido ya explotada por algunas culturas regionales del sureste mexicano.

## IV. Alometría de semillas de *Jatropha curcas*\*

### 4.1. Introducción

El cultivo de *Jatropha curcas* se promueve ampliamente en México, principalmente debido al alto contenido de aceite en sus semillas (SEMARNAT, 2008). Dado que las semillas se consideran la parte más valiosa de la planta, su tamaño y calidad adquieren relevancia en el establecimiento comercial del cultivo. Desde el punto de vista físico, las semillas grandes y pesadas, con una buena relación testa:almendra y donde la masa de la segunda sea significativamente mayor, poseen una mayor cantidad de nutrientes y suponen mejor calidad fisiológica y comercial. Localizar genotipos cuyas semillas satisfagan estas características es un aspecto relevante de la investigación sobre esta especie. Martínez *et al.* (2006, 2008, 2010) han reportado pesos y tallas de semillas tóxicas y no tóxicas del sur del país, aunque solo se ha tomado un reducido número de semillas en algunos estados de la república. Por lo tanto, y con el objeto de conocer las características morfométricas de algunas procedencias no tóxicas del estado de Veracruz y su posible relación con las condiciones agroclimáticas donde se encuentran, en esta investigación se presenta inicialmente la descripción de la semilla y posteriormente se analizan las relaciones de pesos y tallas de semillas de cuatro procedencias del centro del estado de Veracruz. Al final se realiza una comparación con recolectas de otros sitios del estado y estados de la república reportadas por otros investigadores.

#### 4.1.1. Objetivo

Determinar distribuciones de pesos y tallas de semillas de cuatro procedencias de *Jatropha curcas* y establecer posibles dependencias con las condiciones agroecológicas donde se colectaron.

#### 4.1.2. Hipótesis

La procedencia y el ambiente tienen un impacto significativo sobre los pesos y tallas de las semillas de *Jatropha curcas*.

### 4.2. Materiales y métodos

#### 4.2.1. Descripción morfológica de la semilla de *Jatropha curcas*

Las diásporas de *J. curcas* se desarrollan dentro de frutos capsulares dehiscentes, elípticos, de color marrón oscuro; de 2.5 cm a 4.0 cm de largo, por 2.2 cm de ancho. Cada fruto puede contener de una a cuatro semillas. Las semillas son oblongo-elipsoides, subtrígonas en corte transversal, por 8 mm a 10 mm de grueso (Figura 4.1.a). La cubierta seminal es de color negro, con brillo apagado, cartácea, con estrías longitudinales prominentes. Hilo discernible, basal, abocado, elevado; rodeado por una

\*Artículo enviado al boletín de la Sociedad Botánica de México

carúncula blanca y lobada. Perispermo ausente. Endospermo presente, abundante, blanco, entero, carnoso, rodeando completamente al embrión. Embrión recto axial blanco (Figura 4.1.b). Dos cotiledones palmatinervados expandidos, planos y foliáceos, iguales, rectos, libres entre sí, ovados; con el ápice redondeado y la base auriculada; más grandes que el hipocófito (Niembro, 2000).

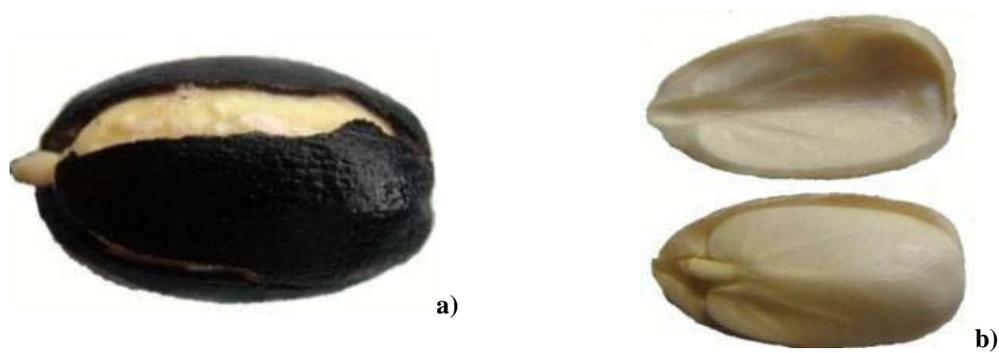


Figura 4.1. Semilla de *Jatropha curcas*. a) Semilla germinando b) Embrión y cotiledones.

## 4.2.2. Caracterización de cuatro procedencias nativas del trópico mexicano

### 4.2.2.1. Material vegetal y parámetros medidos

Se caracterizaron tres diferentes accesiones de *J. curcas* no tóxicas y sin manejo comercial procedentes de las regiones de Papantla, Medellín y Alvarado, Veracruz; y una procedencia tóxica proveniente de una plantación comercial localizada en Tecomán, Colima (Cuadro 4.1). La procedencia tóxica se usó como referente por provenir de una plantación comercial disponible. El número de semillas analizadas varió según la disponibilidad obtenida para cada recolecta (Cuadro 4.1). Las variables medidas fueron: peso total y talla de la semilla (largo, ancho y espesor); y peso del endospermo y el embrión (almendra) para submuestras de 50 semillas de las procedencias de Papantla, Alvarado y Tecomán. Las semillas fueron individualmente medidas con vernier digital Autotec (precisión 0.01mm, rango 0-150mm) y pesadas en balanza analítica Ohaus Pioneer PA64C (precisión 0.0001g, rango 0-65g).

### 4.2.2.2. Cálculo de volúmenes

El volumen de la semillas se calculó como el volumen de un elipsoide donde el largo fue L1, el ancho L2 y el espesor L3, que corresponden a los diámetros del elipsoide (Figura 4.2) y se estimó mediante la ecuación: Volumen =  $(4/3) * \pi * (L1 * L2 * L3) / 2$ .



Figura 4.2. Aproximación de la semilla de *Jatropha curcas* a un elipsoide.

### 4.2.2.3. Análisis estadístico

**Distribuciones de pesos y tallas y análisis comparativo por año de colecta.** El análisis de la distribución de pesos y tallas de semillas por recolecta se realizó mediante estadísticas básicas y ajustes de curvas normales con la prueba Chi-cuadrada ( $\chi^2$ ) para cada accesión y por año de recolecta. Para las procedencias de Papantla, Medellín y Tecomán que contaban con dos años de recolectas se realizaron pruebas de medias (prueba t) para determinar su significancia estadística. Los datos que no satisfacían condiciones de homogeneidad de varianzas o normalidad se analizaron mediante la prueba no paramétrica de Mann-Whitney. Las significancia estadística entre recolectas de diferente procedencia se realizó mediante Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía, aplicando la prueba de Kruskal-Wallis para las distribuciones anormales.

**Correlaciones pesos versus tallas.** Debido a que se localizaron semillas cuyas almendras estaban dañadas o deshidratadas y, por tanto, sus pesos eran inferiores a los de las semillas con almendras sanas, las correlaciones fueron obtenidas solamente de las semillas con almendras sanas. Para determinar la relación entre tallas y pesos se realizaron correlaciones contra valores críticos de F. Posteriormente los datos fueron comparados entre procedencias mediante pruebas ANOVA de una vía, para determinar diferencias estadísticas en pesos y tallas de los mismos.

**Cuadro 4.1.** Origen y variedad de semillas de *Jatropha curcas* de diferentes procedencias.

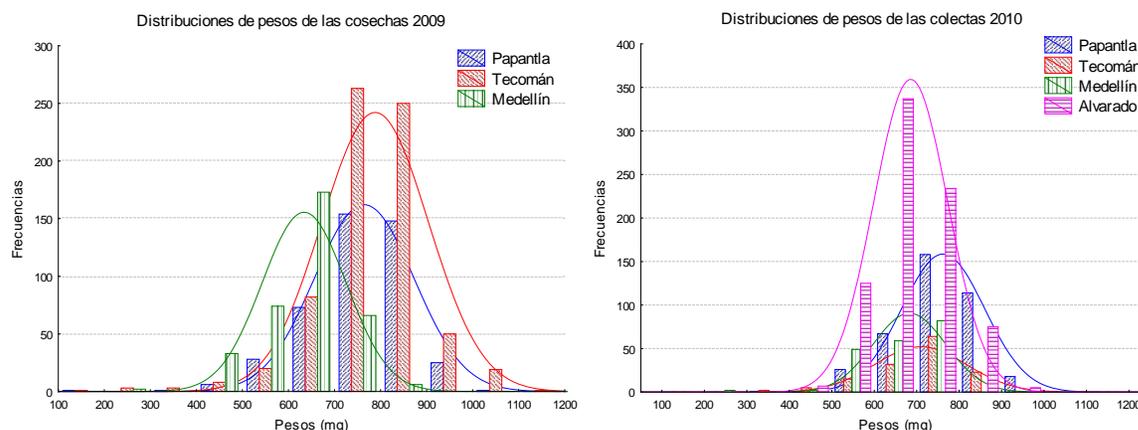
Procedencia y ubicación geográfica	Forma	Manejo	Cosecha	Cantidad
Papantla, Veracruz 20°15'17"N, 97°15'32"O; 71 msnm	No tóxica	Plantación experimental	Enero, 2009	437
			Septiembre, 2010	386
Medellín, Veracruz 18°59'52"N, 96°15'31" O; 17 msnm	No tóxica	Cerco vivo	Agosto, 2009	354
			Agosto, 2010	194
Alvarado, Veracruz 18°46'26" N, 95°45'35" O; 4 msnm	No tóxica	Cerco vivo	Agosto, 2010	828
Tecomán, Colima	Tóxica	Plantación comercial	Noviembre, 2009	700

## 4.3. Resultados y discusión

### 4.3.1. Distribuciones de pesos y tallas

**Distribuciones de pesos por procedencias y año de colecta.** Las distribuciones de pesos no fueron normales para ninguna accesión en ningún año de recolecta; ( $P < 0.05$ ); esto fue en general porque las semillas ligeras son mucho más abundantes y dispersas que las semillas pesadas (Figura 4.3 y Cuadro 4.2). Los pesos de las semillas fueron significativamente diferentes entre recolectas (Kruskal-Wallis;  $P < 0.001$ ). Las semillas de Tecomán fueron las más pesadas de todas las procedencias, pero no fueron estadísticamente similares en cada año de recolecta (Dunn;  $P = <0.05$ ), al ser menores en el 2010; siendo la recolecta 2010 estadísticamente similar a la de Papantla 2009 (Dunn;  $P > 0.05$ ). Las semillas de Papantla, se ubicaron en segundo lugar en peso, y fueron

estadísticamente similares (Mann-Whitney;  $P = 0.36$ ) en ambos años de recolecta (Figura 4.6.a). Las semillas de Alvarado y Medellín de la recolecta 2010 fueron similares entre ellas (Dunn;  $P > 0.05$ ), y éstas fueron menos pesadas que las de Papantla y Tecomán (Dunn;  $P < 0.05$ ). Las semillas de Medellín de la recolecta 2009 fueron las menos pesadas de las colectas (Dunn;  $P = <0.05$ ).

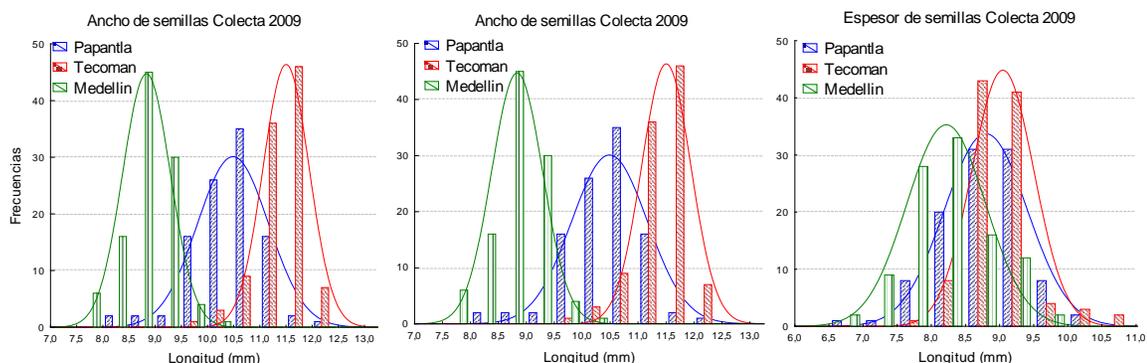


**Figura 4.3.** Distribuciones de pesos de semillas de recolectas 2009 y 2010.

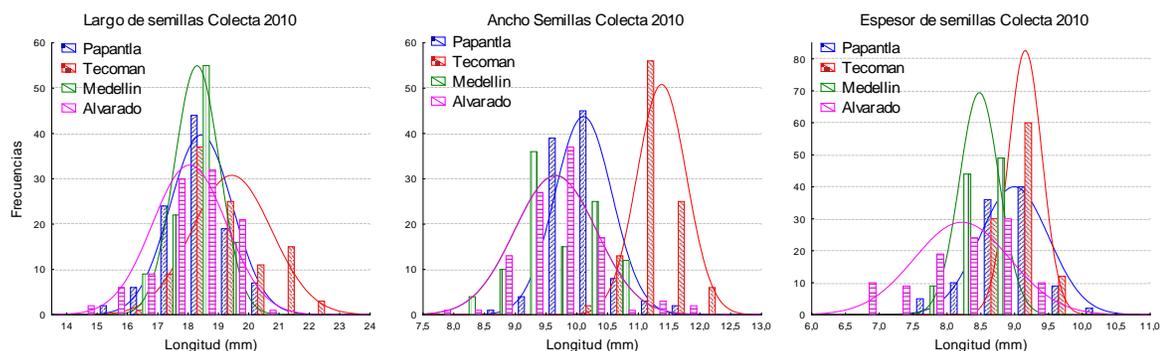
**Distribuciones de tallas por procedencias.** Las distribuciones de largo de semillas no fueron normales para las recolectas ( $\chi^2$ ;  $P < 0.05$ ), excepto para la de Medellín 2009 (Cuadro 4.2). Las semillas de diferentes procedencias fueron significativamente diferentes (Kruskal-Wallis;  $P < 0.001$ ). Las semillas más largas correspondieron a las recolectas de Tecomán del 2009 y 2010, similares en ambos años (Mann-Whitney;  $P = 0.5$ ) y Papantla 2009 y 2010, también estadísticamente similares en ambos años (Mann-Whitney;  $P = 0.055$ ) (Figuras 4.4, 4.5 y 4.6). La recolecta de Alvarado 2010 presentó una longitud menor a Tecomán 2010, pero similar a la de Papantla (Dunn;  $P > 0.05$ ). Las recolectas de Medellín 2009 y 2010, que no fueron similares estadísticamente (Dunn;  $P < 0.05$ ), fueron las menos largas.

Los anchos de las semillas fueron normales solo para las recolectas de Medellín 2009 y Papantla 2010 ( $\chi^2$ ;  $P > 0.05$ ); y fueron significativamente diferentes entre procedencias (Kruskal-Wallis;  $P < 0.001$ ). La recolecta de Tecomán 2010 fue la que presentó las semillas más anchas (Dunn;  $P < 0.05$ ), aunque fue similar a la de 2009 (Dunn;  $P > 0.05$ ). Las semillas de Papantla fueron medianas en ancho y estadísticamente similares en ambos años (Dunn;  $P > 0.05$ ). Las semillas de Medellín y Alvarado fueron las más angostas, siendo la recolecta 2009 de Medellín las más angostas de todas. Las relaciones entre ancho y largo de las semillas solo fueron similares para las recolectas anuales de Papantla (Dunn;  $P > 0.05$ ). Las demás procedencias tuvieron relaciones ancho:largo diferentes entre años de recolecta (Dunn;  $P < 0.05$ ), aunque el ancho/largo fue similar entre las de Tecoman 2009 y Alvarado 2010 (Dunn;  $P > 0.05$ ), y se mantiene un promedio general de un ancho entre 49-61% del largo total de la semilla (Cuadro 4.2).

Los espesores de las semillas fueron normales solo para las recolectas de Papantla 2009 y 2010, las cuales fueron similares estadísticamente (Cuadro 4.2). Las demás recolectas tuvieron distribuciones anormales. Los espesores de las semillas fueron diferentes entre recolectas (Kruskal-Wallis;  $P < 0.001$ ). Las semillas con mayor espesor fueron las de Tecoman 2009 y 2010 y las de Papantla 2010. Las semillas con menor espesor fueron las de Medellín 2009 y 2010 y Alvarado 2010, éstas últimas similares estadísticamente (Dunn;  $P > 0.05$ ). La relación de espesor:largo varió entre procedencias y años de recolecta (Kruskal-Wallis;  $P < 0.001$ ); pero se mantuvo un rango promedio de espesor entre 46.5-49.0 % del largo total de la semillas, valor ligeramente menor que el ancho.



**Figura 4.4.** Distribución de largo, ancho y espesor de las semillas de las recolectas 2009.

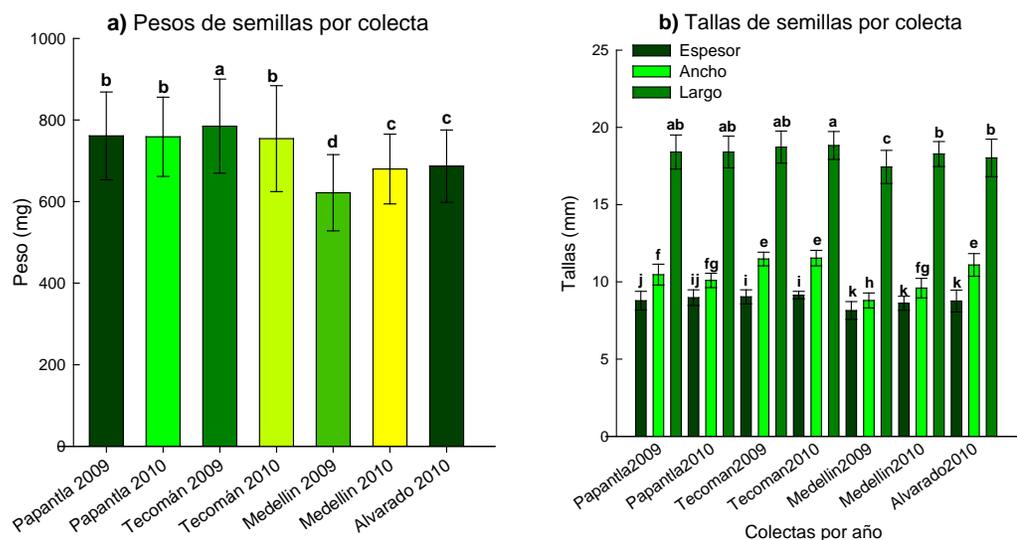


**Figura 4.5.** Distribución de largo, ancho y espesor de las semillas de las recolectas 2010.

El volumen de las semillas fue diferente para cada procedencia (Kruskal-Wallis;  $P = <0.001$ ). Las semillas de Tecomán, similares en ambas recolectas ( $t$ ;  $P = 0.4$ ), presentaron los mayores volúmenes (Dunn;  $P < 0.05$ ), seguidas por las semillas de Alvarado y Papantla, estadísticamente similares (Dunn;  $P > 0.05$ ); y posteriormente las semillas de Medellín, con el menor volumen en la recolecta del 2009. Estas similitudes fueron consistentes con las tallas tomadas por separado.

**Cuadro 4.2.** Estadísticas básicas de las procedencias recolectadas.

Parámetros	Papanla		Medellín		Alvarado	Tecomán	
	2009	2010	2009	2010	2010	2009	2010
P							
P distribución normal	0.0003	0.0141	0.0000	0.0000	0.0007	0.0000	0.0003
e Coeficiente de asimetría	-0.850	-0.459	-0.287	-1.296	0.208	-0.950	-0.418
s							
Mínimo y máximo (mg)	194-1018	396-1042	409-879	264-800	401-973	116-1111	255-1111
o 25% - 75%	700-834	704-826	572-690	600-738	625-750	735-847	697-815
o Promedio $\pm$ • (mg)	761 $\pm$ 107	758 $\pm$ 97	622 $\pm$ 93	679 $\pm$ 85	686 $\pm$ 89	786 $\pm$ 115	706 $\pm$ 108
L							
P distribución normal	0.0047	0.0003	0.8535	0.0495	0.0000	0.0000	0.0495
a Coeficiente de asimetría	-0.302	-0.296	-0.250	-0.229	-0.731	0.536	0.622
r							
Mínimo y máximo (mm)	14.9-21.1	11-21.0	14.8-19.9	16.2-20.2	13.8-20.8	15.4-22.6	14.5-21.8
g 25% - 75%	17.8-19.1	17.8-19.1	16.9-18.4	17.9-18.9	17.7-19.2	18.1-19.2	18.2-19.3
o Promedio $\pm$ • (mm)	18.4 $\pm$ 1.1	18.4 $\pm$ 1.0	17.6 $\pm$ 1.1	18.3 $\pm$ 0.8	18.0 $\pm$ 1.2	18.7 $\pm$ 1.0	18.8 $\pm$ 0.9
A							
P distribución normal	0.0000	0.06393	0.18261	0.00001	0.0000	0.0000	0.00131
n Coeficiente de asimetría	-0.0890	-0.295	0.133	0.0583	0.632	0.0628	-1.555
c							
Mínimo y máximo (mm)	8.9-12.2	8.5-12.6	7.7-10.3	8.2-10.9	7.3-12.1	8.3-12.5	8.3-12.4
h 25% - 75%	10.2-11.1	10.2-11.0	8.6-9.1	9.1-10.3	9.14-9.97	9.2-11.4	11.1-11.6
o Promedio $\pm$ • (mm)	10.5 $\pm$ 0.7	10.4 $\pm$ 0.5	8.9 $\pm$ 0.5	9.6 $\pm$ 0.7	11.1 $\pm$ 0.64	11.5 $\pm$ 0.4	11.5 $\pm$ 0.5
E							
P distribución normal	0.1701	0.1429	0.0684	0.0059	0.0056	0.0043	0.0345
s Coeficiente de asimetría	-0.402	-0.121	1.402	0.719	0.225	-0.673	-0.530
P							
Mínimo y máximo (mm)	6.8-10.1	7.6-10.5	8-10.7	8.7-9.9	6.9-9.6	7.5-8.9	6.7-9.3
e 25% - 75%	8.3-9.2	8.7-9.3	8.8-9.2	9.0-9.3	7.8-8.5	8.3-8.7	7.7-8.8
s							
o Promedio $\pm$ • (mm)	8.8 $\pm$ 0.6	9.0 $\pm$ 0.5	9.0 $\pm$ 0.5	9.1 $\pm$ 0.3	8.2 $\pm$ 0.6	8.5 $\pm$ 0.3	8.2 $\pm$ 0.7
r							
Volumen promedio $\pm$ • (cm)	3.6 $\pm$ 0.6	3.5 $\pm$ 0.4	2.7 $\pm$ 0.5	3.2 $\pm$ 0.5	3.7 $\pm$ 0.7	4.0 $\pm$ 0.5	4.0 $\pm$ 0.5
% Promedio Ancho-Largo <sup>-1</sup>	57.8	57.5	49.7	52.4	55.7	54.6	60.6
% Promedio Espesor-Largo <sup>-1</sup>	47.8	49.2	48.3	47.7	46.5	47.1	48.2

**Figura 4.6.** Pesos y tallas promedio de semillas ( $\pm$ •) por colecta. Barras con diferente letra son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).

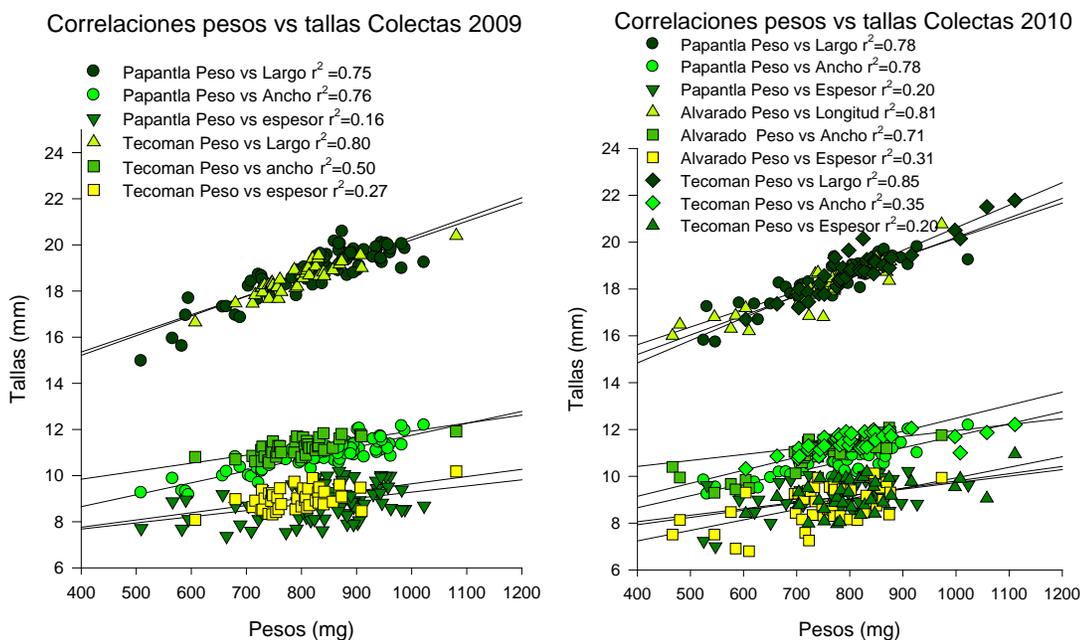
**Análisis de correlación pesos versus tallas.** Las correlaciones de los pesos *versus* tallas de todas las recolectas de semillas tuvieron una distribución normal ( $P > 0.05$ ). Se registró una relación significativa positiva entre pesos *versus* largos, anchos y espesores ( $F$ ;  $P < 0.01$ ) (Cuadro 4.3). Las dependencias de peso contra largo y ancho de semillas fueron similares en las procedencias de

Papantla, pero diferentes con las procedencias de Alvarado y Tecomán (Cuadro 4.3 y Figura 4.7). Esto indica que las semillas más pesadas tienden a ser más largas en todas las procedencias; pero el ancho y el espesor de las semillas varían dependiendo de la procedencia.

**Cuadro 4.3.** Análisis de correlación de pesos *versus* tallas para la Hipótesis nula  $H_0: \rho=0$ .

Colecta Año	Papantla						Alvarado			Tecomán					
	2009			2010			2010			2009		2010			
Pesos versus	LA*	AN*	ES*	LA	AN	ES	LA	AN	ES	LA	AN	ES	LA	AN	ES
P	0.20	0.73	0.05	0.16	0.20	0.69	0.22	0.32	0.13	0.32	0.57	0.16	0.07	0.48	0.46
distribuc normal	0.75	0.76	0.16	0.78	0.78	0.20	0.81	0.71	0.31	0.80	0.50	0.27	0.85	0.35	0.20
$r^2$	224.8	235.1	14.2	141.6	145.2	10.0	179.5	101.5	19.60	159.8	40.68	14.9	212.4	24.0	9.5
F	P < 0.01	P < 0.01	P < 0.01	P < 0.01	P < 0.01	P = 0.003	P < 0.01	P < 0.01	P < 0.01	P < 0.01	P < 0.01	P < 0.01	P < 0.01	P < 0.01	P < 0.01
$P(\rho=0)$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.003	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.004

LA\*= Largo      AN\*= Ancho      ES\*= Espesor



**Figura 4.7.** Regresiones pesos *versus* tallas de semillas recolectas 2009 y 2010.

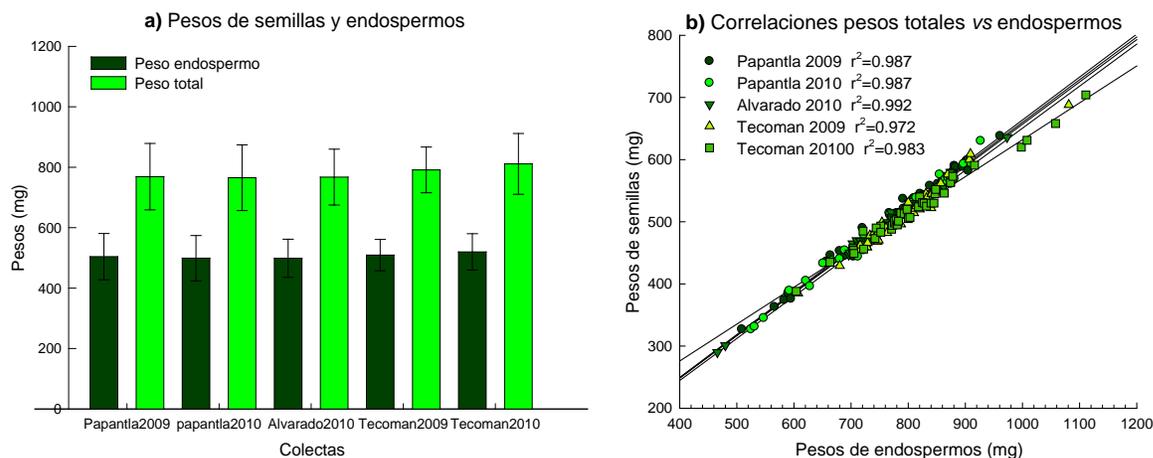
**Análisis de las almendras.** Los pesos de los almendras fueron estadísticamente similares en todas las recolectas analizadas (Kruskal-Wallis;  $P = 0.909$ ). Entre el 25% al 75% de los pesos se ubicaron entre 450 y 540 mg. Los pesos totales de las muestras también fueron estadísticamente similares (Kruskal-Wallis;  $P = 0.589$ ). Todas las correlaciones tuvieron una distribución normal y mostraron un alto coeficiente de determinación, con  $r^2$ 's superiores a 0.97 entre los pesos de las almendras y los pesos totales de las semillas (Cuadro 4.4 y Figura 4.8). Es importante notar que, aunque la selección de las semillas fue aleatoria, se encontró que las semillas de tallas muy pequeñas o muy grandes poseían almendras dañadas. Así, que las almendras sanas probablemente correspondieron a las tallas que conservaron mejor su estado, independientemente de su procedencia. El porcentaje de

peso promedio de las almendras osciló entre el 64.1% hasta el 65.6% del peso total de la semilla. Los porcentajes menores, aunque no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ), corresponden a las procedencias de Tecomán, que se distinguieron por poseer las semillas más pesadas y largas de todas las recolectas, y en ellas se observó una ligera disminución del peso de la almendra en las semillas de mayor tamaño (Figura 4.8.b). Los porcentajes de peso de las almendras tuvieron rangos similares a los reportados por Martínez *et al.* (2010) para semillas procedentes de Guerrero, Michoacán, Morelos y Veracruz, que incluyen semillas tóxicas y no tóxicas. Aunque en otras recolectas de Veracruz y Morelos, los porcentajes son ligeramente mayores Martínez *et al.* (2006), los autores no mencionan el manejo agronómico que recibieron dichas procedencias.

**Cuadro 4.4.** Estadísticas de pesos de semillas y endospermos de tres procedencias.

Colecta Año Parámetro	Papantla				Alvarado		Tecomán			
	2009		2010		2010		2009		2010	
	PT*	PE	PT	PE	PT	PE	PT	PE	PT	PE
Mínimo- Máximo	509-961	327-638	525-927	327-630	466-973	290-636	604-1081	385-688	604-1111	388-704
25%-75%	704-860	453-565	693-854	446-557	724-828	539-469	745-830	533-475	752-795	542-489
Promedio ± •	768.8 ±109.9	504.1 ±76.4	765.2 ± 108.8	498.9 ± 75.1	767.25 ± 92.4	498.7 ± 63.1	791.1 ± 75.6	509.2 ± 51.8	811.0 ± 100.5	519.9 ± 60.1
Porcentaje del PT		65.58		65.20		65.00		64.40		64.10

\*PT=Peso total de la semilla (en mg) PE= Peso del endospermo (en mg)



**Figura 4.8.** Pesos promedio ( $\pm \bullet$ ) de semilla y endospermo por recolecta.

a) Pesos totales de semillas y endospermos. b) Regresiones de pesos totales *versus* pesos de endospermos.

#### 4.3.2. Relaciones agroecológicas entre las recolectas

El Cuadro 4.5 muestra condiciones agroecológicas de las procedencias recolectadas. Las semillas de Tecomán son producto de manejo agronómico comercial, recibieron riego (aproximadamente 5.5 litros por planta diarios) y fertilización con agroquímicos similares durante ambos años, lo que pareció afectar positivamente el peso y talla de las semillas. Sin embargo, disminuyeron el segundo

año de recolecta. Al respecto, el productor reportó que en el 2010, por problemas logísticos, colectó frutos verdes y secos al mismo tiempo, por lo que algunas semillas aun no alcanzaban su madurez plena y este factor pudo haber influido en la diferencia de pesos. Es probable que de haberse recolectado solo frutos maduros y secos no existieran diferencias estadísticas entre cosechas, puesto que las tallas y volúmenes de las semillas fueron significativamente similares, lo que indica que la maduración de la semilla influyó en su peso final. Las procedencias de Papantla, aunque no tuvieron riego ni fertilización, provienen de frutos maduros, y se mantuvieron uniformes en pesos y tallas en ambos años, con valores promedio de solo 4% inferiores a los de las semillas de Tecoman, por lo que se puede considerar que sus rendimientos fueron mejores que los de las semillas comerciales. Las semillas de Alvarado y Medellín, que tampoco tuvieron manejo, se encuentran en el mismo clima cálido subhúmedo; pero en suelos tipo arenosos, que son bajos en nutrientes y no retienen tanta humedad (Valdés *et al.*, 2011b) como los suelos franco-arenosos, donde se encuentran las procedencias de Papantla. Por lo que es probable que estos factores incidieran sobre pesos y tamaños inferiores de semillas en estas últimas procedencias. Al respecto, Martínez *et al.* (2006) reportaron semillas más ligeras y pequeñas en sitios con menor precipitación, comparados contra sitios con mayor precipitación pluvial. Debido a esto se puede considerar que los factores ambientales pueden combinarse con los factores genéticos para influir en las procedencias de *J. curcas* en diferentes regiones, tal como lo establecen Namkoong *et al.* (1988) en sus estudios genético ambientales.

**Cuadro 4.5.** Tipos de suelo y manejos de las procedencias analizadas en relación con los pesos y tallas de las semillas de *Jatropha curcas* obtenidas.

Procedencia	Suelo	Clima	Manejo	Pesos y tallas referidos a Tecomán
Tecomán	Franco-arenoso	Semiseco	Riego y fertilización	Máximos: 100 %
Papantla	Franco-arenoso	Cálido subhúmedo	Sin manejo	Altos: 96 %
Alvarado	Arenoso	Calido subhúmedo	Sin manejo	Medios: 88%
Medellín	Arenoso	Cálido subhúmedo	Sin manejo	Medios: 80%

Comparadas con semillas de recolectas tóxicas y no tóxicas realizadas por Makkar *et al.* (1998), Martínez *et al.* (2006 y 2010) y Makkar *et al.* (2008), provenientes de otros sitios del estado de Veracruz y otros estados de la república, los pesos y tallas de las procedencias analizadas en esta investigación se mantuvieron dentro de los rangos encontrados por estos autores (450-800 mg y 15-18.7 mm de largo) (Cuadro 4.6). Un sitio de colecta: Pueblillo, Veracruz, coincide con una accesión analizada en este estudio: Papantla. En estas procedencias se observa que sus pesos y tallas de semillas y sus almendras se encuentran dentro del rango promedio  $\pm$  •. Aunque los autores no indicaron el manejo de las procedencias, se dedujo que el método de cosecha fue similar en ambos casos, por lo que se puede considerar que las procedencias de Papantla se encuentran relacionadas genética y ambientalmente y por lo tanto, estos parámetros podrían incidir en su alometría.

**Cuadro 4.6.** Promedios ( $\pm$ ) de pesos y tallas de semillas de *Jatropha curcas* reportadas para recolectas en otros sitios del país.

Procedencia	Genotipo	Peso total (mg)	Peso de la almendra (mg)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Fuente
Sacxan, Quintana Roo	No tóxica	600	394	-	-	Makkar <i>et al.</i> 1998
Sergio Butrón, Quintana Roo	No tóxica	620	391	-	-	Makkar <i>et al.</i> 1998
Pueblillo, Veracruz	No tóxica	720 $\pm$ 70	490 $\pm$ 40	18.0 $\pm$ 0.95	9.5 $\pm$ 0.73	Martínez <i>et al.</i> , 2006
Pueblillo, Veracruz	No tóxica	730 $\pm$ 90	470 $\pm$ 65	-	-	Makkar <i>et al.</i> 2008
C. de Teayo, Veracruz	No tóxica	640 $\pm$ 70	430 $\pm$ 50	17.0 $\pm$ 0.96	8.4 $\pm$ 0.38	Martínez <i>et al.</i> , 2006
Yautepec, Morelos	No tóxica	448 $\pm$ 60	310 $\pm$ 30	15 $\pm$ 0.79	7.6 $\pm$ 0.45	Martínez <i>et al.</i> , 2006
Huitzilán, Puebla	No tóxica	680	455	-	-	Martínez <i>et al.</i> , 2010
Suchiapa, Chiapas	Tóxica	830	618	-	-	Martínez <i>et al.</i> , 2010
Coatzacoalcos, Veracruz	Tóxica	800 $\pm$ 99	490 $\pm$ 71	-	-	Makkar <i>et al.</i> 2008
Tlaxmalac, Guerrero	Tóxica	730	450	-	-	Martínez <i>et al.</i> , 2010

#### 4.4. Conclusiones

Las semillas de *Jatropha curcas* presentaron una variación amplia en sus pesos y tallas inter e intra procedencias, que puede ser un criterio para el mejoramiento genético y las prácticas de manejo. Se encontró una alta dependencia entre el largo de las semillas y su peso total, así como entre el peso total y el peso del endospermo, por lo que estas características se pueden considerar como atributos deseables en las semillas de esta especie. El análisis comparativo con otros estudios muestra también altas variaciones en peso y tamaño, tanto en semillas tóxicas como no tóxicas, por lo que no se puede inferir que exista manera de diferenciar a las mismas por su peso o morfología. Sin embargo, sí se puede considerar que semillas provenientes de procedencias con un manejo consistente y suelos franco-arenosos, como es el caso de Papantla, produjeron semillas estadísticamente similares en peso y tamaño, a diferencia de las semillas en suelos arenosos, como las de Alvarado y Medellín, que fueron menores y con mayor variación. Por tanto, se concluye que un manejo apropiado, que incluya riego y fertilización, aunados a buenas prácticas de cosecha, puede incidir en la homogeneidad de las tallas y en la obtención de semillas más pesadas y con mayor viabilidad.

## V. Germinación y sobrevivencia de *Jatropha curcas*: su relación con el peso de la semilla y los sustratos

### 5.1. Introducción

La reproducción de *Jatropha curcas* L. se puede practicar tanto de manera sexual (por semillas) como asexual (por esquejes). Las investigaciones sobre esta especie indican que plantas propagadas por semillas tienen una mayor longevidad y mayor resistencia a enfermedades que plantas propagadas por esquejes (Heller, 1996). Otro aspecto a considerar es la capacidad de *J. curcas* para polinizarse abiertamente (Chang-wei *et al.*, 2007). Por lo que las plántulas procedentes de semillas brindan una mayor diversidad genética, importante para la preservación de la especie. Adicionalmente, los patrones de crecimiento y arquitectura naturales de la planta, en especial de su sistema de raíces, sólo se aprecian en individuos procedentes de semillas. Sin embargo, cuando se establecen cultivos mediante semillas se debe considerar su calidad, la cual se relaciona con el rendimiento del producto final (Pérez *et al.* 2006). Dentro de las cualidades físicas, el tamaño y peso de las semillas es determinante en su germinación, persistencia en el suelo y posteriormente el establecimiento y la salud de la planta (Seiwa, 2000). *J. curcas* es un cultivo en fase de desarrollo y de reciente establecimiento comercial, por lo que se carece de datos científicos relacionados con pesos y tamaños de semillas y sus porcentajes de germinación y vigor de las plántulas. Aunque existen experiencias empíricas de productores que recomiendan el uso de las semillas más pesadas de una colecta, como las mejores para la siembra (Alfonso, 2008; AEA, 2010). Otro factor significativo para la germinación de una semilla y el buen establecimiento de la plántula en el campo es el sustrato. Para el caso de *J. curcas* existen estudios publicados que relacionan porcentajes de germinación y sobrevivencia en diversos sustratos (Cuadro 5.1). En ellos se aprecia que el sustrato más usado y recomendado ha sido el arenoso; por obtenerse en él las mayores tasas de germinación (Jepsen *et al.*, 2008; Díaz y Campos, 2009). Sin embargo, no existen estudios sobre germinación en suelo franco y arcilloso. Estos estudios son importantes porque permitirían evaluar el establecimiento de las plántulas directamente en los suelos donde se planea su producción comercial; como es el caso de los suelos tropicales existentes en el estado de Veracruz (Medina *et al.*, 2010). Por lo tanto, en esta investigación se reportan los efectos de los pesos de las semillas y diferentes tipos de sustratos de la región en la germinación y sobrevivencia de plántulas de *J. curcas* no tóxicas procedentes del estado de Veracruz.

**Cuadro 5.1.** Porcentajes de germinación relacionados con los sustratos.

Sustratos	Proporción	Germinación	Referencia
Arena	1	93%	Jepsen <i>et al.</i> (2008)
Composta y arena	1:1	40%	Jepsen <i>et al.</i> (2008)
Arena	1	100%	Díaz y Campos (2009)
Aserrín	1	100%	Díaz y Campos (2009)
Arena-composta-suelo	2:2:1	80 - 90 %	Swamy y Singh (2006)
Tierra negra y gallinaza	3:1	87%	Biocombustibles de Guatemala (2008)

### 5.1.2. Objetivos

- Determinar los efectos del sustrato y el peso de las semillas en los porcentajes de germinación y sobrevivencia de las plántulas de *Jatropha curcas*.
- Determinar si la interacción del sustrato y el peso de la semilla inciden sobre la germinación y sobrevivencia de la plántula.

### 5.1.3. Hipótesis

El peso de las semillas de *Jatropha curcas* y el tipo de sustrato están relacionados con la germinación y el vigor de las plántulas.

## 5.2. Materiales y métodos

Se implementaron tres experimentos independientes. El primero para evaluar solamente efectos de los sustratos sobre germinación y sobrevivencia de semillas, y los dos subsecuentes para evaluar el peso de las semillas y los sustratos sobre germinación y crecimiento de plántulas.

### 5.2.1. Selección del material biológico, siembra y registro de variables

#### 5.2.1.1. Material vegetal

Las semillas de *J. curcas* utilizadas procedieron de accesiones no tóxicas nativas de las regiones de: Papantla (20°15'17" N, 97°15'32" O; 71 msnm), recolecta de Octubre del 2009; Alvarado (18° 46'26" N, 95°45'35" O; 4 msnm), recolecta de Agosto 2010; y Medellín (18° 59'52" N, 96° 15'31" O; 17 msnm), recolecta de Julio 2010. Las distribuciones de los pesos y las tallas de estas accesiones se presentaron en el capítulo IV. Las semillas cuyos pesos se encontraron dentro de los rangos de mayores frecuencias fueron seleccionadas para los experimentos.

#### 5.2.1.2. Siembra y registro de condiciones ambientales

Las semillas, sin tratamiento antibacterial o fungicida, se colocaron dentro de un recipiente con agua, donde permanecieron 8 horas, y posteriormente se extrajeron para ser enterradas en posición vertical con la carúncula hacia abajo, a una profundidad equivalente a su longitud (2 cm aprox.). Se

aplicaron riegos diarios para mantener las semillas hidratadas, dependiendo del sustrato, evitando humedad excesiva. La temperatura y humedad ambiental se registraron diariamente con estación meteorológica Skywatch Geos No 11.

#### **5.2.1.2. Registro de germinación y sobrevivencia**

El conteo de la germinación y sobrevivencia se hizo diariamente durante 25 días después de la siembra y 30 días posteriores a la germinación, respectivamente. Los porcentajes de germinación y sobrevivencia se estimaron de acuerdo con la ecuación 5.1 y 5.2, respectivamente.

$$\text{Germinación (\%)} = 100 \times (\text{Número de semillas germinadas} / \text{Número de semillas sembradas}) \quad (5.1)$$

$$\text{Sobrevivencia (\%)} = 100 \times (\text{Número de plántulas a los 30 días} / \text{Número de plántulas germinadas}) \quad (5.2)$$

La velocidad de germinación se evaluó conforme al índice de velocidad de germinación (IVG):

$$\text{IVG} = \sum (n_i / t_i) \quad (5.3)$$

Donde:  $n_i$  = número de semillas germinadas el  $i$ -ésimo día.

$t_i$  = tiempo en días para la germinación al  $i$ -ésimo día.

#### **5.2.2. Germinación y sobrevivencia en tres diferentes sustratos**

Se realizaron dos experimentos: el primero, denominado Otoño-2009, se efectuó en Septiembre del 2009 y el segundo, denominado Verano-2010, se efectuó en Julio del 2010. Ambos bajo condiciones ambientales naturales del sitio Veracruz ([Apéndice C.2](#)). La procedencia de las semillas y las condiciones ambientales registradas durante los experimentos se muestran en el [Cuadro 5.2](#).

##### **5.2.2.1. Selección de los sustratos**

Con base en sus diferencias granulométricas se evaluaron tres sustratos: Arenoso, Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso ([Apéndice A.2](#)). La determinación de las propiedades físicas y químicas de los sustratos se muestra en [Apéndice A, Cuadro A.2](#).

##### **5.2.2.2. Diseño experimental y condiciones especiales**

El diseño experimental fue completamente al azar, con tres niveles del factor sustrato: arenoso, franco-arenoso y franco-arcilloso. En cada experimento (Otoño-2009 y Verano-2010) se colocaron 112 semillas por sustrato, con una distancia entre semilla de aproximadamente 4 cm, formando hileras para su fácil conteo. Los sustratos se ubicaron en seis cajas de madera de 45 cm de largo por 30 cm de ancho y profundidad aproximada de 10 cm. Por cada sustrato se realizaron dos repeticiones.

### **5.2.3. Germinación en relación con categorías de peso de las semillas**

Este experimento se realizó en el Sitio Colpos, bajo condiciones ambientales naturales de la región (Apéndice C.1), iniciando el 1° de Mayo del 2010. El Cuadro 5.2 muestra la procedencia y categorías de pesos de semillas utilizadas, y las condiciones ambientales registradas durante el experimento.

#### **5.2.3.1. Selección del sustrato**

Un sustrato consistente en una mezcla de arena y composta de cachaza de caña (Apéndice A.2. Compost) en proporción 2:1 se utilizó en este experimento. Se utilizó una proporción mayor de arena para tener tasas de germinación mayores a las reportadas en la literatura (Cuadro 5.1).

#### **5.2.3.2. Diseño experimental y condiciones especiales**

El experimento consistió en un diseño completamente aleatorio, con el factor peso de semilla en cuatro categorías: 400-499 mg, 500-599 mg, 600-699 mg y 700-799 mg, y 51 semillas por categoría. Se sembró una semilla por bolsa de polietileno de 30 cm altura x 15 cm diámetro.

### **5.2.4. Germinación en relación con el peso de la semilla y el sustrato**

Este experimento se llevó a cabo en el sitio Colpos (Apéndice C.1), iniciando el 10 de Octubre del 2010. El experimento se colocó dentro de un invernadero de 3x3x2 m, abierto en los extremos este y oeste. El Cuadro 5.2 resume las condiciones ambientales y el material vegetal utilizado.

#### **5.2.4.1. Selección de los sustratos**

Con el objetivo de evaluar el efecto del contenido nutricional del sustrato sobre la germinación de las plántulas se eligieron dos sustratos con diferencias marcadas en estas características. Arena combinada con sustrato franco-arenoso en proporción (1:1), bajo en N y P; y composta de cachaza de caña al 100% (Compost), alto en N y P (Apéndice A, Cuadro A.2).

#### **5.2.4.2. Diseño experimental y consideraciones**

El diseño utilizado fue completamente aleatorio con dos factores: el peso de las semillas, con cuatro niveles: 500-599 mg, 600-699 mg, 700-799 y 800-899 mg; y el sustrato, con dos niveles: arena+franco-arenoso (Ar-Fr-Ar) y composta de cachaza de caña al 100% (Compost). Un total de 32 semillas por categoría de peso y sustrato se sembraron a razón de una semilla por bolsa de polietileno de 30 cm de altura por 15 cm de diámetro, llenas con el sustrato correspondiente.

### **5.2.5. Análisis estadísticos**

Las curvas y tasas de germinación obtenidas se analizaron mediante pruebas ANOVAs de una vía para pesos y sustratos por separado, aplicando el método no paramétrico de Kruskal-Wallis para

distribuciones anormales; con pruebas de muestras pareadas usando el método de Tukey, para determinar diferencias entre sustratos; y Dunn, para determinar diferencias entre categorías de pesos de semillas; ambos con un nivel de confianza del 95%. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa SigmaPlot versión 10.0.

**Cuadro 5.2.** Experimentos realizados para estudiar efectos de sustratos y pesos de semillas sobre germinación

Experimento y periodo	Sustratos	Pesos de las semillas (mg)	Procedencia y cosecha de las semillas	Condiciones ambientales		
				T Mínima °C	T Máxima °C	% Humedad relativa
<b>Otoño-2009</b> Sep.-Oct. 2009	- Arenoso	750±50	Papantla Cosecha: Marzo, 2009	23.0 ± 2.16	31.83 ± 2.56	63.78 ± 9.31
	- Franco-arenoso					
<b>Verano-2010</b> Jul.-Ago. 2010	- Franco-arcilloso	650±50	Alvarado Cosecha: Octubre, 2009	24.60 ± 1.07	30.3 ± 1.70	83.88 ± 6.62
<b>Mayo-2010</b> May.-Jun.2010	Arena + Compost (2:1)	400-499; 500-599; 600-699; 700-799	Medellín Cosecha: Julio 2009	23.7 ± 1.4	34.4 ± 1.9	74.8 ± 5.9
<b>Octubre- 2010</b> Oct.-Nov. 2010	-Arenoso+franco-arenoso -Compost	500-599; 600-699; 700-799; 800-899	Alvarado Cosecha: Agosto 2010	19.81 ± 1.1	30.24 ± 1.5	71.5 ± 7.1

### 5.3. Resultados y discusión

#### 5.3.1. Germinación y sobrevivencia en diferentes sustratos

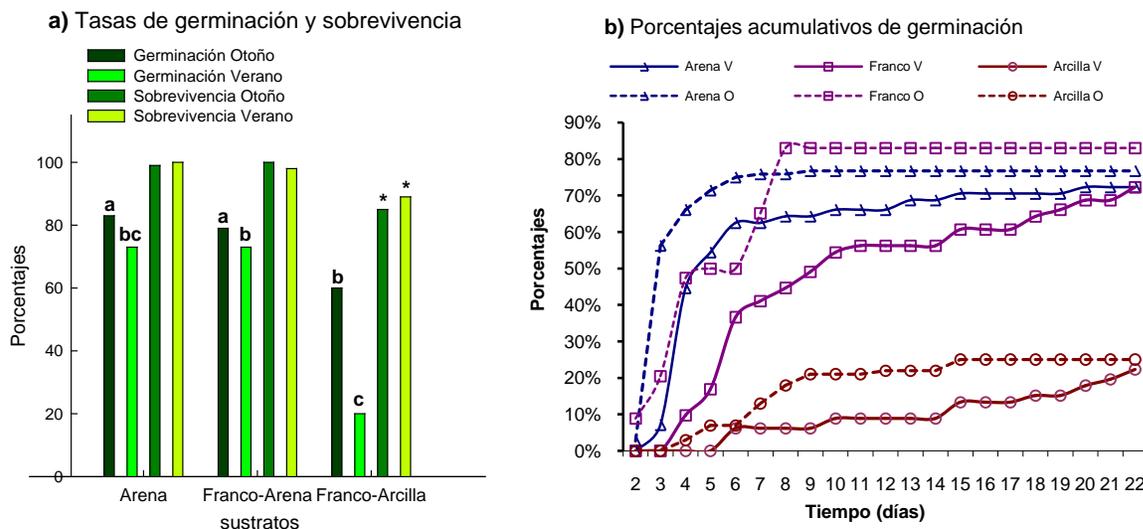
Los porcentajes de germinación revelaron diferencias significativas entre sustratos (Holm-Sidak;  $P < 0.05$ ) en ambos experimentos: Otoño-2009 y Verano-2010. Las tasas de germinación mayores ocurrieron en Otoño-2009, en sustratos arenoso y franco-arenoso; decreciendo significativamente en el franco-arcilloso (Tukey;  $P < 0.05$ ), y de forma similar en Verano-2010 (Cuadro 5.3). Estos resultados concuerdan con lo reportado en el Cuadro 5.1, que compara germinación en diferentes sustratos. La velocidad de germinación estimada mediante el IVG fue mayor para las semillas en sustratos arenosos y franco-arenosos, que en el sustrato franco-arcilloso. (Figura 5.1.b). En Verano-2010 se registró una ligera disminución en las tasas de germinación respecto a Otoño-2009. Las condiciones climatológicas no indicaron diferencias significativas en temperaturas, aunque sí un mayor porcentaje de humedad en el ambiente durante el experimento Verano-2010 (Cuadro 5.2). Al respecto, Kahl *et al.* (2008) y Bautista (2010) reportan que la tasa de germinación en *J. curcas* decrece ante el exceso de humedad y conforme el tiempo de almacenaje de las semillas; por lo que es posible que germinaran más semillas en Otoño-2009 debido a una menor humedad ambiental, y a que éstas tenían tres meses menos de almacenamiento, comparadas con las semillas utilizadas en Verano-2010. Por lo que respecta a los sustratos, los arenosos y franco-arenosos se caracterizan por tener poros mayores, que proveen mayor aireación y drenan mejor el exceso de agua (Aguilera y

Martínez, 1996) y, de acuerdo con el análisis de suelo (Apéndice A, Cuadro A.2), los niveles de materia orgánica fueron también menores comparados con el sustrato franco-arcilloso. Por lo que niveles de aireación mayores y sustratos pobres en nutrientes se asociaron con tasas de germinación más altas. La sobrevivencia de las plántulas también fue mayor en los sustratos arenosos y franco-arenosos, comparada con los franco-arcillosos (Tukey;  $P < 0.05$ ). Las plántulas que no sobrevivieron presentaron síntomas de pudrición, que fueron más evidentes en el sustrato franco-arcilloso. De estos resultados se puede considerar que las semillas fueron afectadas de manera negativa por el exceso de humedad y sustratos ricos en nutrientes durante su germinación. Esta situación es congruente con lo reportado por Biocombustibles de Guatemala (2008), Díaz y Campos (2009), Ouwens *et al.* (2007) y Valdés *et al.* (2011c), que indican que las semillas y plántulas recién germinadas de *J. curcas* no toleran niveles excesivos de humedad.

**Cuadro 5.3.** Porcentajes de germinación en tres diferentes sustratos en Otoño-2009 y Verano-2010.

Tratamiento sustrato	Estación	IVG	% de germinación	% de sobrevivencia
Arena	Otoño 2009	177	77 a	99 a
Franco-Arenoso	Otoño 2009	159	83 a	100 a
Franco-Arcilloso	Otoño 2009	30	25 c	85 b
Arena	Verano 2010	133	72 bc	100 a
Franco-Arenoso	Verano 2010	91	72 b	98 a
Franco-Arcilloso	Verano 2010	16	22 d	89 b

<sup>a, b, c</sup> Letras diferentes indican diferencias significativas con  $\alpha = 5\%$ .



**Figura 5.1.** Tasas y curvas de germinación de semillas de *Jatropha curcas*.

**a)** Tasas de germinación y sobrevivencia en tres sustratos y dos estaciones. **b)** Curvas de germinación en sustratos Arenoso, Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso durante verano 2011 (V) y Otoño-2009 (O).

### 5.3.2. Germinación en relación con categorías de peso de las semillas

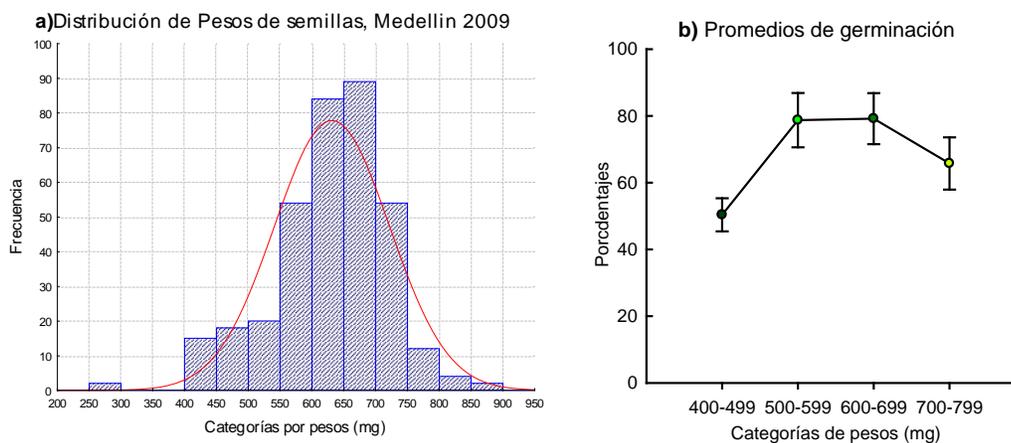
Las curvas de germinación por categorías de peso de semillas del experimento Mayo-2010 mostraron diferencias significativas (Tukey;  $P = 0.002$ ) entre categorías de pesos. Semillas con peso

menor a 500 mg mostraron las tasas de germinación más bajas (Cuadro 5.4), mientras que en pesos superiores no se encontraron diferencias significativas (Tukey;  $P > 0.05$ ). En la Figura 5.2 se puede apreciar que semillas con frecuencias de distribución más altas mostraron también mayores tasas de germinación. Porcentajes de germinación similares a sus curvas de distribución de pesos de semillas han sido reportados en cactáceas como *Stenocereus beneckeii* (Ayala *et al.*, 2004), como una estrategia que asegura mayor sobrevivencia a las semillas más abundantes. De igual manera la velocidad de germinación fue ligeramente superior en las semillas con pesos entre 500-700 mg (Figura 5.3). Estos resultados indican que semillas con bajo peso pueden no tener la madurez ni la energía necesaria para lograr una mejor germinación, y que las semillas ubicadas en el centro y extremo derecho de la curva de distribución de pesos de su colecta mostraron mayor viabilidad.

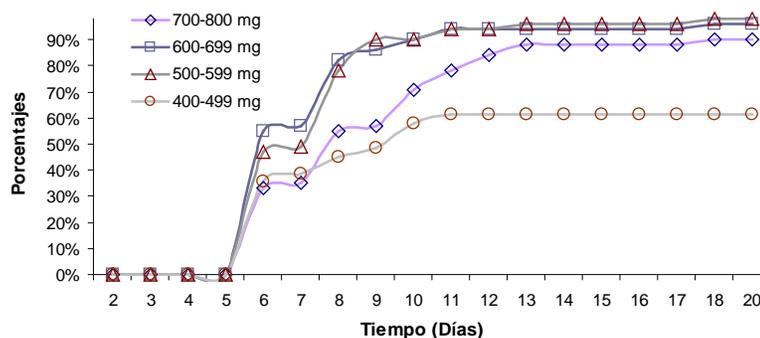
**Cuadro 5.4.** Porcentajes finales de germinación por categoría de pesos para Mayo 2010.

Intervalo de pesos (mg)	Porcentajes de germinación
400-499	61.29 b
500-599	98.04 a
600-699	96.08 a
700-799	90.20 ab

a, b Letras diferentes indican diferencias significativas con  $\alpha = 5\%$ .



**Figura 5.2.** a) Distribución de pesos de la re-colecta 2009 de Medellín y su relación con b) los promedios de germinación del experimento Mayo 2010.



**Figura 5.3.** Curvas de germinación por categorías de pesos del experimento Mayo 2010.

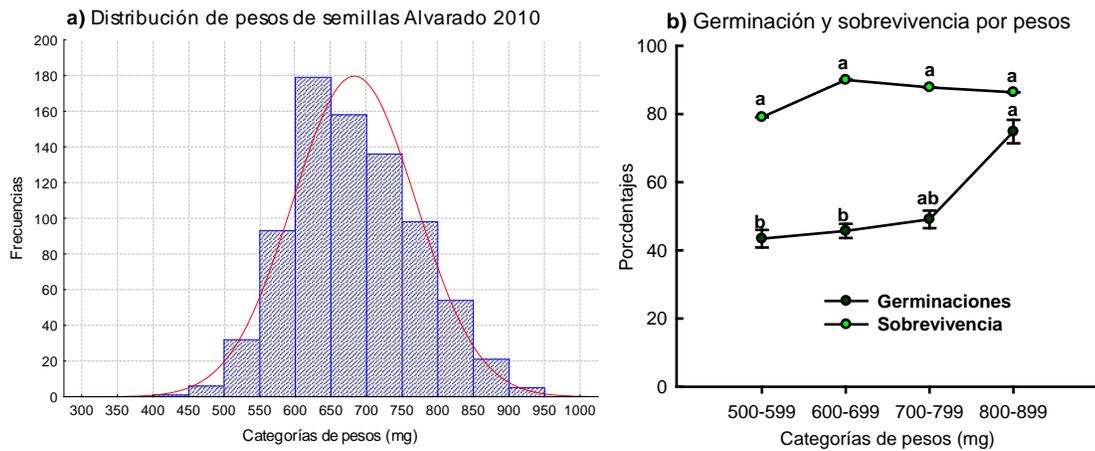
### 5.3.3. Germinación en relación con el peso de las semillas y el sustrato

El experimento Octubre-2010 mostró diferencias significativas entre las categorías de pesos de las semillas y sus tasas de germinación (Kruskal-Wallis;  $P < 0.001$ ). Las semillas con peso superior a 800 mg tuvieron una tasa de germinación significativamente superior a las semillas con pesos inferiores a 700 mg (Dunn;  $P < 0.05$ ) (Cuadro 5.5). En este caso, la curva de distribución de pesos de semillas de su colecta ubica las frecuencias mayores alrededor de 600-650 mg (Figura 5.5). Sin embargo, sus tasas de germinación no fueron mayores, a diferencia del experimento Mayo-2010 (Figura 5.2). Por otra parte, las tasas de sobrevivencia no mostraron diferencias significativas entre categorías de peso de semillas (Kruskal-Wallis;  $P = 0.513$ ), aunque sí se encontró una sobrevivencia ligeramente mayor en semillas con pesos comprendidos entre 600-699 mg, que fueron los más abundantes de la cosecha (Figura 5.4). Semillas superiores a 800 mg mostraron además de una mayor germinación, también una mayor velocidad de germinación, con respecto a las semillas con pesos menores. Respecto a los sustratos, las mayores tasas de germinación se dieron en el sustrato Arena-Franco-Arenoso (Kruskal-Wallis;  $P = 0,018$ ). En este sustrato las semillas entre 600-699 mg resultaron tener la menor tasa de germinación comparada con los demás pesos (Kruskal-Wallis;  $P = 0.032$ ). En Compost las semillas superiores a 800 mg tuvieron una mayor germinación que las semillas menores a 600 mg (Kruskal-Wallis;  $P = 0.014$ ); pero no existieron diferencias en sus tasas de sobrevivencia en relación con el peso de las semillas (Kruskal-Wallis;  $P = 0,475$ ). Estos resultados indican que el peso de las semillas favoreció la tasa de germinación en ambos sustratos, aunque el sustrato tuvo un efecto mayor sobre la germinación que el peso de las semillas; pero ni el peso ni el sustrato tuvieron efecto significativo sobre la sobrevivencia de las plántulas. La disminución en las tasas de germinación en Compost podría deberse a que este sustrato almacena mayor cantidad de humedad que la arena y además, es más rico en materia orgánica (Apéndice A, Cuadro A.2); que, como se vio en el primer experimento de germinación y sobrevivencia en diferentes sustratos, inciden de manera negativa en el desempeño de las semillas de *J. curcas*.

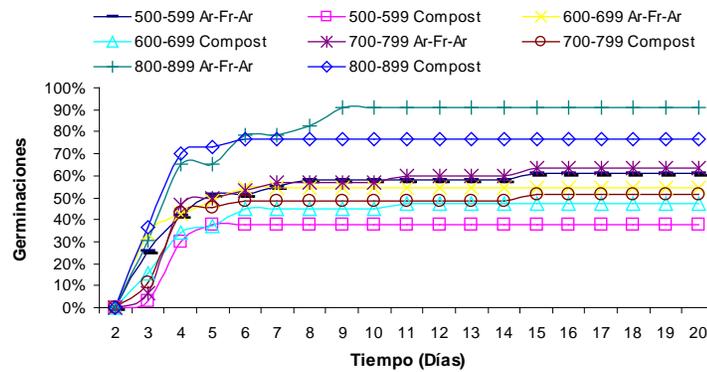
**Cuadro 5.5.** Porcentajes finales de germinación por categorías de pesos y sustratos.

Categorías de pesos de semillas (mg)	Porcentajes de germinación (%)					
	Factor Sustrato				Factor peso	
	Arena-Franco-Arenoso (1:1)		Composta 100%		Por peso independiente del sustrato	
	Germinación	Sobrevivencia	Germinación	Sobrevivencia	Germinación	Sobrevivencia
500-599	61.29 ab	86.86 a	37.84 b	70.00 a	48.53 b	79.07 a
600-699	54.55 b	90.00 a	47.37 ab	90.00 a	50.70 b	90.00 a
700-799	63.33 ab	80.95 a	51.43 ab	80.95 a	56.92 ab	87.80 a
800-899	91.30 a	78.26 a	76.67 a	78.26 a	83.02 a	86.36 a

<sup>a, b, c</sup> Letras diferentes indican diferencias significativas con  $\alpha = 5\%$ .



**Figura 5.4. a)** Distribución de pesos de la re-colecta 2010 de Alvarado y su relación con **b)** las curvas de germinación y sobrevivencia del experimento Octubre 2010.



**Figura 5.5.** Curvas de germinación por categorías de pesos (mg) y sustratos del experimento Octubre 2010.

### 5.3. Conclusiones

Los sustratos y pesos de las semillas tienen un impacto significativo sobre las tasas de germinación y sobrevivencia de *Jatropha curcas*, por tanto no se rechaza la hipótesis de que exista tal efecto. Los sustratos bajos en nutrientes, con buena aireación y de fácil drenado, fueron los más adecuados para lograr altas tasas de germinación y sobrevivencia; mientras que sustratos con alto contenido de nutrientes y baja capacidad de drenado dificultaron la germinación y sobrevivencia de las semillas. Adicionalmente, se observó que la humedad ambiental y el periodo de almacenamiento de las semillas también incidieron sobre su tasa de germinación, disminuyéndola cuando estas condiciones se acentuaron. Respecto al peso de las semillas, aquellas con pesos mayores germinaron mejor independientemente del tipo de sustrato donde se sembraron. Por lo que se recomiendan los sustratos ligeros y bajos en materia orgánica, así como las semillas de mayor peso, para obtener tasas de germinación y sobrevivencia altas durante la propagación de *J. curcas*.

## VI. *Jatropha curcas* y su relación con el peso de la semilla y el tipo de sustrato

### 6.1. Introducción

De acuerdo con los resultados reportados en el Capítulo IV, el peso total de la semilla de *Jatropha curcas* está positivamente correlacionado con el peso de su endospermo, donde se almacenan los nutrientes (Makkar *et al.*, 2008) que permitirán la emergencia y el crecimiento de la plántula. Una vez que la plántula agota los nutrientes almacenados en el endospermo, el sustrato donde ha emergido es el que le proporcionará los nutrimentos necesarios para que continúe con su crecimiento y posterior desarrollo (CATIE, 1996). Relaciones positivas entre tamaño y peso de semillas y crecimiento de sus plántulas han sido documentadas para árboles como roble (*Quercus mongolica*) (Seiwa 2000) y cactáceas como *Zizyphus mistol* G. (Aráoz *et al.* 2004); sin embargo, en otras especies no se han encontrado relaciones, como en *Zea mays* (Pérez *et al.* 2006), *Mimosa Scabella* (Aráoz *et al.*, 2004) y *Juglans ailanthifolia* (Seiwa 2000), donde los factores genéticos son más determinantes. Para *J. curcas*, aun no se reportan científicamente relaciones de tamaño ni de peso de la semilla con el crecimiento de la plántula. Si bien, en el Capítulo V de esta investigación se documentaron relaciones positivas entre el peso de las semillas y su tasa de germinación; es necesario destacar que solamente las semillas con los pesos más bajos mostraron una menor germinación que las que poseían un peso promedio o alto dentro de su colecta, las cuales no tuvieron diferencias significativas en sus tasas de germinación. Por lo que respecta al sustrato, un sustrato rico en nutrientes proveerá de mejores medios para el desarrollo posterior de la plántula (CATIE, 1996). Sin embargo, como se vio en el Capítulo V, los sustratos ricos en nutrientes también pueden disminuir significativamente las tasas de germinación y sobrevivencia de *J. curcas*. Por lo que es importante determinar la contribución del sustrato y del peso de las semillas al crecimiento de las plántulas, que permitan establecer prácticas de siembra recomendables para la especie. En este estudio se evaluaron los efectos de los pesos de semillas de *J. curcas*, así como el efecto de los sustratos sobre la etapa post germinativa, para estipular la importancia de cada factor durante el establecimiento de las plántulas.

#### 6.1.1. Objetivos

- Determinar el efecto del peso de las semillas sobre el crecimiento de las plántulas.
- Determinar el sustrato que proporciona las mejores condiciones para un mayor crecimiento de las plántulas.
- Determinar si la interacción sustrato y peso de la semilla inciden sobre el crecimiento de la plántula.

### 6.1.2. Hipótesis

El peso de las semillas de *Jatropha curcas* y el sustrato donde germinan tendrán un efecto significativo sobre el crecimiento de las plántulas emergentes.

## 6.2. Materiales y métodos

Para evaluar los efectos del peso de la semilla y los sustratos sobre el crecimiento de las plántulas en esta investigación se implementaron dos experimentos denominados como sigue:

- Crecimiento de plántulas en relación a la categoría del peso de las semillas
- Crecimiento de plántulas en relación con el peso de la semilla y el sustrato

### 6.2.1. Metodología general a los dos experimentos

#### 6.2.1.1. Selección de rangos de pesos

Con base en la disponibilidad de las semillas se implementaron cuatro rangos de pesos, mismos que correspondieron a las mayores frecuencias de distribuciones de pesos de las colectas.

#### 6.2.1.2. Selección de los sustratos

Los sustratos seleccionados fueron: Arenoso, Franco-Arenoso y Composta (Compost) de cachaza de caña al 100% (Apéndice A). Los valores nutricionales de los sustratos se muestran en Cuadro A.2 del Apéndice A. Los sustratos fueron regados diariamente para mantener el suelo hidratado.

#### 6.2.1.3. Sitio experimental

Todos los experimentos presentados a continuación se establecieron en el sitio denominado Colpos (Apéndice C.1), bajo condiciones ambientales naturales de la región. Temperatura y humedad se registraron diariamente con estación meteorológica Skywatch Geos No 11.

### 6.2.2. Crecimiento de plántulas en relación a la categoría del peso de las semillas

Este experimento, denominado Mayo 2010, inició el mes de Mayo del 2010 y concluyó en Junio del 2010. El Cuadro 6.1 resume las condiciones experimentales y ambientales registradas.

**Cuadro 6.1.** Condiciones experimentales para crecimiento de plántulas por categorías de pesos de semillas.

Periodo experimental	Categorías de pesos (mg)	Procedencia y cosecha de las semillas	Condiciones ambientales		
			T Mínima ° C	T Máxima ° C	% Humedad
Mayo, 2010	400-499; 500-599; 600-699; 700-799	Medellín, 18°59'52"N, 96°15'31" O; 17 msnm Cosecha: Julio 2009	23.71 ± 1.4	34.40 ± 1.9	74.77 ± 5.9

### 6.2.2.1. Diseño experimental y consideraciones

El experimento consistió en un diseño completamente aleatorio, con un factor peso de las semillas en cuatro niveles: 400-499 mg, 500-599 mg, 600-699 mg y 700-799 mg, y 51 semillas por nivel. Las semillas se sembraron en bolsas de polietileno individuales de 30 cm altura x 15 cm diámetro, conteniendo una mezcla de sustrato Arenoso y Compost en proporción 2:1. Las plantas fueron monitoreadas semanalmente durante las tres semanas posteriores a su germinación.

### 6.2.3. Crecimiento de plántulas en relación con el peso de la semilla y el sustrato

Este experimento, denominado Octubre 2010, inició en el mes de Octubre del 2010 y concluyó en Noviembre del 2010. El Cuadro 6.2 resume las condiciones experimentales.

**Cuadro 6.2.** Condiciones experimentales para desarrollo por sustrato y pesos de semillas.

Periodo experimental	Categorías de pesos (mg)	Procedencia y Cosecha de las semillas	Condiciones ambientales		
			T Mínima °C	T Máxima °C	% Humedad
Octubre, 2010	500-599; 600-699; 700-799; 800-899	Alvarado, 18°46'26" N, 95°45'35" O; 4 msnm. Cosecha: Agosto 2010	19.81 ± 1.1	30.24 ± 1.5	71.5 ± 7.1

### 6.2.3.1. Diseño experimental y consideraciones

Consistió en un diseño completamente aleatorio en arreglo factorial. Se evaluaron dos factores: el primer factor fue peso de las semillas con cuatro niveles: 500-599 mg, 600-699 mg, 700-799 mg y 800-899 mg. El segundo factor fue el sustrato, con dos niveles: **1)** Arenoso y Franco-arenoso en proporción 1:1 (Ar-Fr-Ar) y **2)** Compost al 100%. Se sembraron 32 semillas por nivel, a razón de una semilla por bolsa de polietileno de 30 cm de altura por 15 cm de diámetro, llena con el sustrato correspondiente. Las plantas se monitorearon semanalmente durante cinco semanas posteriores a su germinación.

### 6.2.3.2. Registro de variables e instrumentos utilizados

En ambos experimentos las variables registradas se monitorearon con las técnicas y los instrumentos siguientes: diámetros de tallo, medidos en la base del tallo, al nivel de suelo con vernier digital Autotec (precisión 0.01 mm); longitudes de tallo, medidas desde la base del tallo hasta el peciolo de la última hoja emergente; y longitudes de hojas, medidas a lo largo y ancho de las mismas, para estimar área foliar (ver Apéndice B.1) con cinta métrica (precisión 1mm); clorofila en hojas medidas en la porción media de la hoja, mediante medidor de clorofila Minolta Spad 502 (precisión 0.1 Spads). Al final del periodo de evaluación las plantas se desenterraron y lavaron para eliminar exceso de tierra en las raíces, y se registraron las siguientes variables: longitudes de las cinco raíces principales, medidas desde su inicio hasta su ápice final, con cinta métrica; diámetros de las cinco raíces medidos en la base de las mismas, con vernier digital. Con estas medidas se

estimaron volúmenes de tallos y raíces principales, conforme al [Apéndice B.2](#) y [B.3](#). Posteriormente las plántulas fueron cortadas y separadas en raíces, tallos y hojas, y fueron sometidas a secado en horno a 70° C durante 72 horas, para obtener sus pesos secos utilizando una Balanza analítica Ohaus Pioneer (0.001 mg precisión).

#### **6.2.4. Análisis estadístico**

Las variables de crecimiento obtenidas del monitoreo periódico se analizaron aplicando ANOVA de una vía para el experimento unifactorial de peso de semilla. Para cada variable se obtuvo promedio, desviación estándar ( $\sigma$ ) y error estándar (EE), y se determinó normalidad y homogeneidad de varianzas; analizando los datos por métodos paramétricos o no paramétricos, dependiendo de la distribución. Para el experimento que combinó sustrato y peso de semilla se realizaron pruebas ANOVA de dos vías. Las pruebas de muestras pareadas se realizaron mediante el método de Holm-Sidak, con un nivel de significancia del 95%; usando el programa SigmaPlot versión 10.0.

### **6.3. Resultados y discusión**

#### **6.3.1. Contenido nutricional y propiedades de los sustratos utilizados**

Como se observa en el [Apéndice A, Cuadro A.2](#), el pH de los sustratos utilizados estaba en el rango neutral a ligeramente alcalino, que se recomienda adecuado para esta especie (Ouwens *et al.*, 2007). Las variaciones en materia orgánica y nitrógeno (N) calculado indican que los sustratos Arenoso y Ar-Fr-Ar fueron pobres en N, y con bajos niveles de fósforo (P), calcio (Ca) y magnesio (Mg), a diferencia del Compost, rico en N y con mayores contenidos de Ca y Mg. El Compost, de textura media, y el Arenoso y Ar-Fr-Ar de textura gruesa ([Apéndice A.3](#))

#### **6.3.2. Crecimiento en relación con el peso de la semilla**

**Longitud y diámetro de tallos.** Las longitud de tallos mostró diferencias significativas entre plántulas procedentes de semillas con pesos superiores a 700 mg y plántulas con semillas de pesos inferiores a 600 mg (Holm-Sidak;  $P < 0,001$ ); con tasas de crecimiento aun mayores a la tercera semana en los pesos superiores. Los diámetros de tallo sólo fueron superiores entre estas categorías las primeras dos semanas (Holm-Sidak;  $P < 0.05$ ). La edad de mayor crecimiento se dio en los primeros siete días, decreciendo considerablemente los siguientes 14 días ([Cuadro 6.3](#) y [Figura 6.1](#)).

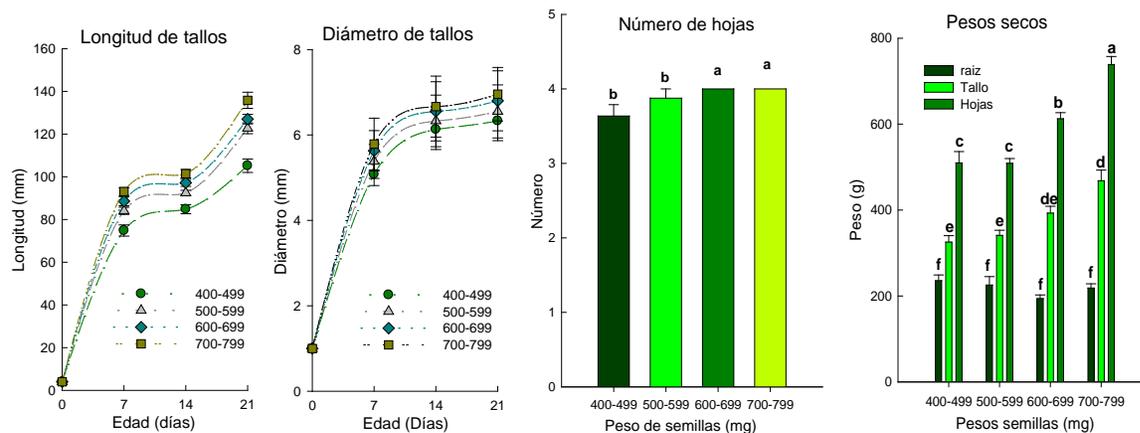
**Hojas verdaderas y área foliar.** El número de hojas verdaderas después de 21 días fue significativamente menor para los pesos menores a 500 mg, con respecto a pesos mayores a 600mg (Kruskal-Wallis;  $P = 0.013$ ). Aunque el área foliar de la primera hoja verdadera fue estadísticamente similar en todos los pesos (Kruskal-Wallis;  $P = 0.359$ ).

**Cuadro 6.3.** Medidas y tasas de crecimiento promedio ( $\pm$ ) de tallos por categoría de peso de semilla.

Variable	Peso de semilla (mg)	7 Días		14 Días		21 Días	
		Longitud (mm)	Crecimiento (mm/día)	Longitud (mm)	Crecimiento (mm/día)	Longitud (mm)	Crecimiento (mm/día)
Longitud de tallo	700-799	93.1 $\pm$ 9.8 <b>a</b>	12.7 $\pm$ 1.4 <b>a</b>	101.5 $\pm$ 10.9 <b>a</b>	1.2 $\pm$ 0.6 <b>a</b>	135.8 $\pm$ 20.7 <b>a</b>	4.9 $\pm$ 2.9 <b>a</b>
	600-699	88.6 $\pm$ 13.5 <b>ab</b>	12.1 $\pm$ 1.9 <b>ab</b>	97.2 $\pm$ 10.5 <b>ab</b>	1.2 $\pm$ 0.8 <b>a</b>	127.0 $\pm$ 14.3 <b>ab</b>	4.3 $\pm$ 1.8 <b>ab</b>
	500-599	84.1 $\pm$ 10.9 <b>b</b>	11.4 $\pm$ 1.6 <b>b</b>	92.4 $\pm$ 8.2 <b>b</b>	1.2 $\pm$ 0.5 <b>a</b>	122.7 $\pm$ 16.5 <b>b</b>	4.3 $\pm$ 1.9 <b>ab</b>
	400-499	74.9 $\pm$ 10.7 <b>c</b>	10.1 $\pm$ 1.5 <b>c</b>	84.8 $\pm$ 8.6 <b>c</b>	1.4 $\pm$ 0.5 <b>a</b>	105.2 $\pm$ 12.9 <b>c</b>	2.9 $\pm$ 1.8 <b>b</b>
Diámetro de tallo	700-799	5.8 $\pm$ 0.6 <b>a</b>	0.68 $\pm$ 0.09 <b>ab</b>	6.7 $\pm$ 0.7 <b>a</b>	0.13 $\pm$ 0.1 <b>a</b>	7.0 $\pm$ 0.6 <b>a</b>	0.04 $\pm$ 0.1 <b>a</b>
	600-699	5.6 $\pm$ 0.5 <b>a</b>	0.67 $\pm$ 0.09 <b>ab</b>	6.6 $\pm$ 0.7 <b>b</b>	0.14 $\pm$ 0.1 <b>a</b>	6.8 $\pm$ 0.7 <b>ab</b>	0.04 $\pm$ 0.0 <b>a</b>
	500-599	5.4 $\pm$ 0.4 <b>b</b>	0.63 $\pm$ 0.06 <b>b</b>	6.3 $\pm$ 0.6 <b>b</b>	0.14 $\pm$ 0.1 <b>a</b>	6.6 $\pm$ 0.6 <b>bc</b>	0.03 $\pm$ 0.0 <b>a</b>
	400-499	5.1 $\pm$ 0.3 <b>c</b>	0.58 $\pm$ 0.04 <b>c</b>	6.1 $\pm$ 0.5 <b>b</b>	0.15 $\pm$ 0.0 <b>a</b>	6.3 $\pm$ 0.5 <b>c</b>	0.03 $\pm$ 0.0 <b>a</b>

<sup>a, b, c</sup> Letras diferentes indican diferencias significativas con  $\bullet = 5\%$ .

**Peso seco y distribución de biomasa.** El peso seco de las raíces no mostró diferencias significativas con respecto a los pesos de las semillas (Kruskal-Wallis;  $P = 0.062$ ); pero sí se registraron tallos más pesados en categorías superiores a 600 mg (Kruskal-Wallis;  $P < 0.001$ ), y mayor peso total en categorías superiores a 700 mg (Kruskal-Wallis;  $P < 0.001$ ). La mayor biomasa se distribuyó en las hojas (Figura 6.1 y Cuadro 6.4), siendo superior (53%) en los ejemplares procedentes de semillas con pesos superiores a 700 mg, con respecto a los pesos inferiores a 500 mg (48%) (Dunn;  $P < 0.05$ ). Biomasa de tallo y hojas fue significativamente mayor que la de raíces entre semillas superiores a 600 mg con respecto a semillas de peso inferior (Dunn;  $P < 0.05$ ). Resultados que indican que el peso de las semillas incidió positivamente sobre el tallo y el aparato fotosintético, permitiendo a su vez mayores tasas de crecimiento en estas plántulas.



**Figura 6.1.** Crecimiento semanal de tallos ( $\pm$ ), y su número de hoja y pesos secos a la extracción por categorías de peso de semillas.

Los resultados expuestos indican que, después de 21 días posteriores a la germinación, el efecto del peso de la semilla persistió sobre alturas y biomasa final de las plantas. Esta condición muestra que

*J. curcas* sí tiene una relación positiva entre el peso de la semilla y el desarrollo de la plántula, que favorecerá su crecimiento y sobrevivencia posterior en situaciones naturales (Seiwa, 2000).

**Cuadro 6.4.** Parámetros promedio ( $\pm$ •) medidos a la extracción por categoría de pesos de semillas.

Peso de semilla (mg)	Número de hojas	Área foliar 1ª hoja verdadera (mm <sup>2</sup> )	Peso seco (mg)			Raíz-parte aérea <sup>-1</sup>
			Raíces	Tallos	Hojas	
700-799	4.0 $\pm$ 0.0 <b>a</b>	6413 $\pm$ 944 <b>a</b>	218 $\pm$ 62 <b>a</b>	468 $\pm$ 157 <b>a</b>	739 $\pm$ 118 <b>a</b>	0.18 $\pm$ 0.03 <b>a</b>
600-699	4.0 $\pm$ 0.0 <b>a</b>	6199 $\pm$ 1050 <b>a</b>	194 $\pm$ 105 <b>a</b>	393 $\pm$ 105 <b>ab</b>	613 $\pm$ 94 <b>b</b>	0.19 $\pm$ 0.06 <b>a</b>
500-599	3.9 $\pm$ 0.4 <b>b</b>	6020 $\pm$ 1791 <b>a</b>	206 $\pm$ 81 <b>a</b>	341 $\pm$ 81 <b>b</b>	509 $\pm$ 73 <b>c</b>	0.25 $\pm$ 0.07 <b>b</b>
400-499	3.6 $\pm$ 0.5 <b>b</b>	5518 $\pm$ 2306 <b>a</b>	236 $\pm$ 64 <b>a</b>	325 $\pm$ 64 <b>b</b>	509 $\pm$ 116 <b>c</b>	0.29 $\pm$ 0.07 <b>b</b>

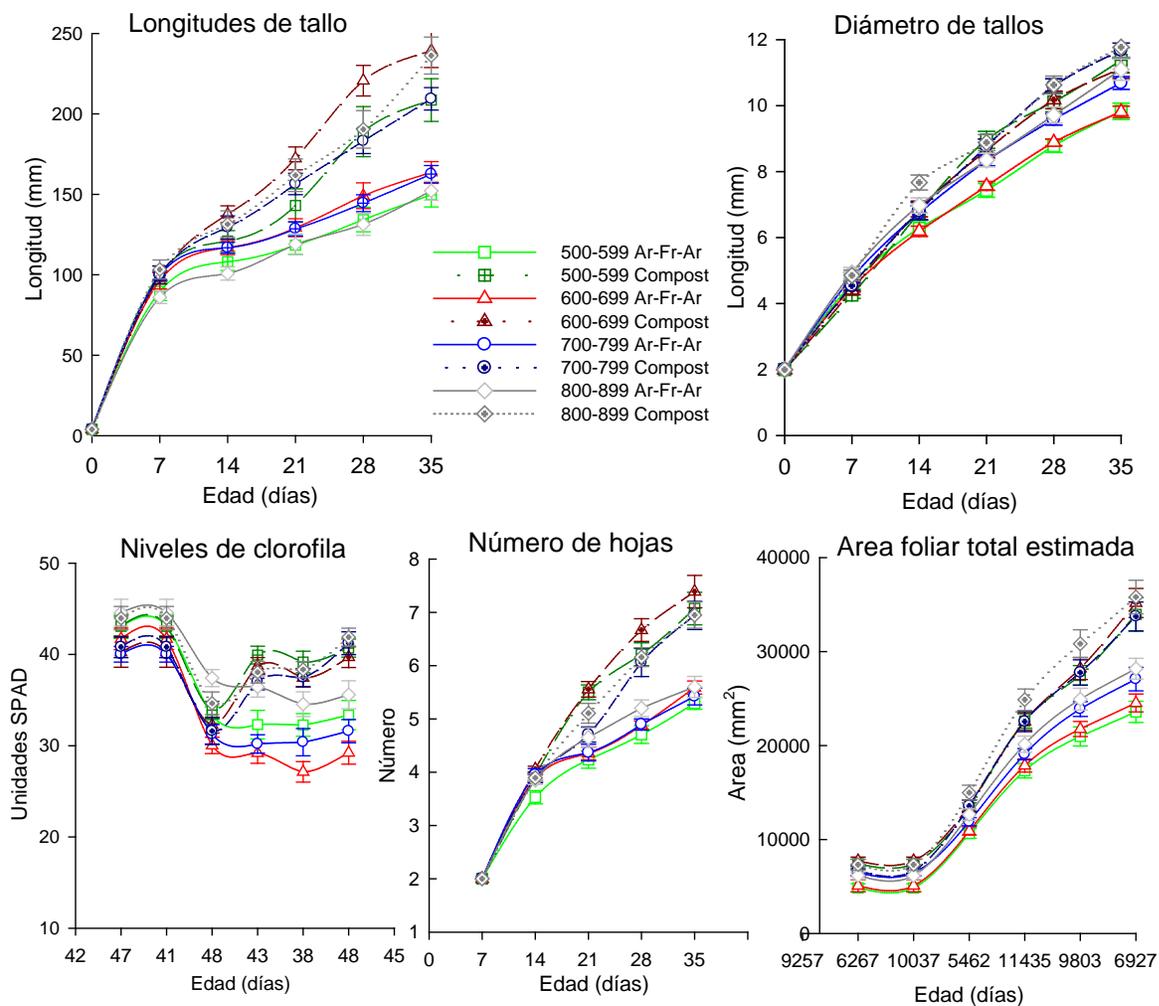
**a, b c** Letras diferentes indican diferencias significativas con • = 5%.

### 6.3.3. Crecimiento en relación a la categoría del peso de las semillas y al sustrato

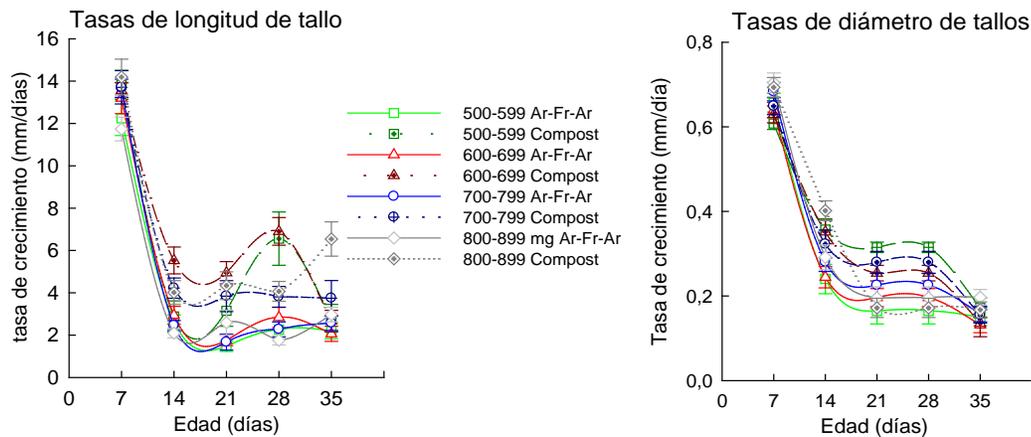
**Longitud y diámetro de tallos.** Para el factor peso de la semilla no se registraron diferencias significativas en la altura final de tallo de las plantas (Kruskal-Wallis;  $P = 0.232$ ); aunque sí existieron mayores tasas de crecimiento en plántulas provenientes de semillas con pesos superiores a 800 mg, con respecto a los pesos inferiores a 700 mg, en la segunda y quinta semana (Kruskal-Wallis;  $P = 0.001$ ). El diámetro del tallo fue mayor entre plántulas con semillas de pesos superiores a 800 mg, con respecto a pesos menores a 700 mg durante la segunda, cuarta y quinta semana (Holm Sidak;  $P < 0.005$ ), permaneciendo similar la primera y tercera semana (Kruskal-Wallis;  $P > 0.052$ ). Esto como resultado de tasas de crecimiento mayor durante estos periodos. Para el factor sustrato se registraron tasas de crecimiento y tallos más altos en Compost, desde la primera hasta la quinta semana (Kruskal-Wallis;  $P < 0.05$ ). Los diámetros de los tallos fueron superiores en Compost a partir de la segunda semana (Kruskal-Wallis;  $P < 0.05$ ) (Figuras 6.2 y 6.3). El ANOVA de dos vías determinó que no existió interacción del peso de la semilla y el sustrato respecto a la altura ( $P = 0.810$ ) ni al diámetro del tallo ( $P = 0.424$ ).

**Hojas verdaderas y área foliar.** El factor peso de la semilla no mostró diferencias significativas en el número de hojas durante el periodo de observación (Kruskal-Wallis;  $P > 0.131$ ). El área foliar tuvo diferencias significativas solamente a partir de la tercera semana entre pesos mayores a 800 mg y pesos menores a 600 mg ( $P < 0.025$ ); aunque la tasa de incremento en área foliar no mostró diferencias significativas entre pesos en ningún periodo ( $P > 0.067$ ). Para el sustrato, el número de hojas en Compost fue significativamente mayor a partir de la tercera semana (Kruskal-Wallis;  $P < 0.001$ ). Sin embargo, la tasa final de producción de hojas no tuvo diferencias significativas entre pesos ni sustratos (Kruskal-Wallis;  $P = 0.292$ ). El área foliar y sus tasas de incremento fueron significativamente mayores en Compost, desde la primera hasta la quinta semana de observación (Kruskal-Wallis;  $P < 0.001$ ) (Figuras 6.2 y 6.4). El ANOVA de dos vías no encontró interacción estadística entre efectos del peso de la semilla y el sustrato ( $P = 0.919$ ).

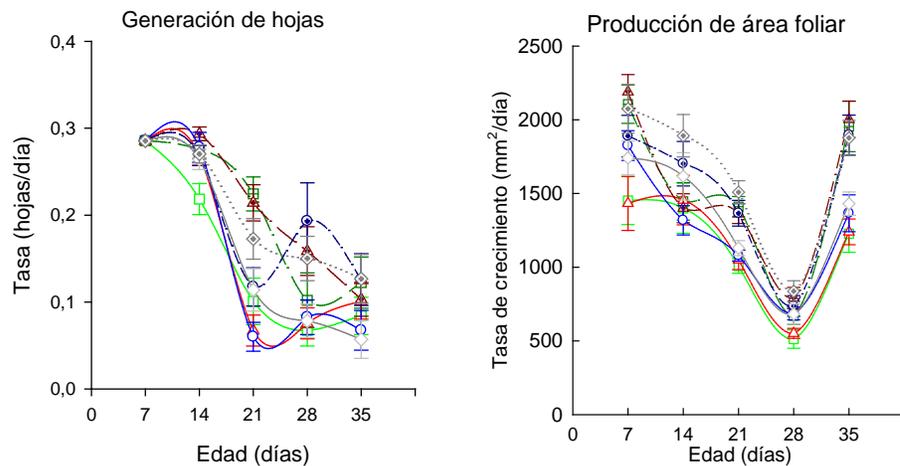
**Clorofila.** El factor peso de la semilla mostró niveles de clorofila significativamente mayores en pesos superiores a 800 mg, respecto a pesos comprendidos entre 600-799 mg, durante todo el periodo de observación. El factor sustrato obtuvo niveles de contenido de clorofila mayores en Compost a partir de la tercera semana en adelante (Holm-Sidak;  $P > 0.05$ ). Es importante resaltar que a partir de la tercera semana los niveles de clorofila se mantuvieron similares, independientemente del peso de las semillas, entre plántulas localizadas en Compost (Holm-Sidak;  $P > 0.05$ ); por lo que las diferencias debidas al peso de las semillas solo se manifestaron en suelo Ar-Fr-Ar. Aunque el ANOVA de dos vías no evidenció significancia estadística entre pesos de semillas y sustratos ( $P = 0.355$ ). Los resultados indican que el sustrato rico en nutrientes (Compost) favoreció y mantuvo uniformes los niveles de clorofila independiente-mente del peso de la semilla, mientras que en un sustrato con bajo contenido de nutrientes, permitió revelar el efecto que el peso de las semillas tiene sobre el vigor de las plántulas.



**Figura 6.2.** Curvas de crecimientos promedio ( $\pm$ EE) por categorías de pesos de semilla (mg) y sustratos.



**Figura 6.3.** Tasas de crecimiento de longitud y diámetro de tallos promedio ( $\pm$ EE), por categorías de pesos de semilla (mg) y sustratos.



**Figura 6.4.** Tasas promedio ( $\pm$ EE) de generación hojas y de área foliar total por categorías de pesos de semilla (mg) y sustratos.

**Medidas aéreas a la extracción.** Para el factor peso de las semillas no existieron diferencias estadísticas en altura y diámetro de tallos, ni volumen de tallos calculado ( $P > 0.05$ ). En el factor sustrato los diámetros en la base del tallo, las alturas totales y el volumen estimado de los tallos fueron mayores en Compost (Kruskal-Wallis;  $P < 0.05$ ) (Cuadro 6.5 y Figura 6.5).

**Sistema de raíces.** El factor peso de la semilla mostró que la longitud de las cinco raíces principales fue significativamente mayor solamente entre pesos de 800-899 mg y 700-799 mg (Holm-Sidak;  $P = 0.013$ ); mientras que los diámetros permanecieron similares ( $P = 0.601$ ), lo mismo que su volumen (Dunn;  $P > 0.05$ ). En el factor sustrato las longitudes mayores se registraron en Ar-Fr-Ar (Kruskal-Wallis;  $P = 0.003$ ), indicativo del esfuerzo para obtener recursos de un suelo más pobre en nutrientes (Valdes *et al.*, 2010). Sin embargo, los diámetros y volúmenes mayores se localizaron en Compost (Holm-Sidak;  $P < 0.05$  y Dunn;  $P = 0.004$ , respectivamente), indicativo de raíces más robustas en sustratos más nutritivos. El ANOVA de dos vías no detectó significancia estadística

entre pesos de semillas y sustratos ( $P = 0.308$ ). Aunque se encontró que las raíces procedentes de semillas menores a 600 mg en sustrato Ar-Fr-Ar tenían un volumen menor al volumen de las raíces procedentes de semillas superiores a 800 mg (Cuadro 6.6 y Figura 6.5); lo que indica que plántulas con pesos de semilla menores desarrollan más sus sistemas de raíces, comparadas con pesos mayores, cuando se encuentran en sustratos pobres en nutrientes; pero no existen diferencias en su desarrollo si el sustrato es rico en nutrientes.

**Cuadro 6.5.** Medidas promedio ( $\pm$ ) a los 35 días para plántulas por categoría de peso de semilla y por sustrato.

Peso de semillas (mg)	Sustrato	Altura del tallo (mm)	Diámetro del tallo (mm)	Número de hojas	Área foliar (cm <sup>2</sup> )	Clorofila Unidades SPAD
800-899	Ar-Fr-Ar	152.3 $\pm$ 26.2 <b>b</b>	11.1 $\pm$ 1.4 <b>ab</b>	5.6 $\pm$ 0.9 <b>b</b>	453 $\pm$ 62 <b>a</b>	35.6 $\pm$ 6.9 <b>b</b>
	Compost	236.4 $\pm$ 50.1 <b>a</b>	11.8 $\pm$ 1.4 <b>a</b>	7.1 $\pm$ 1.1 <b>a</b>	560 $\pm$ 109 <b>a</b>	41.9 $\pm$ 4.3 <b>a</b>
700-799	Ar-Fr-Ar	162.6 $\pm$ 23.4 <b>b</b>	10.66 $\pm$ 0.9 <b>b</b>	5.4 $\pm$ 0.7 <b>b</b>	444 $\pm$ 72 <b>b</b>	31.6 $\pm$ 5.6 <b>bc</b>
	Compost	209.5 $\pm$ 28.7 <b>a</b>	11.68 $\pm$ 0.9 <b>a</b>	6.9 $\pm$ 1.1 <b>a</b>	537 $\pm$ 100 <b>a</b>	41.22 $\pm$ 5.2 <b>a</b>
600-699	Ar-Fr-Ar	163.7 $\pm$ 27.9 <b>b</b>	9.81 $\pm$ 0.7 <b>b</b>	5.6 $\pm$ 0.5 <b>b</b>	409 $\pm$ 66 <b>b</b>	29.2 $\pm$ 5.2 <b>c</b>
	Compost	239.4 $\pm$ 44.7 <b>a</b>	11.1 $\pm$ 1.3 <b>a</b>	7.2 $\pm$ 1.7 <b>a</b>	542 $\pm$ 97 <b>a</b>	39.7 $\pm$ 4.8 <b>a</b>
500-599	Ar-Fr-Ar	149.8 $\pm$ 31.2 <b>b</b>	9.83 $\pm$ 1.0 <b>b</b>	5.3 $\pm$ 0.5 <b>b</b>	397 $\pm$ 67 <b>b</b>	33.4 $\pm$ 6.6 <b>bc</b>
	Compost	208.6 $\pm$ 49.6 <b>a</b>	11.4 $\pm$ 1.4 <b>a</b>	7.0 $\pm$ 1.3 <b>a</b>	532 $\pm$ 108 <b>a</b>	40.7 $\pm$ 3.7 <b>a</b>

<sup>a, b, c</sup> Letras diferentes indican diferencias significativas con  $\alpha = 5\%$ .

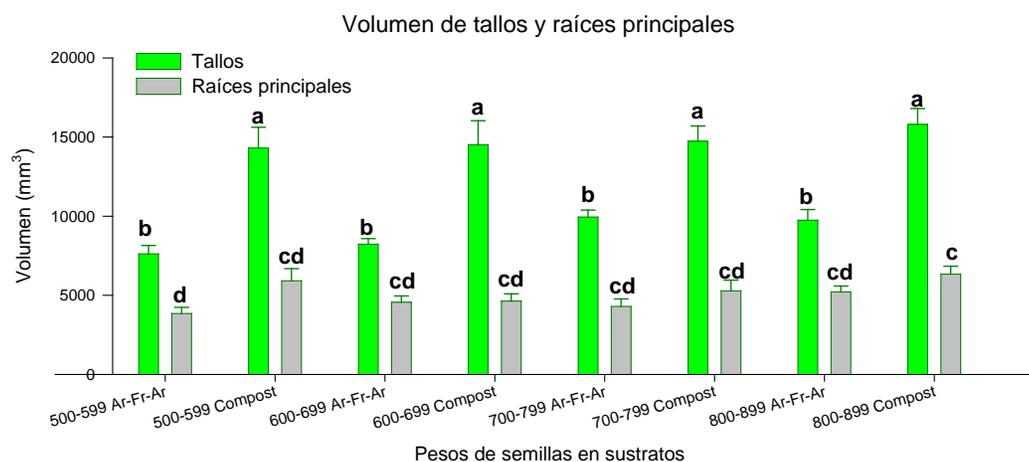
**Cuadro 6.6.** Medidas promedio ( $\pm$ ) del sistema de raíces por categoría de peso de semilla y por sustrato.

Pesos de semillas (mg)	Sustrato	Longitud de raíz pivotante (mm)	Longitud de raíces laterales (mm)	Diámetro de raíz pivotante (mm)	Diámetro de raíces laterales (mm)	Volumen de raíces (mm <sup>3</sup> )
800-899	Ar-Fr-Ar	255.0 $\pm$ 56.6 <b>a</b>	300.3 $\pm$ 30.3 <b>a</b>	5.0 $\pm$ 1.2 <b>b</b>	2.7 $\pm$ 0.5 <b>ab</b>	5208 $\pm$ 1684 <b>ab</b>
	Compost	218.0 $\pm$ 36.3 <b>ab</b>	203.6 $\pm$ 37.4 <b>b</b>	6.2 $\pm$ 1.2 <b>a</b>	3.1 $\pm$ 1.2 <b>a</b>	6340 $\pm$ 2171 <b>a</b>
700-799	Ar-Fr-Ar	202.6 $\pm$ 61.8 <b>bc</b>	234.0 $\pm$ 65.3 <b>b</b>	5.3 $\pm$ 1.1 <b>a</b>	2.6 $\pm$ 0.4 <b>ab</b>	4293 $\pm$ 2090 <b>ab</b>
	Compost	198.2 $\pm$ 45.6 <b>bc</b>	212.7 $\pm$ 48.1 <b>b</b>	5.5 $\pm$ 1.0 <b>a</b>	3.2 $\pm$ 0.9 <b>ab</b>	5276 $\pm$ 2796 <b>ab</b>
600-699	Ar-Fr-Ar	240.3 $\pm$ 51.9 <b>ab</b>	271.2 $\pm$ 52.9 <b>ab</b>	4.8 $\pm$ 0.8 <b>b</b>	2.6 $\pm$ 0.4 <b>ab</b>	4560 $\pm$ 1641 <b>ab</b>
	Compost	185.6 $\pm$ 29.2 <b>c</b>	190.0 $\pm$ 33.3 <b>b</b>	5.4 $\pm$ 1.2 <b>a</b>	2.9 $\pm$ 0.8 <b>ab</b>	4639 $\pm$ 1928 <b>ab</b>
500-599	Ar-Fr-Ar	225.4 $\pm$ 48.8 <b>ab</b>	250.9 $\pm$ 34.3 <b>ab</b>	4.4 $\pm$ 1.0 <b>b</b>	2.5 $\pm$ 0.7 <b>b</b>	3844 $\pm$ 1619 <b>b</b>
	Compost	225.7 $\pm$ 37.8 <b>ab</b>	232.9 $\pm$ 54.6 <b>b</b>	5.9 $\pm$ 1.4 <b>a</b>	3.1 $\pm$ 1.2 <b>ab</b>	5916 $\pm$ 2862 <b>ab</b>

<sup>a, b, c</sup> Letras diferentes indican diferencias significativas con  $\alpha = 5\%$ .

**Peso seco y distribución de biomasa.** Para el factor peso de la semilla no existieron diferencias en el peso seco de tallos (Holm-Sidak;  $P = 0.13$ ), hojas (Holm-Sidak;  $P = 0.08$ ) ni raíces (Holm-Sidak;  $P = 0.22$ ). Para el factor sustrato sí existieron diferencias, con mayores pesos de tallo (Holm-Sidak;  $P < 0.001$ ), hojas (Holm-Sidak;  $P = 0.084$ ) y raíces (Kruskal-Wallis;  $P = 0.023$ ) en Compost. Es importante recalcar que los pesos de tallos y raíces de plantas provenientes de semillas superiores a 800 mg en Compost fueron mayores que los de las plantas procedentes de semillas inferiores a 600 mg en suelo Ar-Fr-Ar. (Holm-Sidak;  $P < 0.05$  y Dunn;  $P < 0.05$ , respectivamente) (Cuadro 6.7 y Figura 6.6). La biomasa en hojas fue similar entre categorías de peso de semillas ( $P=0-62$ ); pero fue

mayor en Compost comparada con el sustrato Ar-Fr-Ar (Dunn;  $P < 0.05$ ) (Cuadro 6.7). Mientras que la proporción en raíces en Ar-Fr-Ar fue mayor que en Compost (Dunn;  $P < 0.05$ ). Resultados que indican que el sustrato pobre en nutrientes propicio la elongación de las raíces como estrategia para mejorar la exploración y captura de recursos.



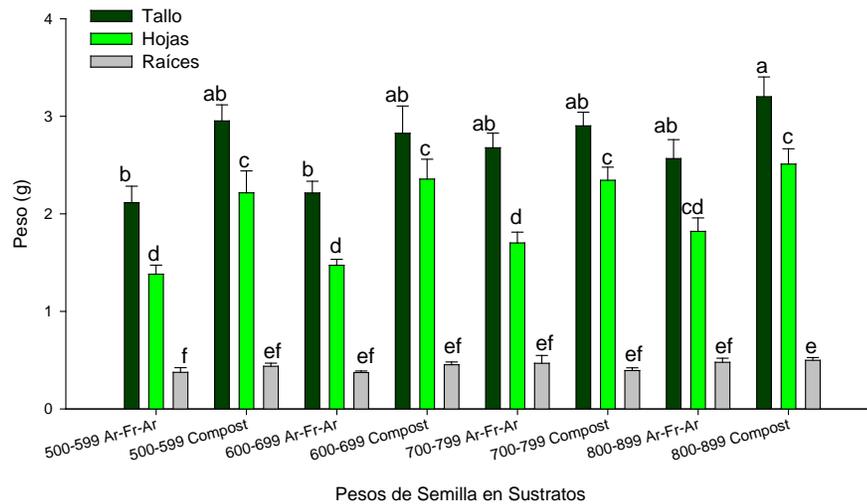
**Figura 6.5.** Volúmenes promedio ( $\pm$ ) de tallos y raíces en función del peso de la semilla y tipo de sustrato.

Se resume que el peso de la semilla no fue un factor relevante en el crecimiento de las plántulas de *J. curcas* cuando germinaron en un sustrato rico en nutrientes, sin embargo, éste sí se manifestó con mayor crecimiento en plántulas con semillas más pesadas, cuando el sustrato fue pobre. Esta característica indica que semillas más pesadas de *J. curcas* podrían desempeñarse mejor bajo recursos limitados, lo cual asegurará su supervivencia posterior, como ocurre en especies que crecen en sitios áridos o en etapas de sucesión secundaria (Seiwa, 2000; Aráoz, 2004).

**Cuadro 6.7.** Pesos secos promedio ( $\pm$ ) por categoría de peso de semilla y por sustrato.

Peso de semillas (mg)	Sustrato	Raíces (g)	Tallos (mg)	Hojas (mg)	Peso seco total (mg)	Raíz-parte aérea <sup>-1</sup>	Hojas-peso total <sup>-1</sup>
800-899	Ar-Fr-Ar	0.48 $\pm$ 0.18 ab	2.57 $\pm$ 0.87ab	1.82 $\pm$ 0.62 b	4.87 $\pm$ 1.60 ab	0.11 $\pm$ 0.02 a	0.37 $\pm$ 0.03 ab
	Compost	0.50 $\pm$ 0.12 a	3.20 $\pm$ 0.86 a	2.51 $\pm$ 0.66 a	6.21 $\pm$ 1.31 a	0.09 $\pm$ 0.02 ab	0.41 $\pm$ 0.09 ab
700-799	Ar-Fr-Ar	0.47 $\pm$ 0.35 ab	2.68 $\pm$ 0.66 ab	1.70 $\pm$ 0.48 b	4.85 $\pm$ 1.1 ab	0.12 $\pm$ 0.11 a	0.35 $\pm$ 0.05 b
	Compost	0.39 $\pm$ 0.11 ab	2.9 $\pm$ 0.58 ab	2.35 $\pm$ 0.55 a	5.64 $\pm$ 1.2 a	0.07 $\pm$ 0.01 b	0.41 $\pm$ 0.03 a
600-699	Ar-Fr-Ar	0.37 $\pm$ 0.06 b	2.21 $\pm$ 0.49 b	1.47 $\pm$ 0.25 b	4.06 $\pm$ 0.75 b	0.10 $\pm$ 0.01 a	0.36 $\pm$ 0.03 b
	Compost	0.45 $\pm$ 0.11 ab	2.83 $\pm$ 1.18 ab	2.36 $\pm$ 0.86 a	5.64 $\pm$ 1.2 a	0.09 $\pm$ 0.04 b	0.44 $\pm$ 0.07 a
500-599	Ar-Fr-Ar	0.38 $\pm$ 0.19 b	2.12 $\pm$ 0.69 b	1.38 $\pm$ 0.38 b	3.87 $\pm$ 1.12 b	0.11 $\pm$ 0.05 a	0.36 $\pm$ 0.03b
	Compost	0.44 $\pm$ 0.11 ab	2.95 $\pm$ 0.62 ab	2.22 $\pm$ 0.84 a	5.61 $\pm$ 1.48 a	0.09 $\pm$ 0.02 ab	0.39 $\pm$ 0.05 ab

<sup>a, b, c</sup> Letras diferentes indican diferencias significativas con  $\bullet = 5\%$ .



**Figura 6.6.** Peso seco promedio (+•) de plántulas extraídas en diferentes sustratos y con diferentes categorías de peso de sus semillas.

## 6.4. Conclusiones

Los pesos de las semillas desempeñaron un papel importante en el desarrollo de las plántulas emergentes, especialmente cuando éstas se encontraron en sustratos pobres en nutrientes. Las reservas en los cotiledones, permitieron a las plántulas desarrollarse uniformemente, independientes del sustrato, durante los primeros seis días después de la emergencia y su efecto perduró hasta los 21 y 35 días posteriores. Las semillas con pesos mayores desarrollaron un mejor sistema de raíces en sustratos con bajo contenido de nutrientes, para explorar y obtener los nutrientes, lo que impactó en el crecimiento de la parte aérea. Por su parte, un sustrato rico en nutrientes inhibió en gran parte el efecto del peso de las semillas, ya que las plántulas localizadas en él mantuvieron tallas uniformes, independientemente del peso de sus semillas, al final del periodo de experimentación. Por lo anterior, se acepta la hipótesis de que sí existe un efecto del peso de la semilla y el tipo de sustrato sobre el crecimiento de las plántulas. Y considerando también los resultados del capítulo V, se recomienda la siembra de semillas de pesos promedio y superiores en sustratos francos, ricos en nutrientes, para lograr mejores tasas de germinación y crecimiento de las plántulas durante la propagación de esta especie.

## VII. Crecimiento de plántulas de *Jatropha curcas* en tres tipos de suelo\*

### 7.1. Introducción

Numerosas referencias bibliográficas señalan que *Jatropha curcas* es una planta de amplia adaptación y, por tanto, no requiere de ningún tipo de suelo especial, ya que puede desarrollarse normalmente en terrenos áridos y semiáridos y crece en suelos pedregosos, arenosos y salinos (Heller, 1996, Henning, 2002, Li-Kun *et al.*, 2007; Mittelbach, 2010). Se indica que en suelos áridos la planta tiene la posibilidad de reclamar terrenos marginales al explorar los suelos con un sistema de raíces adaptado a ello (Jongschaap *et al.*, 2007). También se dice que los suelos arenosos son los más adecuados para esta especie; mientras que los suelos arcillosos no son apropiados cuando existe saturación o inundaciones por su incapacidad para drenar excesos de humedad que son perjudiciales a la planta (Ouwens *et al.*, 2007). Tales aseveraciones han sido producto de observaciones en plantaciones localizadas en África y Asia, donde existe un mayor adelanto en el cultivo de la especie. En México los trabajos que se han presentado sobre su potencial agroecológico también están basados en referencias de estudios en otros países (Zamarripa y Díaz 2008; Semarnat-INE-UNAM\_CIECO, 2008). Debido a ello, es importante, contar con información sobre el comportamiento del cultivo en suelos mexicanos y bajo las condiciones naturales de la región. Al respecto, en el capítulo V se presentaron evidencias de una mejor tasa de germinación en suelo arenoso y franco-arenoso, con respecto a suelos arcillosos; mientras que el capítulo VI mostró que las plántulas de *J. curcas* tienen un desarrollo significativamente mayor cuando se encuentran en suelos ricos en nutrientes, en comparación con suelos pobres en nutrientes. Sin embargo, estos resultados sólo contemplaron plántulas de cinco semanas, por lo que se requieren estudios más profundos sobre el efecto de los sustratos en el crecimiento aéreo y subterráneo de *J. curcas*. En este capítulo se presenta un estudio que comprende varias etapas de monitoreo de plántulas germinadas en sustratos con diferentes características granulométricas y químicas, con el objetivo de determinar su impacto sobre el desarrollo de esta especie.

#### 7.1.1. Objetivos

- Evaluar el crecimiento de plántulas de *Jatropha curcas* en tres diferentes tipos de suelo.
- Determinar el suelo que proporciona las mejores condiciones para el buen desarrollo de *Jatropha curcas*.

#### 7.1.2. Hipótesis

El crecimiento de *Jatropha curcas* depende de las condiciones del suelo.

\* Artículo parcialmente publicado en Biomass and Bioenergy 2011; 35(8): 3529-3536

## 7.2. Materiales y métodos

### 7.2.1. Evaluación de tres tipos de suelo en plántulas de *Jatropha curcas*

El efecto de tres tipos de suelo procedentes de un mismo sitio sobre el crecimiento *J. curcas*, se evaluó mediante tres experimentos independientes y con diferente periodo de monitoreo para las plántulas después de la emergencia: un mes, dos meses y tres meses.

#### 7.2.1.1 Sitios experimentales y condiciones ambientales

Los experimentos etiquetados como 1\_MES y 2\_MESES se efectuaron en el sitio Colpos (Apéndice C.1); el experimento etiquetado como 3\_MESES se estableció en el Sitio Veracruz (Apéndice C.2). Los experimentos 1\_MES y 2\_MESES se desarrollaron dentro de invernadero cubierto con polietileno semitransparente, con dos paredes abiertas para ventilación natural del sitio. El experimento 3\_MESES se estableció bajo las condiciones naturales del sitio, sin invernadero, ni malla sombra, salvo que las plantas se colocaron cerca de una pared ubicada al norte, para protegerlas del viento. Las plantas fueron regadas diariamente para mantener niveles similares de humedad en los suelos durante todo el experimento. Los detalles de los experimentos se muestran en el Cuadro 7.1. Los registros de temperaturas y humedad (Cuadro 7.2) se realizaron mediante estación meteorológica Skywatch Geos No 11. La evapotranspiración ambiental fue tomada de la estación meteorológica ubicada en el sitio Colpos.

#### 7.2.1.2. Selección del material vegetal

Las semillas utilizadas correspondieron a dos procedencias no-tóxicas del estado de Veracruz (Cuadro 7.1) y fueron seleccionadas por encontrarse dentro del peso promedio de cada colecta, con una variación de  $\pm 50$  mg.

#### 7.2.1.3. Selección de los sustratos

Los sustratos seleccionados fueron: Arenoso, Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso (Apéndice A.2), cuyas propiedades se presentan en los Cuadros A.1 y A.2, del Apéndice A.

**Cuadro 7.1.** Experimentos de crecimiento de *Jatropha curcas* en tres diferentes tipos de suelo.

Experimento	Procedencia de las semillas	Cosecha	Duración	Fecha de siembra de semillas
1_MES	Papantla, Veracruz; 20°15'17"N, 97°15'32"O; 71 msnm	Enero, 2010	30 días	Abril 16, 2010
2_MESES	Medellín, Veracruz; 18°59'52"N, 96°15'31" O; 17 msnm	Agosto, 2010	60 días	Septiembre 30, 2010
3_MESES	Papantla, Veracruz 20°15'17"N, 97°15'32"O; 71 msnm	Agosto, 2010	110 días	Julio 30, 2010

**Cuadro 7.2.** Condiciones ambientales promedio ( $\pm$  desviación estándar) registradas durante los experimentos realizados para determinar desempeño de *Jatropha curcas* en tres diferentes tipos de suelo.

Experimento	Temperatura máxima ° C	Temperatura mínima ° C	% de Humedad	Evapotranspiración (mm)
1_MES	34.4 $\pm$ 3.7	23.7 $\pm$ 2.4	74.8 $\pm$ 5.9	0.48 $\pm$ 0.12
2_MESES	30.2 $\pm$ 3.4	19.8 $\pm$ 3.5	71.5 $\pm$ 14.2	0.44 $\pm$ 0.13
3_MESES	29.2 $\pm$ 2.6	19.4 $\pm$ 2.8	74.3 $\pm$ 12.6	0.43 $\pm$ 0.12

#### 7.2.1.4. Diseño experimental y siembra de las semillas

El diseño experimental para los tres experimentos fue completamente al azar, con un factor sustrato consistente de tres niveles: suelo Arenoso, Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso. Los sustratos fueron colocados en bolsas de polietileno negro y 15 semillas fueron sembradas en cada bolsa por tratamiento. Previo a su siembra las semillas fueron hidratadas colocándolas dentro de un recipiente con agua común; donde permanecieron aproximadamente 8 horas y posteriormente se extrajeron y fueron enterradas en el sustrato correspondiente en posición vertical con la carúncula hacia abajo a una profundidad equivalente a su longitud (2 cm aproximadamente). Cuando las semillas no germinaron, semillas adicionales fueron colocadas, para completar el número de individuos.

#### 7.2.1.5. Registros de irrigación y cálculo de láminas de riego

Durante el experimento de 2\_MESES se llevó un registro de irrigación por planta las primeras cinco semanas. Por cada sustrato se seleccionaron tres individuos al azar y dos veces por semana se registró la cantidad de agua suministrada. El agua se aplicó a capacidad de campo mediante una probeta graduada de un litro. El promedio del consumo por sustrato se convirtió a láminas de riego en mm, mediante la ecuación 7.1

$$\text{Lámina} = \text{Riego} * (1 \times 10^6 \text{ mm}) / (\bullet * (350 \text{ mm})^2) \quad (7.1)$$

Donde:

Riego= riego aplicado en litros, que se multiplica por  $1 \times 10^6$  para convertirlo a mm.

350 = radio promedio de los contenedores en mm.

#### 7.2.1.6. Registro de variables de respuesta e instrumentos utilizados

Las variables registradas se monitorearon con los instrumentos y técnicas siguientes: diámetros de tallo, medidos en la base del tallo al nivel de suelo, con vernier digital Autotec (precisión 0.01 mm); longitudes de tallo, medidas desde la base del tallo hasta la base del ápice, con cinta métrica (precisión 1mm). Las medidas en tallos se tomaron diariamente durante el primer mes y posteriormente cada tres días. Longitudes de hojas, medidas a lo largo y ancho de las mismas, con cinta métrica, para estimar su área foliar (ver [Apéndice B.1](#)). Clorofila en las dos hojas mayores, medidas en la porción media de la hoja, mediante medidor de clorofila Minolta Spad 502 (precisión 0.1 Spads). Dimensiones de hojas y clorofila se tomaron inicialmente a los 30 días después de la germinación y posteriormente cada 15 días. Al final del periodo de evaluación las plantas se

desenterraron y lavaron para eliminar el exceso de tierra y se registraron las siguientes variables: longitud de las cinco raíces principales, medidas desde su inicio hasta su ápice final, con cinta métrica; diámetros de las cinco raíces, medidos al inicio de las mismas, con vernier digital. Posteriormente las plántulas fueron cortadas y separadas en raíces, tallos y hojas y fueron sometidas a secado en horno a 70° C durante 72 horas, para obtener sus pesos secos mediante Balanza analítica Ohaus Pioneer (0.001 mg precisión).

#### **7.2.1.7. Evaluación de la tasa de evapotranspiración en *Jatropha***

En el experimento de 2\_MESES se realizaron dos mediciones para obtener la tasa de evapotranspiración, con tres individuos por sustrato elegidos al azar. La primera medición se inició con plantas 52 días de edad promedio y la segunda a los tres días siguientes. El monitoreo se llevó a cabo en la quinta hoja a partir del ápice principal, entre las 11:30 y 12:00 horas con medidor LCpro+ portable Photosynthesis System.

#### **7.2.1.8. Análisis estadístico**

Los datos de los monitoreos periódicos y las medidas finales registradas fueron analizados aplicando ANOVAs de una vía para determinar significancia entre tratamientos. Las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas se aplicaron *a priori* para determinar los métodos paramétricos o no paramétricos correspondientes. Los datos normales fueron analizados mediante el Modelo Lineal General y las comparaciones pareadas mediante el método de Holm-Sidak; mientras que los datos no normales se analizaron mediante el método de Kruskal-Wallis y las comparaciones pareadas mediante el método de Dunn; ambos con un nivel de significancia del 95%. Se utilizó el programa SigmaPlot versión 10 para realizar todo los análisis.

### **7.3. Resultados y discusión**

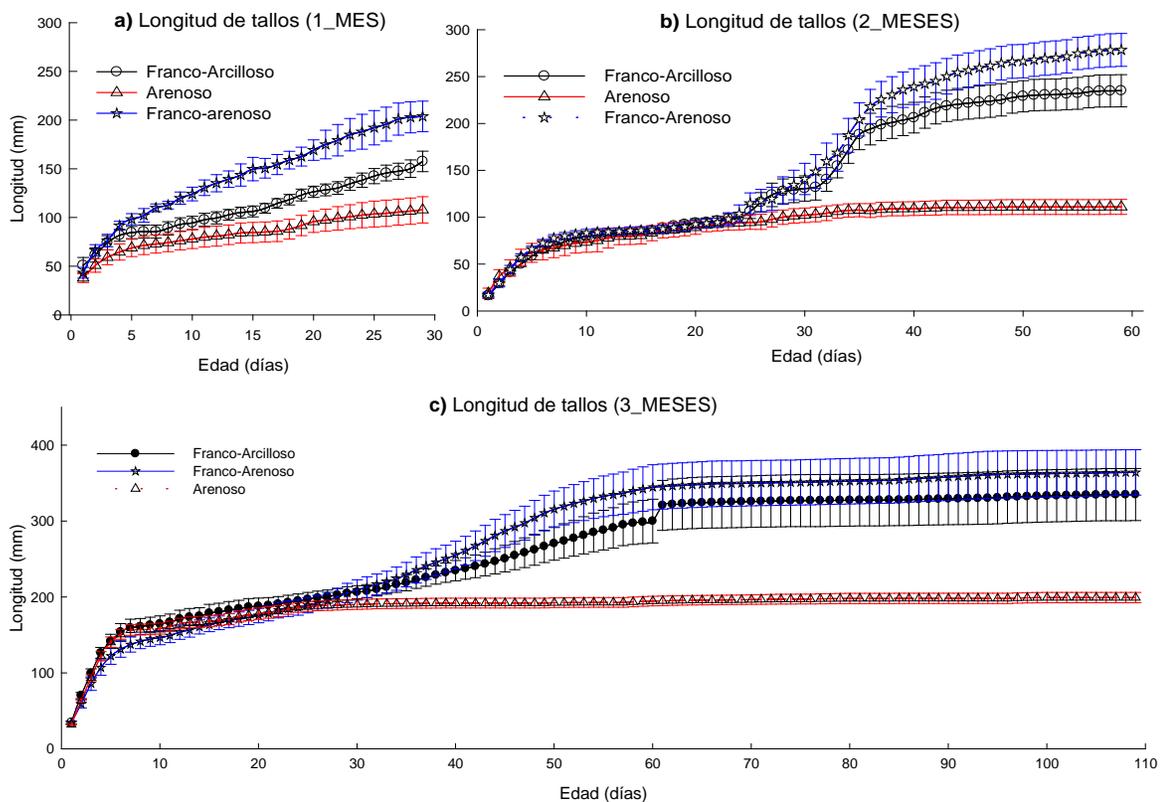
#### **7.3.1. Análisis de suelos**

Los resultados de los análisis químicos de los tres tipos de suelo utilizados se muestran en el Cuadro A.2 del Apéndice A. Todos los sustratos se encontraron entre rangos neutrales a ligeramente alcalinos, los cuales han sido reportados como adecuados para el crecimiento de esta especie (Ouwens *et al.*, 2007; Semarnat-INE-UNAM-CIECO, 2008). En suelo Franco-Arcilloso los niveles estimados de N fueron 1.9 veces mayores que en suelo Franco-Arenoso y 21.6 veces superiores al suelo Arenoso. Los niveles de P fueron 2.7 veces mayores en Franco-Arcilloso con respecto al suelo Franco-Arenoso, y 9.8 veces superiores a los niveles en suelo Arenoso. De igual manera, la proporción de Calcio (Ca) y Magnesio (Mg), también fue mayor en suelo Franco-Arcilloso, con respecto a los demás suelos. Estos resultados colocan al suelo Franco-Arcilloso, como el que mejor

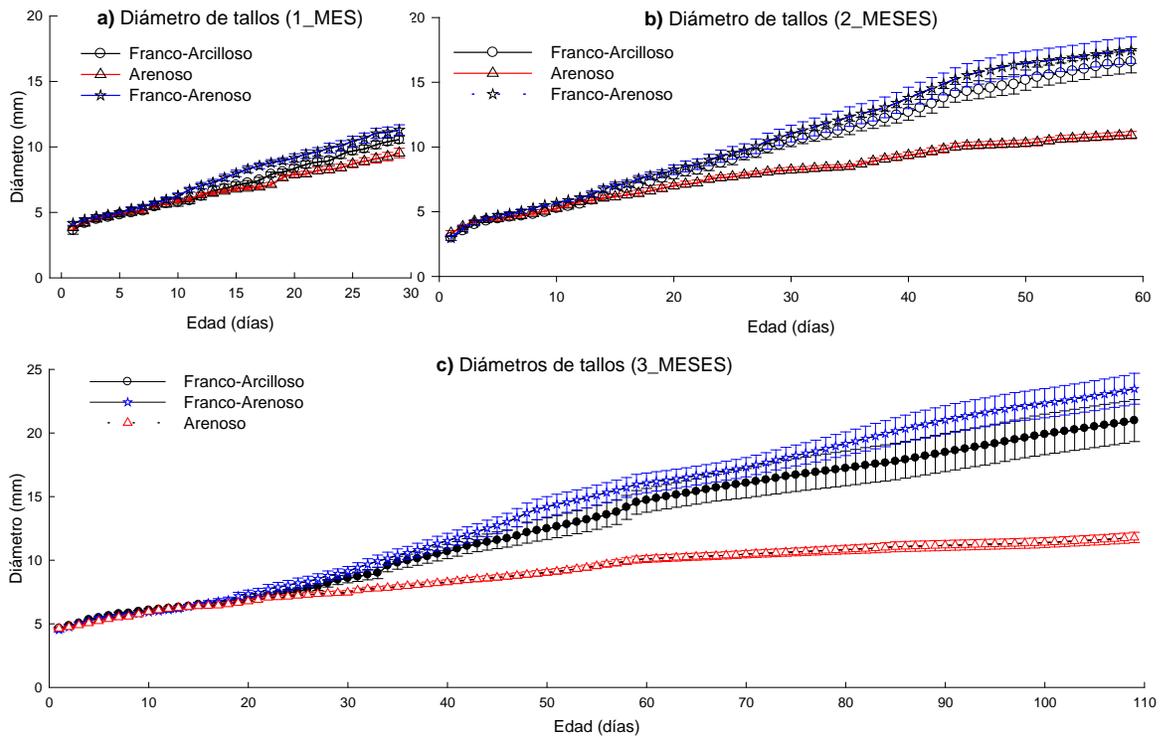
contenido nutricional aportó de los tres tipos de suelos, seguido del suelo Franco-Arenoso y por último, el suelo con menor contenido de nutrientes fue el Arenoso.

### 7.3.2. Monitoreo de variables de crecimiento

**Longitud y diámetro de tallos.** En el experimento de 1\_MES la longitud de tallos fue mayor en sustrato Franco-Arenoso respecto a Franco-Arcilloso, y ésta a su vez fue mayor que en suelo Arenoso, a partir del día 15 en adelante (Holm-Sidak;  $P < 0.05$ ). En los experimentos de 2\_MESES y 3\_MESES la longitud de tallos fue similar entre sustratos Franco-Arcilloso y Franco-Arenoso durante los primeros 32 días ( $t$ ;  $P > 0.095$ ); sin embargo, a partir del día 33 y 36 los tallos en suelo Arenoso fueron menores que los de los otros sustratos (Dunn;  $P < 0.001$ ) para 2\_MESES y 3\_MESES, respectivamente (Figura 7.1). Por su parte, en los tres experimentos el diámetro de los tallos fue similar entre sustratos Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso durante todo el periodo de monitoreo (Kruskall-Wallis;  $P > 0.05$ ); sin embargo, éste fue mayor que el diámetro de tallos en suelo Arenoso a partir del día 25, 26 y 30 para los experimentos 1\_MES, 2\_MESES y 3\_MESES, respectivamente (Figura 7.2). La disminución en desarrollo de tallos en suelo Arenoso se relaciona con bajos niveles de N y P (Bonilla, 2000), condición detectada en este tipo de suelo.

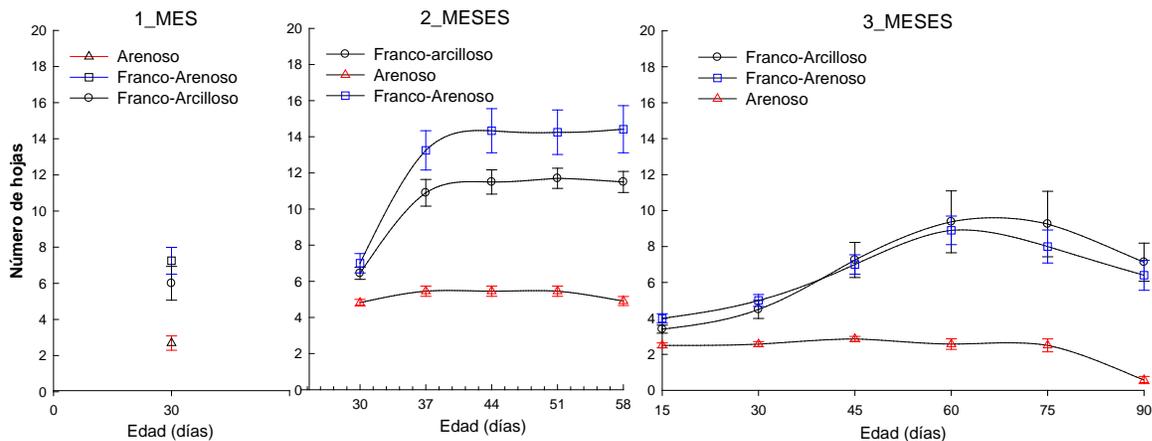


**Figura 7.1.** Curvas de crecimiento promedio ( $\pm EE$ ) de longitud de tallos obtenidas de los experimentos 1\_MES, 2\_MESES y 3\_MESES.



**Figura 7.2.** Curvas de crecimiento promedio ( $\pm$ EE) de diámetros de tallos de los experimentos 1\_MES, 2\_MESES y 3\_MESES.

**Número de hojas, área foliar y clorofila.** En los tres experimentos el número de hojas, el área foliar y los niveles de clorofila medidos fueron similares en sustratos Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso (Dunn;  $P > 0.05$ ), y mayores que en sustrato Arenoso (Dunn;  $P < 0.05$ ) en todos los periodos de monitoreo (30, 60 y 110 días) (Figuras 7.3, 7.4 y 7.5). En suelo Arenoso estas variables incluso disminuyeron conforme la edad de la planta se incrementaba (Figuras 7.3 y 7.4). Condiciones indicativas de los bajos niveles de N detectados en este suelo (Bonilla, 2000).



**Figura 7.3.** Número de hojas promedio ( $\pm$ EE) de los experimentos 1\_MES, 2\_MESES y 3\_MESES.

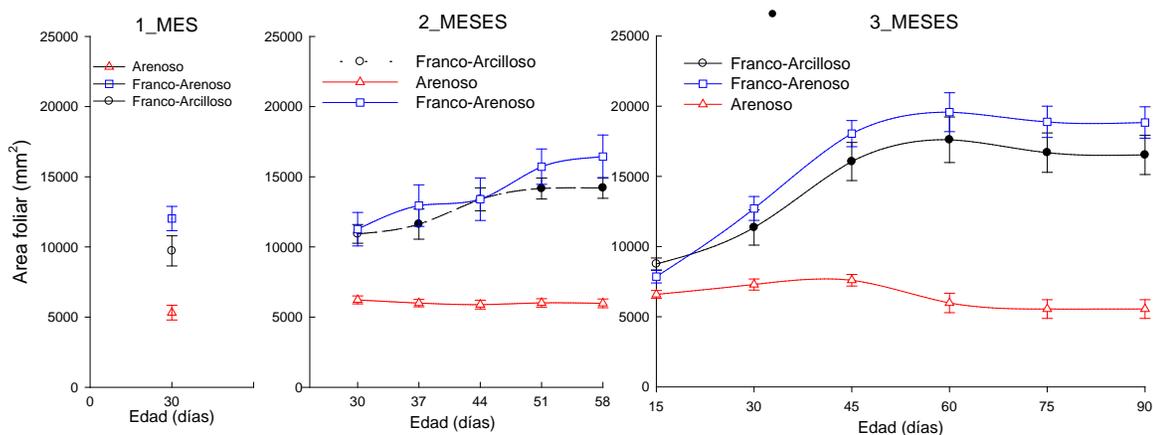


Figura 7.4. Área foliar promedio ( $\pm$ EE) de los experimentos 1\_MES, 2\_MESES y 3\_MESES.

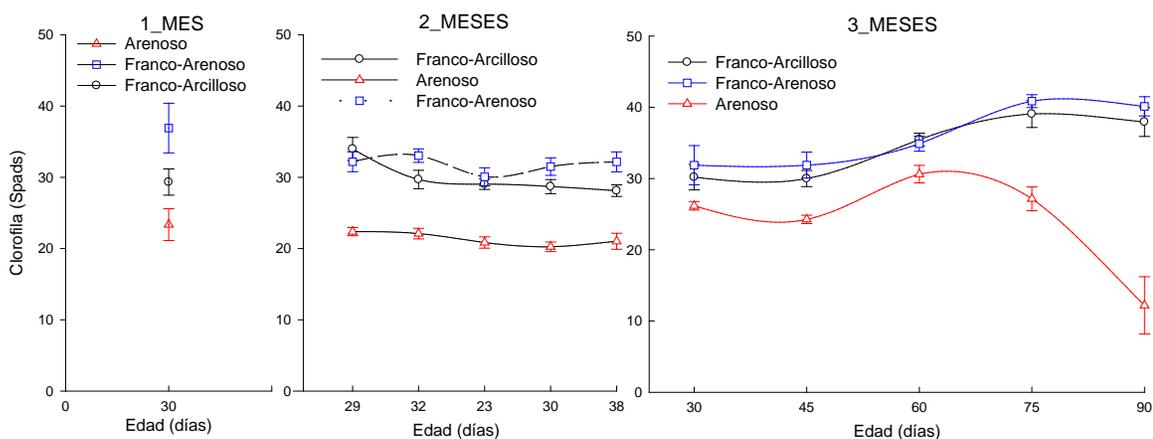


Figura 7.5. Clorofila promedio ( $\pm$ EE) medida durante los experimentos 1\_MES, 2\_MESES y 3\_MESES.

### 7.3.3. Láminas de riego estimadas

El Cuadro 7.3 muestra las láminas promedio semanales para el experimento de 2\_MESES. Al inicio del experimento la mayor demanda se dio en el sustrato arenoso (debido a la mayor porosidad del mismo), sin embargo las últimas dos semanas la mayor demanda se dio en el sustrato Franco-Arenoso. Ya que las plantas localizadas en este sustrato eran las que mayor demanda de agua requirieron por ser las más desarrolladas.

Cuadro 7.3. Láminas de riego promedio semanales (en mm) del experimento 2\_MESES.

Suelo	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
Arenoso	8.09	14.85	17.08	22.87	22.51
Franco-Arenoso	7.72	12.62	20.05	23.39	25.29
Franco-Arcilloso	7.13	13.36	19.30	21.62	22.17

### 7.3.4. Fotosíntesis

La tasa de evapotranspiración y la tasa fotosintética fueron similares en sustratos Franco-Arenosos y Franco-Arcillosos y superiores al sustrato Arenoso (Cuadro 7.4). La tasa de evapotranspiración mayor se registró en el Franco-Arenoso y coincide con la mayor demanda de agua que redituyó en una lámina de riego superior para este sustrato (Cuadro 7.3). La fotosíntesis y evapotranspiración están relacionadas con disponibilidad de humedad en suelo (Jongschaap *et al.*, 2007), por lo que el suelo arenoso y pobre en nutrientes pudo provocar estrés hídrico en las plantas, lo que contribuyó a la disminución y terminación precoz del crecimiento; formación de yemas en reposo, y disminución en tamaño de hojas (Azcón-Bieto y Talón, 2000), condiciones que se observaron en las plantas localizadas en este suelo (Cuadro 7.5).

**Cuadro 7.4.** Tasas fotosintéticas promedio ( $\pm$ ) del experimento 2\_MESES en plantas de *Jatropha curcas* de 55 días de edad.

Sustratos	Tasa fotosintética ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{-s}^{-1}$ )	Conductancia estomática de $\text{H}_2\text{O}$ ( $\text{mol m}^{-2}\text{-s}^{-1}$ )	tasa de evapotranspiración $\text{mmol m}^{-2}\text{-s}^{-1}$
Arenoso	10.59 $\pm$ 5.22 b	11.5 $\pm$ 2.4 b	1.77 $\pm$ 0.37 b
Franco-Arenoso	22.85 $\pm$ 1.20 a	0.18 $\pm$ 0.11 a	4.08 $\pm$ 0.41 a
Franco-Arcilloso	22.68 $\pm$ 4.39 a	0.51 $\pm$ 0.41 ab	3.32 $\pm$ 0.96 a

<sup>a,b</sup> Las medias en las columnas que no comparten la misma letra son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).

### 7.3.5. Medidas a la extracción de las plántulas

**Medidas aéreas.** Para los tres experimentos las plantas localizadas en sustratos Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso registraron mayor crecimiento respecto a las localizadas en suelo Arenoso (Cuadro 7.5). La disminución en tamaño y pérdida de hojas observados en plantas de 110 de edad se consideran adaptaciones para sobrevivir en suelos áridos (Brittaine y Litaladio, 2010).

**Cuadro 7.5.** Medidas aéreas promedio ( $\pm$ ) de plantas de *J. curcas* obtenidas en los experimentos 1\_MES, 2\_MESES y 3\_MESES.

Sustrato	Longitud de tallos (mm)	Diámetro de tallos (mm)	Número de hojas	Área foliar $\text{cm}^2$	Clorofila (spads)	Número de ramas
<b>Mayo 10</b>						
(Edad:30 días)						
Arenoso	124.8 $\pm$ 19 c	9.8 $\pm$ 1.5 b	2.7 $\pm$ 1.4 c	53.7 $\pm$ 18.7 b	23.4 $\pm$ 2.2 b	0.15 $\pm$ 0.13 b
Franco-Arenoso	226.5 $\pm$ 35 a	11.7 $\pm$ 1.7 a	7.3 $\pm$ 2.5 a	121.5 $\pm$ 29.7 a	36.9 $\pm$ 12.7 a	0.75 $\pm$ 0.74 b
Franco-Arcilloso	178.6 $\pm$ 23 b	10.8 $\pm$ 0.7 ab	6.0 $\pm$ 3.3 ab	99.7 $\pm$ 39.8 a	29.3 $\pm$ 6.6 a	1.85 $\pm$ 0.69 a
<b>Octubre 10</b>						
(Edad:60 días)						
Arenoso	119.2 $\pm$ 12.5 b	11.5 $\pm$ 2.4 b	4.4 $\pm$ 0.5 b	57.2 $\pm$ 7.7 b	20.5 $\pm$ 2.2 b	0.0 $\pm$ 0.0 b
Franco-Arenoso	306.4 $\pm$ 66.2 a	20.4 $\pm$ 3.4 a	14.8 $\pm$ 4.5 a	155.9 $\pm$ 50.7 a	31.5 $\pm$ 4.2 a	1.3 $\pm$ 0.9 a
Franco-Arcilloso	253.3 $\pm$ 52.2 a	18.3 $\pm$ 3.3 a	11.2 $\pm$ 1.7 a	137.7 $\pm$ 21.3 a	28.7 $\pm$ 3.3 a	1.0 $\pm$ 0.9 a
<b>Septiembre 10</b>						
(Edad:110 días)						
Arenoso	209.4 $\pm$ 26.6 b	12.12 $\pm$ 1.6 b	0.5 $\pm$ 0.7 b	29.5 $\pm$ 1.9 b	28.5 $\pm$ 5.8 b	0.0 $\pm$ 0.0 a
Franco-Arenoso	380.2 $\pm$ 88.7 a	23.4 $\pm$ 3.3 a	7.0 $\pm$ 2.1 a	223.0 $\pm$ 45.4 a	40.1 $\pm$ 4.0 a	0.1 $\pm$ 0.3 a
Franco-Arcilloso	361.6 $\pm$ 72.7 a	23.1 $\pm$ 2.9 a	6.8 $\pm$ 2.9 a	178.7 $\pm$ 54.9 a	36.7 $\pm$ 4.9 a	0.5 $\pm$ 1.2 a

<sup>a,b</sup> Las medias en las columnas que no comparten la misma letra son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).

**Sistema de raíces.** En los tres experimentos el orden de las raíces y las longitudes de las pivotantes fueron similares en los tres sustratos ( $P > 0.05$ ), aunque las raíces laterales fueron menores en plantas de un mes en sustrato Franco-Arcilloso; mientras que los diámetros de las cinco raíces principales fueron siempre mayores en suelos Franco-Arenosos y Franco-Arcillosos, que en suelos Arenosos ( $P < 0.05$ ) (Cuadro 7.6). Lo cual indica que las raíces de *J. curcas* desarrollaron mejor en suelos Franco-Arenosos y Franco-Arcillosos, con mayor contenido nutricional y mejor capacidad de retención de humedad; mientras que las raíces en suelo Arenoso, pobre en nutrientes, sacrificaron grosor por elongación, para cubrir áreas mayores, una característica de su adaptación a suelos pobres, tal como lo reportan Jongschaap *et al.*, (2007) y Brittain y Lutaladio, 2010. Sin embargo, el buen desarrollo obtenido en un suelo pesado, como el Franco-Arcilloso, contrasta con Ouwens *et al.*, (2007), quienes reportaron dificultades en el crecimiento de raíces en este tipo de suelos.

**Cuadro 7.6.** Medidas promedio ( $\pm$ •) de raíces principales de plantas de *J. curcas* obtenidas en los experimentos 1\_MES, 2\_MESES y 3\_MESES.

Sustrato	Longitud pivotante (mm)	Longitud laterales (mm)	Diámetro pivotante (mm)	Diámetro laterales (mm)	Orden máximo de raíces
<b>Mayo 10</b> (Edad:30 días)					
Arenoso	287.5 $\pm$ 139.5 <b>a</b>	346.5 $\pm$ 107.4 <b>a</b>	4.7 $\pm$ 1.0 <b>b</b>	2.7 $\pm$ 0.9 <b>b</b>	4.3 $\pm$ 0.5 <b>a</b>
Franco-Arenoso	358.0 $\pm$ 166.6 <b>a</b>	346.2 $\pm$ 94.7 <b>a</b>	5.7 $\pm$ 1.4 <b>ab</b>	3.4 $\pm$ 0.8 <b>a</b>	4.7 $\pm$ 0.5 <b>a</b>
Franco-Arcilloso	270.6 $\pm$ 82.8 <b>a</b>	223.6 $\pm$ 77.9 <b>b</b>	6.4 $\pm$ 1.7 <b>a</b>	2.8 $\pm$ 0.3 <b>ab</b>	4.5 $\pm$ 0.5 <b>a</b>
<b>Octubre 10</b> (Edad:60 días)					
Arenoso	351.5 $\pm$ 142.1 <b>a</b>	404.1 $\pm$ 119.2 <b>a</b>	8.4 $\pm$ 1.6 <b>b</b>	3.2 $\pm$ 0.9 <b>b</b>	4.0 $\pm$ 0.4 <b>a</b>
Franco-Arenoso	313.8 $\pm$ 78.8 <b>a</b>	413.3 $\pm$ 56.6 <b>a</b>	11.7 $\pm$ 3.4 <b>ab</b>	7.8 $\pm$ 2.0 <b>a</b>	4.6 $\pm$ 0.5 <b>a</b>
Franco-Arcilloso	302.5 $\pm$ 66.9 <b>a</b>	394.0 $\pm$ 70.7 <b>a</b>	12.8 $\pm$ 2.6 <b>a</b>	6.9 $\pm$ 1.9 <b>a</b>	4.7 $\pm$ 0.5 <b>a</b>
<b>Septiembre 10</b> (Edad:110 días)					
Arenoso	360.7 $\pm$ 85.1 <b>a</b>	277.4 $\pm$ 85.1 <b>a</b>	8.3 $\pm$ 1.3 <b>b</b>	3.0 $\pm$ 0.3 <b>b</b>	4.0 $\pm$ 0.5 <b>a</b>
Franco-Arenoso	390.7 $\pm$ 95.9 <b>a</b>	323.0 $\pm$ 109.4 <b>a</b>	20.1 $\pm$ 4.4 <b>a</b>	4.8 $\pm$ 1.9 <b>a</b>	5.0 $\pm$ 0.4 <b>a</b>
Franco-Arcilloso	411.1 $\pm$ 72.2 <b>a</b>	375.0 $\pm$ 146.4 <b>a</b>	19.7 $\pm$ 3.2 <b>a</b>	5.2 $\pm$ 1.3 <b>a</b>	4.6 $\pm$ 0.5 <b>a</b>

<sup>a,b</sup> Las medias en las columnas que no comparten la misma letra son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).

**Peso seco.** Las plantas en sustrato Arenoso tuvieron pesos menores en hojas en todos los experimentos. Aunque el peso seco de raíces y tallos en sustrato Arenoso fue similar al sustrato Franco-Arcilloso en plantas de un mes de edad ( $P > 0.05$ ); pero fue menor respecto a los otros sustratos (Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso) en plantas de dos y tres meses de edad ( $P < 0.05$ ); mientras que los pesos secos de raíces, tallos y hojas se hicieron similares en sustratos Franco-Arenoso y Franco-arcilloso a los dos y tres meses de edad (Cuadro 7.7). Lo cual indica que, por principio las plantas podrían desarrollar mejor en suelos ligeros, como el Franco-Arenoso (Valdés *et al.*, 2011b), respecto a suelos pesados, como el Franco-Arcilloso. Sin embargo, después de establecerse en ambos suelos, sus capacidades de desarrollo son similares. Por su parte, el suelo Arenoso dificultó e inhibió el desarrollo de la plantas entre los dos y tres meses de edad.

**Cuadro 7.7.** Peso seco promedio ( $\pm$ ) de plantas de *J. curcas* obtenidas en los experimentos 1\_MES, 2\_MESES y 3\_MESES.

Experimento	Sustrato	Raíces (g)	Tallos (g)	Hojas (g)	Peso total (g)
Mayo 10 (Edad:30 días)	Arenoso	0.52 $\pm$ 0.04 b	1.35 $\pm$ 0.09 b	0.92 $\pm$ 0.06 b	2.80 $\pm$ 0.18 c
	Franco-Arenoso	1.21 $\pm$ 0.09 a	2.56 $\pm$ 0.25 a	2.24 $\pm$ 0.10 a	6.01 $\pm$ 0.18 a
Octubre 10 (Edad:60 días)	Franco-Arcilloso	0.74 $\pm$ 0.02 ab	1.93 $\pm$ 0.03 ab	1.81 $\pm$ 0.06 a	4.48 $\pm$ 0.03 b
	Arenoso	1.04 $\pm$ 0.32 b	2.50 $\pm$ 0.59 b	1.05 $\pm$ 0.18 b	4.59 $\pm$ 1.02 b
	Franco-Arenoso	4.41 $\pm$ 2.09 a	12.95 $\pm$ 5.57 a	9.46 $\pm$ 3.29 a	26.83 $\pm$ 10.33 a
Septiembre 10 (Edad:110 días)	Franco-Arcilloso	4.81 $\pm$ 2.34 a	9.34 $\pm$ 4.37 a	7.11 $\pm$ 1.87 a	21.26 $\pm$ 6.87 a
	Arenoso	0.61 $\pm$ 0.20 b	2.47 $\pm$ 1.09 b	0.10 $\pm$ 0.15 b	3.17 $\pm$ 1.24 b
	Franco-Arenoso	5.33 $\pm$ 1.74 a	18.60 $\pm$ 6.48 a	5.67 $\pm$ 2.39 a	29.59 $\pm$ 9.80 a
	Franco-Arcilloso	5.34 $\pm$ 3.02 a	19.22 $\pm$ 5.48 a	5.45 $\pm$ 2.85 a	30.01 $\pm$ 11.01 a

<sup>a,b</sup> Las medias en las columnas que no comparten la misma letra son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).

Los resultados obtenidos muestran que el crecimiento de las plántulas de *J. curcas* fue diferente en cada sustrato, conforme lo estableció la hipótesis. El suelo arenoso, muy pobre en nutrientes, produjo un crecimiento muy bajo e incluso inhibición del mismo; sin embargo, las plántulas desarrollaron bien en suelo Franco-Arenoso, con un bajo a mediano contenido de nutrientes, y no manifestaron mayor desarrollo en el suelo más rico (Franco-Arcilloso). A este respecto, en el capítulo IV y el [Cuadro 4.5](#) se documentó que las accesiones en suelos franco-arenosos produjeron pesos y tallas de semillas mayores que las de suelos arenosos. Por lo que, aunque las procedencias nativas de *J. curcas* se han localizado en el estado de Veracruz en los tres tipos de suelo aquí utilizados (Valdés *et al.*, 2011a), posiblemente el suelo Franco-Arenoso, de consistencia ligera, y su contenido de nutrientes, provee las condiciones más adecuadas para las que esta especie está adaptada (Grime, 1989).

## 7.4. Conclusiones

Las aseveraciones de que *J. curcas* es una especie que prefiere suelos ligeros y que está adaptada a condiciones marginales es limitadamente cierta. Las procedencias del trópico mexicano aquí analizadas manifestaron características morfológicas de adaptación a suelos muy poco fértiles, donde algunas de ellas sobreviven de manera natural en el estado de Veracruz. Sin embargo, su crecimiento fue muy limitado, comparado con plántulas en suelos de mayor fertilidad. En este sentido, se encontró que las plantas desarrollaron bien tanto en suelos ligeros como pesados, mostrando una amplia adaptabilidad a los sustratos. Por lo que se considera que *J. curcas*, aunque puede establecerse en diversos tipos de suelos, no tendría un buen desempeño con fines comerciales en suelos pobres, o bien requeriría de suplementos nutricionales adicionales para lograrlo.

## VIII. Desarrollo del sistema de raíces de *Jatropha curcas* en diferentes sustratos

### 8.1. Introducción

Un aspecto importante, pero poco considerado en el estudio de *Jatropha curcas*, se centra en su sistema de raíces y la relación del mismo con los suelos donde se encuentra (Achten *et al.*, 2007). El desarrollo de este sistema está en función de la capacidad de la planta para adaptarse al medio donde se encuentra y como consecuencia impacta sobre el desempeño de las partes aéreas, tales como brotes y frutos (Costes *et al.* 2006). Determinar patrones de distribución, peso y profundidad de las raíces permiten relacionar las condiciones edafológicas para las que la especie está mejor adaptada y, por tanto, su desempeño en los tipos de suelo y climas donde se encuentre (Atkinson, 2000). Otro factor fuertemente relacionado con la productividad de una planta es la tasa de crecimiento de sus raíces, que a su vez se encuentra relacionada con la división y el crecimiento celular (Dubrovsky *et al.*, 1998). Debido a ello, conocer el ciclo de división celular de esta especie nos permitiría estimar su potencial productivo bajo condiciones de manejo (Nobel, 1996). En México los cultivos comerciales de *J. curcas* son recientes (Gómez, 2010) y aun no se han publicado estudios precisos sobre el comportamiento de su sistema de raíces en estos suelos; principalmente porque no existen documentos científicos sobre el desempeño de las plantaciones comerciales establecidas en estas zonas; ya que hasta hace pocas décadas la especie tenía un bajo interés comercial para los productores de su región de origen (Schmook y Sanchez, 2000). Dados estos antecedentes, en este trabajo se intentó determinar las tasas y los patrones de crecimiento del sistema de raíces de *J. curcas* desde su germinación en tres diferentes tipos de suelo.

#### 8.1.1. Objetivos

- Determinar la tasa y los patrones de crecimiento del sistema de raíces en plántulas de *Jatropha curcas* a partir de su germinación en tres diferentes tipos de suelo.
- Determinar el sustrato que proporciona las mejores condiciones para el desarrollo del sistema de raíces de *Jatropha curcas*.

#### 8.1.2. Hipótesis

El crecimiento del sistema de raíces de *Jatropha curcas* es diferente en los tres tipos de suelo.

## 8.2. Materiales y métodos

Este estudio se dividió en dos partes: la primera, para caracterizar y determinar el crecimiento de la especie y sus raíces en relación con los sustratos; y la segunda para evaluar la morfología de las raíces en los tres tipos de suelo aplicando microscopía óptica.

### 8.2.1. Caracterización y crecimiento de raíces en diferentes sustratos

La caracterización y estimación de crecimiento y ciclo de división celular de las raíces se pueden obtener por diversos métodos químicos bajo condiciones de laboratorio (Webster, 1980). Sin embargo, esta aproximación no es aplicable en sistemas localizados bajo condiciones naturales debido a las distorsiones ambientales sobre los reactivos utilizados (Ivanov y Dubrovsky, 1997). Adicionalmente, para un cultivo con intereses comerciales, como es el caso de *J. curcas*, es importante conocer su potencial productivo bajo las condiciones de los suelos donde se le desea cultivar. Una metodología para calcular el ciclo de división celular basado en la tasa de producción celular (RCP –por sus siglas en inglés) de sistemas de raíces localizados en sus ambientes naturales fue propuesta por Ivanov y Dubrovsky (1997) y se aplicó exitosamente en plantas cactáceas del desierto de Sonora. La propuesta RCP considera los siguientes factores como requisitos indispensables para poder implementarla: 1) Determinar que el sistema cumple con el modelo clásico de estructura de la cofia de la raíz, con sus tres zonas distintivas, meristemo, zona de elongación y zona de maduración (Ishikawa y Evans, 1995); lo que permite analizar fácilmente los grupos de células individuales con ciertas regulaciones (Barlow, 1976). 2) Determinar el periodo de crecimiento estable o lineal, en donde la tasa de crecimiento se mantiene uniforme por un cierto lapso de tiempo. 3) Poder identificar y cuantificar las células meristemáticas durante el periodo estable de crecimiento, ya que en esta etapa el periodo de división celular también se mantiene constante (Ivanov y Dubrovsky, 1997). Para el caso de *J. curcas* aun no se tienen antecedentes sobre la estructura de su cofia ni de la determinación del periodo de crecimiento estable o lineal, por lo que se requiere validar la factibilidad de cada paso a fin de proceder a la aplicación de esta técnica. En este trabajo se presenta la caracterización de las raíces principales de *J. curcas* durante los primeros siete días después de la emergencia, por ser el periodo cuando se puede observar mejor el crecimiento del mismo.

#### 8.2.1.1. Descripción morfológica del sistema de raíces de *Jatropha curcas*

El sistema de raíces de *J. curcas* emerge a partir de la semilla con una estructura geométrica predecible (en ausencia de distorsiones que lo alteren), que consiste en una raíz central o pivotante y cuatro raíces laterales, todas ellas permanentes (Heller, 1997; Achten *et al.*, 2007). Dado que durante los experimentos desarrollados en esta investigación se ha observado que la iniciación de las cuatro laterales ocurre en un periodo menor a 24 horas, en esta investigación se estudiaron las cinco raíces principales.

### 8.2.2. Determinación de curvas de crecimiento de sistema de raíces

Para conocer la zona de crecimiento estable se requiere determinar el periodo de tiempo donde las raíces crecen de manera lineal (Ivanov y Dubrovsky, 1997). Dicho periodo se obtiene al graficar las curvas de crecimiento acumulativo de la elongación de las raíces del sistema durante un lapso de observación que comprende desde el inicio de la emergencia de la radícula hasta que su crecimiento se ve suspendido o en reposo (Conversación personal con Dubrovsky, 2010). Con la finalidad de determinar si existe un periodo de crecimiento estable y si éste es similar en tres tipos de suelos diferentes, se monitorearon los primeros siete días después de la emergencia, y se trazaron las curvas de crecimiento correspondiente al crecimiento aéreo y a las cinco raíces principales. Se consideró también que durante los primeros días de la emergencia las plántulas obtienen nutrientes de sus reservas almacenadas en los cotiledones. Para ello se llevó registro del día en que las plántulas agotaban sus reservas en cotiledones. Situación que se determinó cuando éstos se desprendieron totalmente de la planta.

#### 8.2.2.1. Condiciones ambientales y material vegetal

El experimento se inició y concluyó en el mes de Septiembre del 2009. La selección de las semillas se realizó con base en el peso promedio de las colecta  $\pm 50$  mg. Los datos y condiciones ambientales se indican en el Cuadro 8.1.

**Cuadro 8.1.** Condiciones experimentales para determinar vigor en diferentes sustratos.

Periodo de experimentación	Pesos de las semillas (mg)	Procedencia y cosecha de las semillas	Condiciones ambientales		
			T Mínima ° C	T Máxima ° C	% Humedad
Septiembre 2009	750 $\pm$ 50	Papantla, 20°15'17"N, 97°15'32"O; 71 msnm. Cosecha: Enero, 2009	23.0	31.9	63.8

#### 8.2.2.2. Diseño experimental y consideraciones particulares

El diseño fue completamente al azar, con un factor sustrato y tres niveles: Arenoso, Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso. Se colocaron 64 semillas por sustrato. Para visualizar el crecimiento del sistema de raíces las semillas se colocaron en forma vertical, con carúncula hacia abajo, pegadas a la pared de recipientes plástico transparentes de 10 cm de diámetro por 14 cm de fondo (Figura 8.1).

#### 8.2.2.3. Monitoreo de las raíces

Diariamente y a la misma hora se registró con marcador de tinta indeleble el segmento desarrollado durante el periodo de tiempo comprendido entre las observaciones. Los incrementos en longitud de raíces se midieron con cinta métrica flexible (1mm de precisión). Cada plántula fue monitoreada desde su germinación hasta siete días después de su emergencia.



**Figura 8.1.** Minirizotrones y marcado de raíces de *Jatropha curcas* en sustrato Arenoso (izquierda), Franco-Arenoso (centro) y Franco-arcilloso (derecha).

#### 8.2.2.4. Obtención de las curvas de crecimiento

Las curvas de crecimiento de tallos y raíces se obtuvieron de las sumatorias de los incrementos promedio diarios registradas por categoría de raíces (las cuatro laterales y la pivotante). La ecuación que representa la obtención de cada punto de la curva está dada por:

$$\bar{Y} = \sum_{i=1}^k \bar{X}_i \quad (8.1)$$

Donde:  $\bar{Y}$  = Es el valor final de la variable  $Y$  del elemento  $X$  al día  $i$ .

$\bar{X}_i$  = El incremento del elemento  $X$  el día  $k$ .

#### 8.2.2.5. Modelado de las curvas de crecimiento

Para determinar el modelo que mejor se ajustara a las curvas de crecimiento obtenidas se aplicó la metodología del Índice de Sitio (IS), definido como el promedio de la longitud mayor alcanzada en periodo de tiempo dado (Carrero *et al.*, 2008). El IS utilizado correspondió a la longitud obtenida con la edad máxima medida al final del periodo de muestreo. Posteriormente se probaron cuatro modelos reparametrizados al IS (Schumacher, Gompertz, Monomolecular y Logístico). Se utilizó esta metodología y modelos por ser de amplia aplicación en el área biológica y forestal (Vercambre *et al.*, 2003; Montero y Kanninen, 2003; Rodríguez y Arteaga, 2005; Carrero *et al.*, 2008; Hernández, 2010). Las ecuaciones que definen los modelos se muestran en el [Apéndice B.4](#).

#### 8.2.2.6. Validación de los modelos

Para determinar el modelo con mejor ajuste a las curvas se utilizó una adaptación de la fórmula del coeficiente de determinación para regresión múltiple (Zar, 1999):

$$R^2 = \frac{\text{Regresión SS}}{\text{Total SS}} \Rightarrow 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (8.2)$$

Donde:

$R^2$  = Valor del coeficiente de determinación, con máximo ajuste en 1 y mínimo en cero.

N = Número de observaciones.

$y_i$  = Observaciones

$\hat{y}_i$  = Valores estimados por el modelo.

$\bar{y}$  = Valor promedio de las observaciones.

### **8.2.3. Determinación de la zona de crecimiento estable**

Para determinar las curvas de crecimiento detallado anteriormente se consideraron las observaciones del experimento Septiembre-2009. Dichas observaciones mostraron una zona de crecimiento estable que ocurre entre el segundo y el cuarto día después de la emergencia de la radícula. Por lo que se eligieron los días tercero y cuarto como periodo de crecimiento estable del sistema de raíces de *J. curcas*.

#### **8.2.3.1. Sitio experimental y condiciones ambientales**

El experimento denominado Mayo-2010 se llevó a cabo en el sitio Xalapa ([Apéndice C.4](#)), iniciando el 15 de mayo del 2010, con la siembra de las primeras semillas y concluyendo el 10 de Junio del 2010. Para evitar afectaciones por lluvias y vientos fuertes los individuos bajo experimentación se ubicaron dentro de una estructura de 3 m x 3 m y 1.75 m de altura, cubierta con polietileno transparente con dos paredes opuestas descubiertas, para permitir el acceso y el intercambio de gases. Las condiciones ambientales promedio registradas en el sitio y durante el periodo fueron: temperaturas mínima y máxima de 15.25° C y 34.4° C respectivamente, y humedad relativa 83.4%.

#### **8.2.3.2. Selección de los sustratos**

Los sustratos seleccionados fueron: Arenoso, Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso. El origen y las propiedades de los mismos se muestran en las secciones [A.2-A.4](#) del apéndice A.

#### **8.2.3.3. Selección y preparación del material vegetativo**

Las semillas utilizadas corresponden a la colecta de Septiembre del 2009 de la región de Papantla, Veracruz (20° 15' 17" LN; 97° 15' 32" LO; 71 msnm). Para obtener mayor uniformidad en las plántulas, las semillas fueron seleccionadas por encontrarse dentro del margen de los pesos promedio  $\pm$  la desviación estándar de la curva de distribución normal. Este rango correspondió a 773.1 mg  $\pm$  79.9 mg. Las semillas fueron sumergidas en solución con yodo al 4% durante una hora, para prevenir el ataque de patógenos que impidieran la germinación o distorsionaran las raíces.

#### **8.2.3.4. Diseño experimental y consideraciones especiales**

El experimento fue completamente al azar, con el factor suelo consistente de tres tratamientos y 20 sujetos por tratamiento. Los tratamientos fueron: suelo Arenoso, Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso. Se colocaron dos semillas por contenedor, cada una en un extremo opuesto de un

recipiente cilíndrico de PET transparente con un promedio de 11 cm de diámetro y 22 cm de largo, utilizado a manera de rizotrófon, y lleno con el sustrato correspondiente (Figura 8.1). Los recipientes fueron cubiertos en sus extremos con papel aluminio para evitar penetración de la luz. Las semillas y plántulas emergentes fueron hidratadas diariamente, procurando mantener visualmente la humedad requerida, dependiendo del sustrato donde se encontraban. Después de su emergencia, las plántulas fueron monitoreadas cada 24 horas y el incremento de la elongación de cada raíz se marcó con tinta permanente sobre la superficie del recipiente. Los elementos que no presentaron crecimiento uniforme fueron descartados y se agregaron más semillas para completar el número de muestras establecido.

#### **8.2.3.5. Medidas e instrumentos de medición**

Longitudes de tallos y raíces fueron medidas con cinta métrica (precisión 1 mm) y diámetros de tallos y raíces fueron medidos con vernier digital (precisión 0.01 mm).

#### **8.2.3.6. Preparación de las muestras**

Conforme lo establece la metodología RCP (Ivanov y Dubrovsky, 1997), una vez determinada la zona de crecimiento estable, se procedió a colectar los extremos de las cinco raíces principales de cada plántula, colectándose muestras de 10 sujetos para el tercer y cuarto día, respectivamente. Las muestras fueron lavadas con agua corriente para eliminar residuos de los sustratos donde se encontraban. A continuación se cortaron las puntas de cada raíz a una distancia entre 10 mm a 15 mm del extremo. Para lograr una mejor visualización del tejido bajo el microscopio se aplicó el método de aclaración propuesto por Dubrovsky *et al.* (2009). El proceso consistió en sumergir primeramente las raíces en una solución fijadora a base de 4% de formaldehído y un buffer fosfato de 0.025 M (pH 7.2) por un lapso de 12 horas a una temperatura de 5° C (Figura 2b). Posteriormente se reemplazó la solución fijadora con una solución estabilizadora compuesta por 30% (aq. v/v) de glicerol y 2% (v/v) de dimetil sulfóxido (DMSO) y se mantuvieron las muestras en la misma por un periodo de 35 minutos. Finalmente se cambió esta solución por un aclarador elaborado con 0.04g de Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y 17g de NaI vertidos en 65% (v/v) de glicerol y 2%(v/v) de DMSO. Se mantuvo el material por un periodo de una hora antes de proceder a su observación en microscopio óptico. Un procedimiento alternativo para aclarar se utilizó también aplicando HCl al 5% durante cinco minutos a temperatura de 40° C.

#### **8.2.3.7. Determinación de la duración del ciclo celular**

La técnica RCP requiere la identificación y el conteo de las células meristemáticas durante la etapa de crecimiento lineal (Ivanov y Dubrovsky, 1997). El material colectado del tercer y cuarto día fue observado en microscopio óptico, donde se trató de determinar la ubicación del meristemo apical y las células meristemáticas para su conteo y cálculo del periodo.

## 8.2.4. Análisis del sistema de raíces en diferentes sustratos mediante escáner y microscopio electrónico de barrido

### 8.2.4.1. Sitio experimental y condiciones ambientales

Se establecieron dos experimentos. El primero, denominado Octubre-2010, en el sitio Inecol ([Apéndice C.3](#)), inició el 2 de Octubre del 2010, con la siembra de las semillas y concluyó el 10 de Diciembre del 2010. El segundo experimento, etiquetado como Agosto-2011, se estableció en el Sitio Xalapa ([Apéndice C.4](#)) e inició el 2 de Agosto del 2011, con la siembra de las semillas y concluyó el 5 de Septiembre del 2011. Las condiciones ambientales registradas durante los experimentos se muestran en el [Cuadro 8.2](#).

**Cuadro 8.2.** Condiciones ambientales promedio registradas durante el experimento.

Experimento	Temperatura máx. °C	Temperatura mín. °C	% de Humedad
Octubre-2010	35.2	18.1	83.4
Agosto-2011	26.5	15.7	79.2

### 8.2.4.2. Selección de los sustratos

Para el experimento Octubre-2010 los sustratos se categorizaron visualmente en: Arenoso, Franco y Arcilloso. Para el experimento Agosto-2011 los sustratos fueron caracterizados en: Arenoso, Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso ([Apéndice A.2](#)). A cada sustrato se le determinó el pH por el método potenciométrico y el contenido de materia orgánica (M.O.) por el método de Walkley-Black. La procedencia, usos y propiedades de los sustratos se muestran en el [Cuadro 8.3](#).

**Cuadro 8.3.** Procedencias y propiedades de los sustratos.

Exper.	Sustrato	Uso de suelo	Posible origen y procedencia	pH	% M. O.
Octubre-2010	Arenoso	Ninguno	Arena de río, alrededores de Xalapa, Ver.	5.6	0.190
	Franco	Jardinería	Jardín botánico del sitio Inecol ( <a href="#">Apéndice C.3</a> )	7.0	6.793
	Arcilloso	Ninguno	Cerro ubicado en sitio Xalapa ( <a href="#">Apéndice C.4</a> )	6.2	0.521
Agosto-2011	Arenoso	Ninguno	Duna natural, Veracruz, Ver.	7.98	0.168
	Franco-Arenoso	Ninguno	Bajos del sitio Colpos ( <a href="#">Apéndice C.1</a> )	7.26	1.824
	Franco-Arcilloso	Ninguno	Bajos inundables del sitio Colpos ( <a href="#">Apéndice C.1</a> )	7.43	3.397

### 8.2.4.3. Diseño experimental y consideraciones

Cada experimento consistió de un factor sustrato con tres tratamientos correspondientes al tipo de suelo evaluado (Octubre-2010: Arenoso, Franco, Arcilloso, y Agosto-2011: Arenoso, Franco-Arenoso, Franco-Arcilloso). 15 semillas se distribuyeron al azar por sustrato colocado en bolsas de polietileno de 10cm x 15cm. Los individuos germinados fueron hidratados cada dos días. Para el experimento Octubre-2010 las plántulas se mantuvieron en el sitio durante dos meses. Para el experimento Agosto-2011 las plántulas se mantuvieron en el sitio un mes.

#### **8.2.4.4. Registros de variables de crecimiento**

Durante el experimento Octubre-2010 las plantas fueron monitoreadas cada dos días durante el primer mes y se tomaron las alturas de los tallos desde la base hasta el inicio de la última hoja. Al desenterrarse se tomaron las alturas finales y los diámetros en la base del tallo.

#### **8.2.4.5. Análisis del sistema de raíces mediante imágenes escaneadas**

Para el experimento Octubre-2010, con un promedio de 53 días posteriores a su germinación, se procedió a seleccionar dos plántulas por sustrato para extraerlas y tomar sus medidas aéreas. Las plantas extraídas fueron seleccionadas basándose en la uniformidad de su tamaño; descartando así las más pequeñas y las más grandes de los ejemplares disponibles. Los ejemplares se extrajeron de sus sustratos y se les tomaron medidas aéreas de su altura y diámetros de los tallos. Posteriormente fueron lavados con agua corriente para eliminar residuos de tierra de sus sistemas de raíces. Las raíces se colocaron en cajas de acrílico adaptadas al sistema WinRhizo para ser escaneadas con una resolución de 300 dpi. Las imágenes escaneadas se analizaron aplicando el programa de WinRhizo.

#### **8.2.5. Análisis del sistema de raíces mediante microscopio electrónico de barrido**

**Experimento Octubre-2010.** Con un promedio de 56 días posteriores a su germinación se procedió a seleccionar cuatro plántulas por cada sustrato para extraer su sistema radicular y desprender las puntas de las raíces con una longitud de 1.5 cm. Las muestras fueron lavadas para eliminar el exceso de tierra y se colocaron sobre portaobjetos para ser llevadas a bajo vacío (4 Pa-10 Pa) en la cámara del microscopio marca JEOL para extraerles la humedad sin perder contenidos de sustrato. Todas las muestras se sometieron a sombreado con Oro-Paladio para mejorar su conductividad y permitir una mejor visualización de las imágenes. A continuación las muestras se sometieron al alto vacío ( $1 \times 10^{-4}$  TOR) dentro de la cámara del microscopio de barrido y se procedió a tomar las fotografías.

**Experimento Agosto-2011.** Por cada sustrato se seleccionaron dos plántulas con un promedio de edad de un mes. Los ejemplares fueron desenterrados y se seleccionaron las puntas de dos raíces principales por cada sustrato, con una longitud de 1.5 cm. Las muestras fueron lavadas para eliminar el exceso de tierra y se colocaron dentro de microtubos de 1.5 mm. Los tubos fueron llenados con alcohol etílico al 10%, donde permanecieron 20 minutos, para posteriormente ser desalojado el alcohol y ser reemplazado por alcohol al 20%, repitiendo el procedimiento sucesivamente, con incrementos de 10%, hasta alcanzar el 100%. Los tubos fueron almacenados en un refrigerador a 5° C y permanecieron ahí durante cuatro semanas. Posteriormente se extrajeron las raíces y se colocaron sobre portaobjetos para ser preparadas para fotografiarse en el microscopio de barrido de la misma manera que en el experimento Octubre-2010.

### 8.3. Resultados y discusión

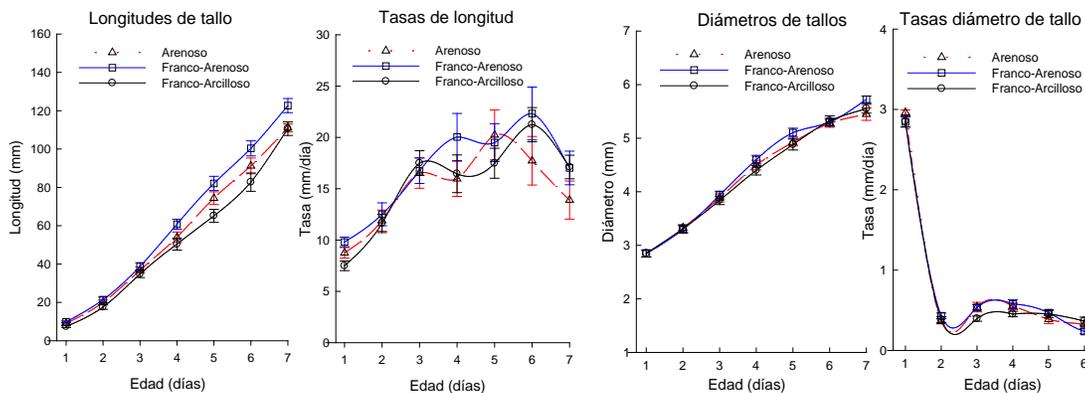
#### 8.3.1. Crecimiento de tallos y raíces

Se presentan los resultados del Experimento Septiembre 2009.

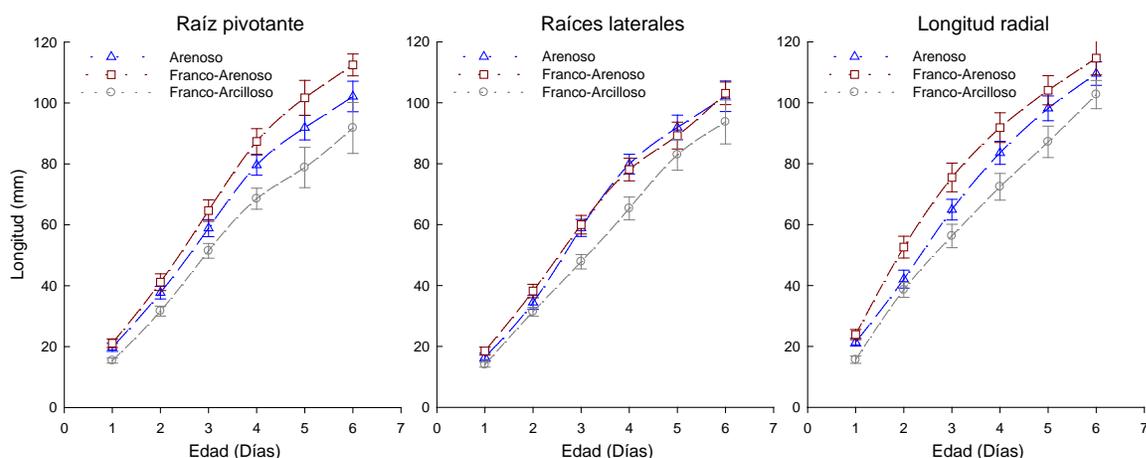
**Efecto de las reservas en cotiledones:** El agotamiento de las reservas de los cotiledones se registró sin diferencias significativas entre sustratos ( $P = 0.135$ ). En promedio a los  $4.9 \pm 0.78$  días se agotaron las reservas de la semilla. De esta manera, los contenidos nutricionales en los sustratos tuvieron un mayor efecto de este periodo en adelante.

**Longitud y diámetro de tallos:** Los tallos en suelo Arenoso y Franco-Arenoso fueron mayores que en suelo Franco-Arcilloso (Holm-Sidak;  $P < 0.05$ ) el primer y cuarto día. Esto debido a que las tasas de crecimiento en suelo arcilloso fueron menores que en los otros sustratos durante los primeros dos días (Holm-Sidak;  $P < 0.05$ ). Los diámetros de tallo no registraron diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) entre sustratos durante los siete días, dado que sus tasas de crecimiento fueron siempre similares (Kruskal-Wallis;  $P > 0.05$ ) (Figura 8.2).

**Longitud de raíces:** Las raíces en sustrato Franco-Arcilloso fueron más cortas que las localizadas en suelo Franco-Arenoso ( $P < 0.05$ ), durante el segundo al cuarto día. Lo que indica que el sustrato arcilloso dificultó el crecimiento de las raíces. Sin embargo del quinto día en adelante no se encontraron diferencias entre sustratos ( $P > 0.120$ ); ya que las raíces de los sujetos en suelo Franco-Arcilloso igualaron su crecimiento con los otros sustratos (Figura 8.3).



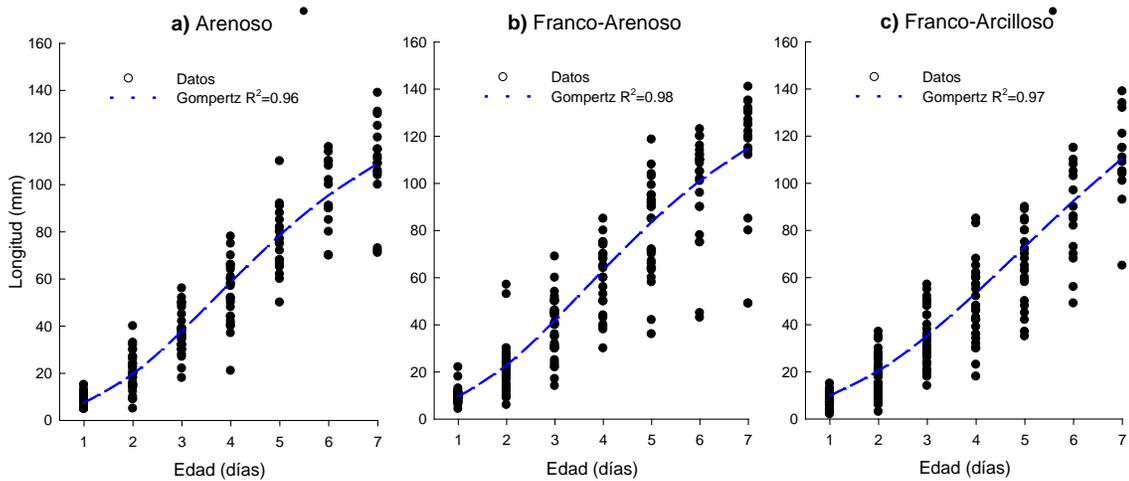
**Figura 8.2.** Crecimiento promedio ( $\pm$ EE) diario de tallos en plántulas germinadas en tres diferentes sustratos: Arenoso, Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso.



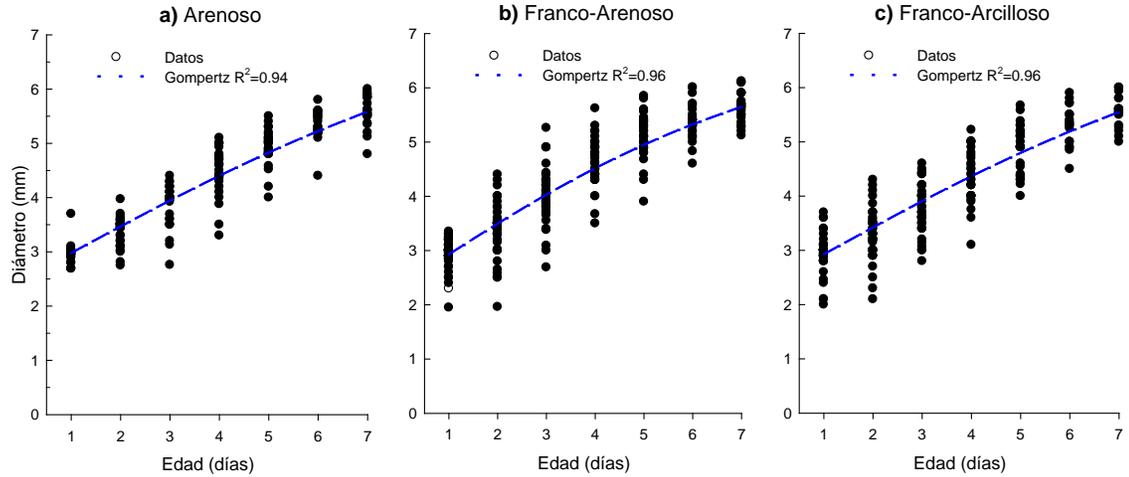
**Figura 8.3.** Crecimiento promedio ( $\pm$ EE) diario de raíces principales en plántulas germinadas en tres diferentes sustratos: Arenoso, Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso.

### 8.3.2. Ajuste de curvas y aproximación a los modelos de crecimiento

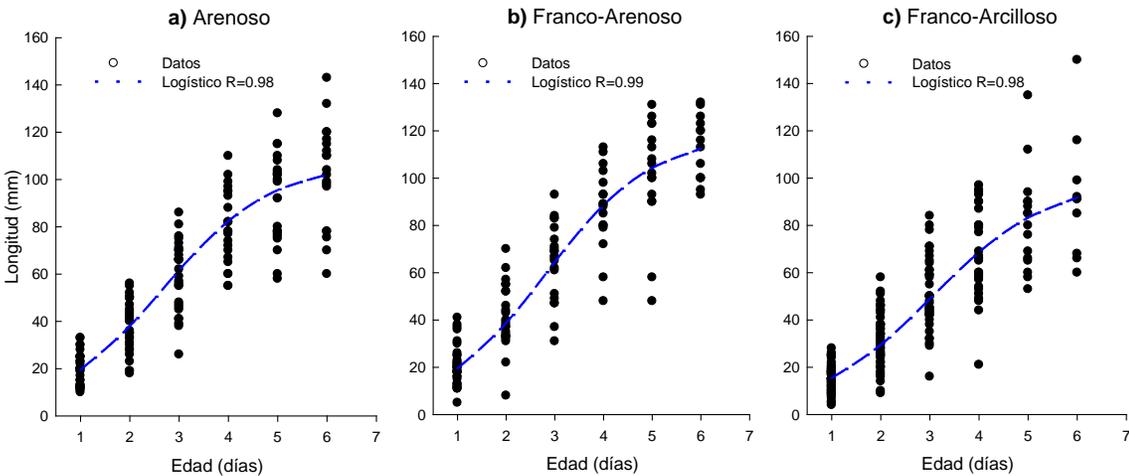
Las curvas de crecimiento de las variables de longitud y diámetro de tallo se representaron mejor mediante los modelos de Gompertz, con  $R^2$  promedio de 0.97, y Logístico con  $R^2$  promedio de 0.93. Los modelos Schumacher y Monomolecular tuvieron  $R^2$ s inferiores a 0.7 (Cuadro 8.4) por originar curvas con exponenciales más pronunciadas que las obtenidas de manera natural por las plántulas de *J. curcas*. El crecimiento de las raíces pivotante y laterales también se representó mejor mediante los modelos Logístico ( $R^2=0.98$ ) y Gompertz ( $R^2=0.96$ ), respectivamente. *J. curcas* presenta un crecimiento aéreo casi lineal los primeros siete días posteriores a su germinación; mientras que el sistema de raíces inicia con crecimiento cuasi-lineal y presenta un marcado decremento a partir del quinto día aproximadamente, coincidiendo con el agotamiento de las reservas en cotiledones. Un comportamiento similar se registró durante los experimentos del capítulo VII, donde también se observaron decrementos en las tasas de crecimiento de la longitud del tallo aproximadamente al quinto día. Estos patrones de crecimiento típicamente sigmoidales se consideran comunes entre especies arbóreas (López, 2010) y los modelos Logístico y Gompertz son los que usualmente proveen los mejores ajustes de curvas en las plantas (Thornley, 1998). Las gráficas de dispersión con el modelo de crecimiento que mejor las define se muestran en las Figuras 8.4, 8.5, 8.6 y 8.7. Los coeficientes de cada modelo varían ligeramente entre sustrato, esto debido las diferentes tasas de crecimiento entre los mismos (Cuadro 8.4).



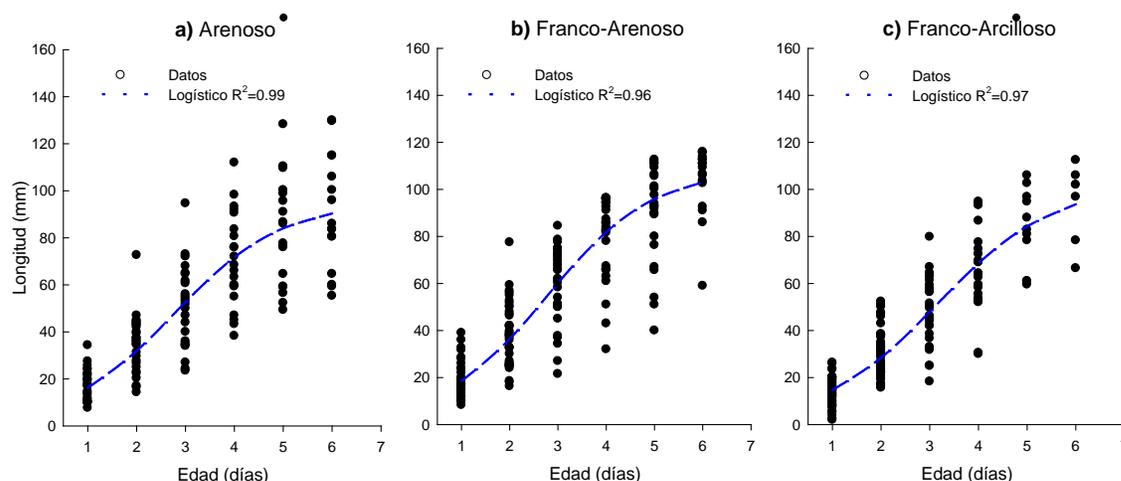
**Figura 8.4.** Gráficas de dispersión de datos edad-longitud de tallo y su modelo a partir de plántulas de siete días en suelos: **a)** Arenoso, **b)** Franco-Arenoso y **c)** Franco-Arcilloso.



**Figura 8.5.** Gráficas de dispersión de datos edad-diámetro de tallo y su modelo a partir de plántulas de siete días en suelos: **a)** Arenoso, **b)** Franco-Arenoso y **c)** Franco-Arcilloso.



**Figura 8.6.** Gráficas de dispersión de datos edad-longitud de raíz pivotante y su modelo a partir de plántulas de siete días en suelos: **a)** Arenoso, **b)** Franco-Arenoso y **c)** Franco-Arcilloso.



**Figura 8.7.** Gráficas de dispersión de datos edad-longitud de raíces laterales y su modelo a partir de plántulas de siete días en suelos: **a)** Arenoso, **b)** Franco-Arenoso y **c)** Franco-Arcilloso.

**Cuadro 8.4.** Modelos de crecimiento para plántulas de *J. curcas* de siete días de edad.

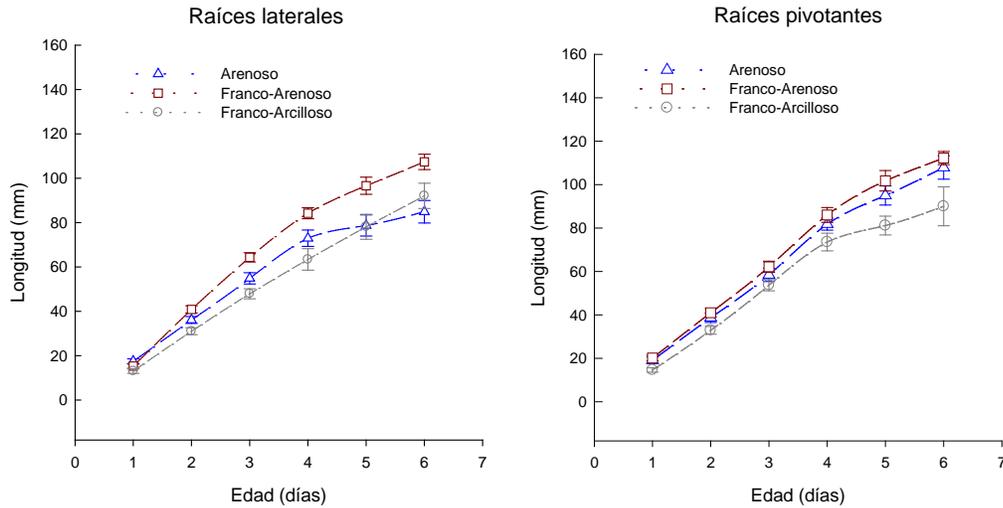
Variable	Modelo	Coeficientes por sustrato			R <sup>2</sup> promedio
		Arenoso	Franco-Arenoso	Franco-Arcilloso	
Longitud de tallo	Schumachen	• 1= -3.70	• 1= -2.91	• 1= -3.3	0.675
	Gompertz	• 1=0.4; • 2=3.8	• 1=0.385; • 2=3.65	• 1=0.28; • 2=4.88	0.974
	Logístico	• 1=26.5; • 2=0.78	• 1=27.0; • 2=0.80	• 1=34.0; • 2=0.80	0.923
	Monomolecular	• 1=1.43; • 2=0.41	• 1=1.0; • 2=0.262	• 1=0.97; • 2=0.24	0.395
Diámetro de tallo	Schumachen	• 1= -0.85	• 1= -0.90	• 1= -0.80	0.490
	Gompertz	• 1=0.20; • 2=0.60	• 1=0.22; • 2=0.50	• 1=0.17; • 2=1.0	0.959
	Logístico	• 1=1.65; • 2=0.33	• 1=1.65; • 2=0.37	• 1=1.70; • 2=0.35	0.930
	Monomolecular	• 1=0.69; • 2=0.39	• 1=0.65; • 2=0.30	• 1=0.50; • 2=0.20	0.384
Raíz Pivotante	Schumachen	• 1= -2.0	• 1= -2.0	• 1= -2.1	0.519
	Gompertz	• 1=0.35; • 2=3.0	• 1=0.36; • 2=2.80	• 1=0.37; • 2=2.90	0.946
	Logístico	• 1=11.0; • 2=0.90	• 1=12.5; • 2=0.90	• 1=12.5; • 2=0.83	0.983
	Monomolecular	• 1=1.80; • 2=0.80	• 1=1.83; • 2=0.80	• 1=1.50; • 2=0.60	0.476
Raíces laterales	Schumachen	• 1= -2.1	• 1= -2.1	• 1= -2.3	0.502
	Gompertz	• 1=0.40; • 2=2.6	• 1=0.33; • 2=3.10	• 1=0.37; • 2=2.90	0.964
	Logístico	• 1=12.0; • 2=0.90	• 1=12.0; • 2=0.90	• 1=13.7; • 2=0.80	0.974
	Monomolecular	• 1=1.55; • 2=0.70	• 1=1.50; • 2=0.60	• 1=1.82; • 2=0.80	0.449

### 8.3.3. Caracterización de raíces en diferentes sustratos

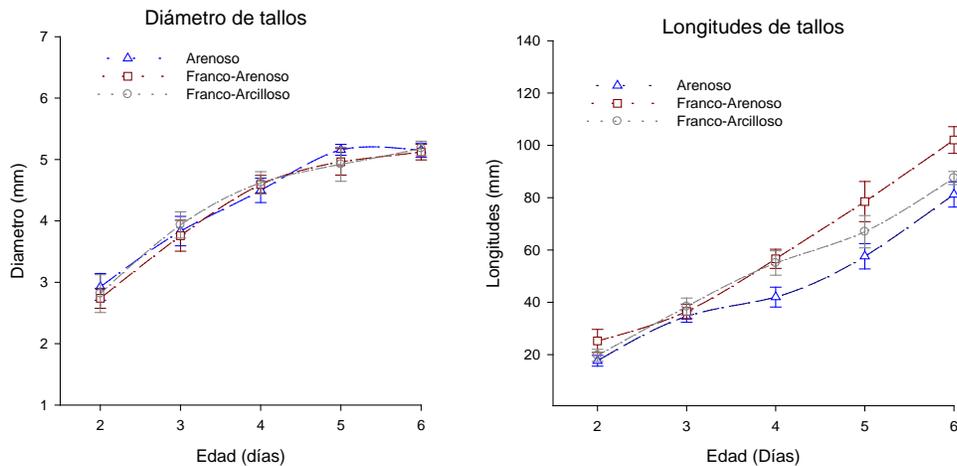
#### 8.3.3.1. Crecimiento de raíces y su relación con la parte aérea

En el experimento Octubre-2010 el crecimiento de raíces en sustrato Franco-arcilloso a partir del segundo día fue menor que en los otros sustratos; pero solo en raíces laterales el sustrato Arenoso registró también menor crecimiento que el sustrato Franco-arenoso a partir del quinto día. En relación con la parte aérea (Figuras 8.8 y 8.9), el diámetro en la base del tallo no mostró diferencias estadísticas durante los seis días ( $P < 0.05$ ); sin embargo al sexto día las longitudes de tallos fueron mayores en sustrato Franco-Arenoso, con respecto al sustrato Arenoso ( $P = 0.025$ ). Los resultados indican una mayor dificultad de las raíces para penetrar el suelo Franco-arcilloso durante la fase de desarrollo primaria de las plántulas, especialmente en las raíces pivotantes, por su tendencia al crecimiento vertical, situación que se observó también en el experimento Septiembre-2009. En la parte aérea, el efecto de los sustratos puede estar relacionado con el crecimiento de las raíces y su

capacidad para obtener nutrientes del sustrato donde se encuentran (Halloy, 2008). Aunque el sustrato Franco-Arcilloso fue más rico en nutrientes que el sustrato Franco-Arenoso, la mayor elongación de los tallos en el sustrato Franco-Arenoso podría estar relacionada con la facilidad de penetración del sistema de raíces en sustratos más ligeros.



**Figura 8.8.** Curvas de crecimiento promedio ( $\pm$ EE) después de la emergencia de las raíces principales de *Jatropha curcas* (pivotante y laterales) en tres sustratos diferentes.

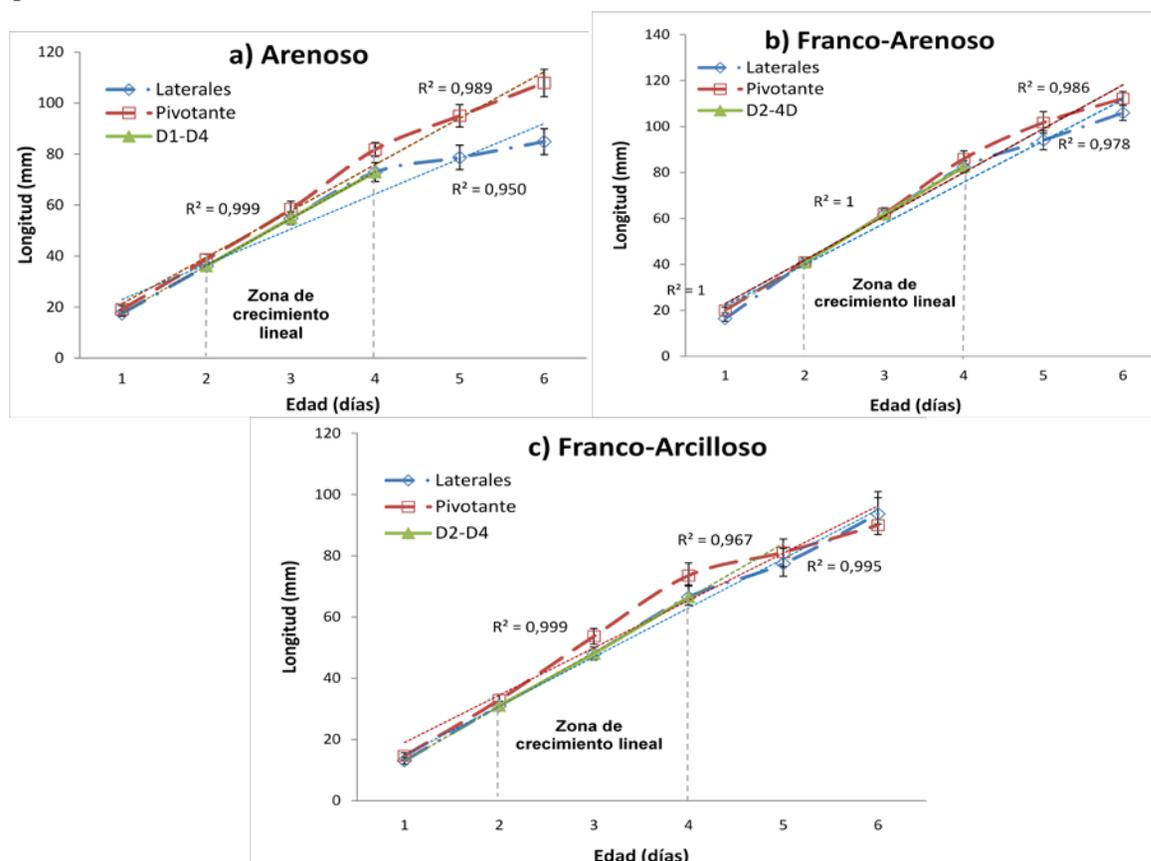


**Figura 8.9.** Curvas de crecimiento promedio ( $\pm$ EE) después de la emergencia, del diámetro del tallo de *Jatropha curcas* en tres sustratos diferentes.

### 8.3.3.2. Determinación de la zona de crecimiento estable

Las zonas de crecimiento lineal obtenidas para los tres sustratos durante el experimento Octubre-2010 se muestran en la [Figura 8.10](#). La zona de mayor linealidad comprendió entre el segundo al cuarto día después de la emergencia de la radícula. Pasado este periodo las raíces laterales redujeron su crecimiento paulatinamente. De la misma manera que en el experimento Septiembre-2009, las curvas de crecimiento de ambos tipos de raíces tuvieron el mejor ajuste con el modelo logístico ( $R^2=0.97$ ), que se caracteriza por una región casi lineal en el centro de la curva y semi-exponencial

en los extremos. Con base en las aproximaciones lineales, se determinó que el efecto de los sustratos no afectó las zonas de crecimiento lineal. Estos resultados permiten establecer que el sistema de raíces principales de *J. curcas* manifiesta una zona de crecimiento estable independiente del sustrato donde se encuentre y por tanto su periodo de crecimiento celular podría ser calculado aplicando el método RCP.

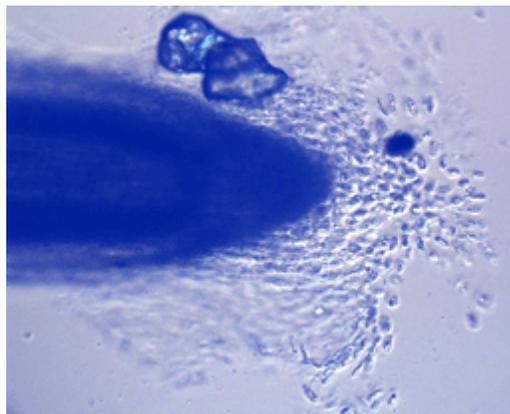


**Figura 8.10.** Determinación de las zonas de crecimiento lineal con base en un ajuste de regresión lineal. Las curvas con mejor ajuste lineal se localizaron entre el segundo y cuarto día, en los tres sustratos y en los dos tipos de raíces (laterales y pivotantes).

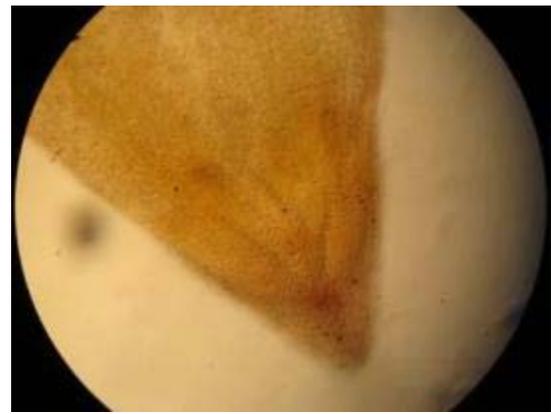
### 8.3.3.3. Observación de las cofias de *Jatropha curcas* bajo microscopio óptico

Las cofias de *J. curcas* sin aclarado mostraron abundante mucilago, que se relaciona con raíces de rápido crecimiento (Iijima *et al.*, 2003) (Figura 8.11a). El aclarado propuesto por Dubrovsky *et al.* (2009) no permitió la vista detallada de las células meristemáticas en ninguna de las raíces principales de *J. curcas* de tres y cuatro días de edad (Figura 8.11b), debido a lo denso del tejido. Por lo que se procedió a realizar cortes longitudinales en fresco de las cofias; aplicando las técnicas Nomraski con acercamientos a 10x y 20x para observar las diferencias en elongaciones de las células, sin embargo no se observaron tales diferencias a lo largo de los segmentos (Figura 8.12). Finalmente con el aclarado a base de HCl al 5% se logró identificar la zona meristemática, la zona de elongación y la zona pelífera, con base en observaciones visuales y su comparación con De

Neergaard *et al.* (2000) y González *et al.* (2010), como se muestra en [Figura 8.13](#). Por lo que se establece que el sistema de raíces de *J. curcas* cumple con el modelo clásico de estructura de la cofia de la raíz (Ishikawa y Evans, 1995).

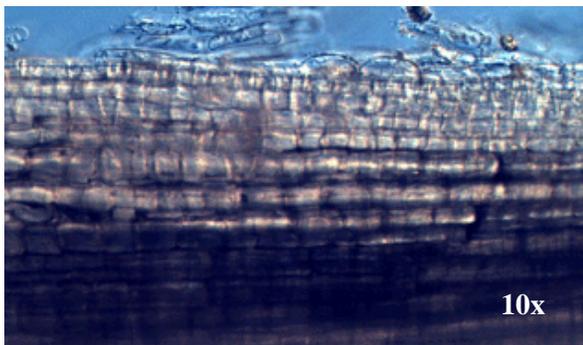


a) Cofia a 10x con técnica Nomraski

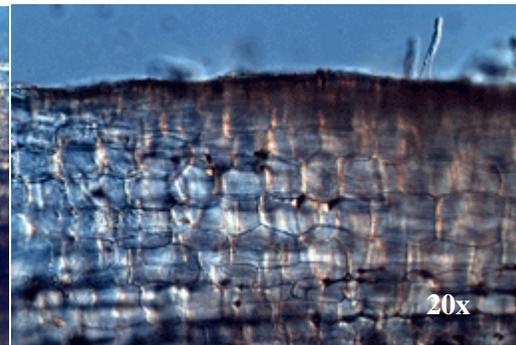


b) Cofia a 20x con aclarado Dubrovsky

**Figura 8.11.** Cofias de *Jatropha curcas* **a)** aplicando Nomraski sin aclarado y **b)** aclarado propuesto por Dubrovsky *et al.* (2009).

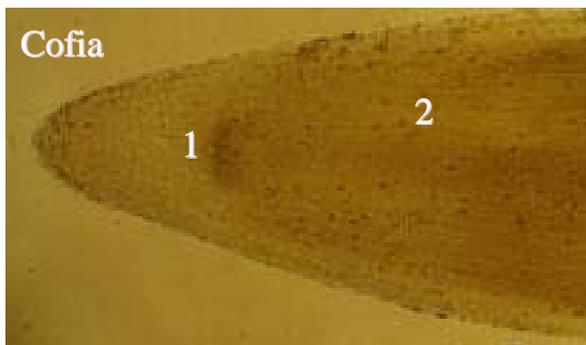


10x



20x

**Figura 8.12.** Células de raíces en diferentes segmentos de la punta.



Cofia

1

2



3

**Figura 8.13.** Puntas de raíz principal de tres días de edad. Se identifican: **1)** zona meristemática, **2)** zona de división y elongación celular y **3)** zona pilífera.

### 8.3.4. Análisis del sistema de raíces en diferentes sustratos: mediante escáner y microscopio electrónico de barrido

#### 8.3.4.1. Escaneo de imágenes de sistemas de raíces y análisis mediante WinRhizo

El monitoreo de crecimiento en los tres tipos de suelo realizado durante el Experimento Octubre-2010 registró mayor elongación en plántulas localizadas en sustrato Franco, con respecto a sustrato Arenoso (Kruskal-Wallis;  $P = 0.013$ ); aunque el diámetro de los tallos no tuvo diferencias entre Franco y arcilla ( $P = 0.344$ ), pero sí fue menor entre Franco y Arena ( $P = 0.017$ ) (Figura 8.14). El análisis de las fotografías de los sistemas de raíces mediante WinRhizo mostró un mayor desarrollo en el sustrato Franco ( $P < 0.05$ ), seguido por el sustrato Arcilloso, mientras que el menor desarrollo se dio en sustrato Arenoso (Figura 8.15). De estos resultados se observa que el crecimiento del sistema de raíces es congruente con el crecimiento de la parte aérea, como se reportó desde los primeros días de monitoreo posterior a la germinación. El suelo Franco, con mayor contenido de materia orgánica y pH neutro, produjo plántulas con sistemas de raíces mejor desarrollados, manifiesto en área y volumen superiores y mayor cantidad de ramificaciones que los otros sustratos ( $P < 0.05$ ). El suelo arcilloso produjo raíces más cortas y gruesas, asociadas a la dificultad de penetración (Vamerli *et al.*, 2003); mientras que en arena las raíces fueron ligeramente más largas que en arcilla, pero con diámetros más delgados ( $P < 0.05$ ). Tanto suelos arcillosos, como arenosos, bajos en materia orgánica fueron estadísticamente similares ( $P > 0.05$ ) en cuanto al área, volumen y número de ramificaciones producidas en los sistemas de raíces de *Jatropha* (Figura 8.16). Un mejor desarrollo de raíces en sustrato Franco podría ser resultado de una mayor captación de nutrientes, tales como N y P en el suelo (Islam y Ali, 2009).

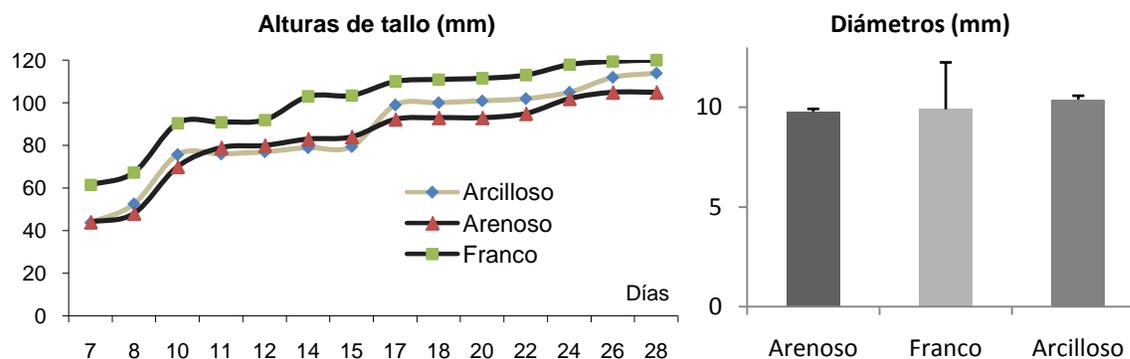
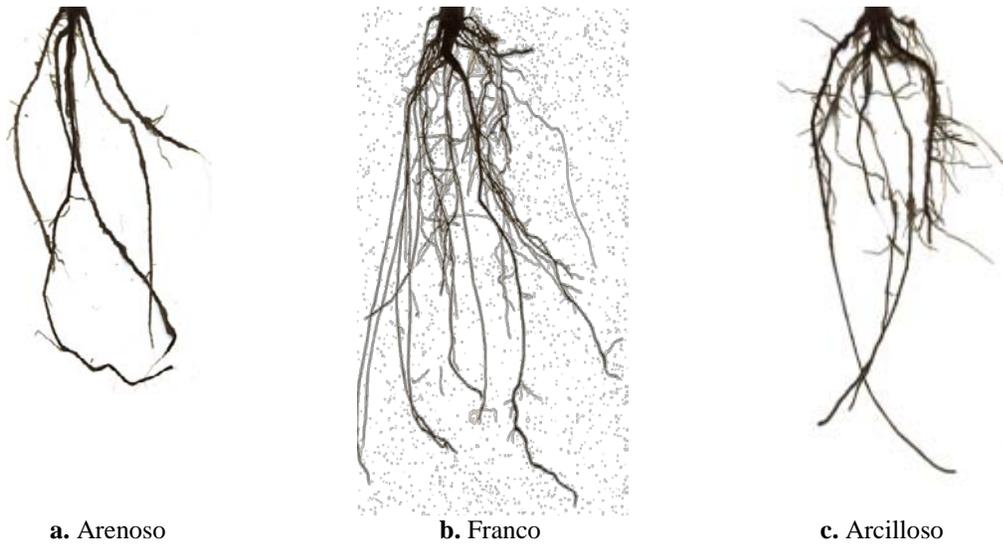
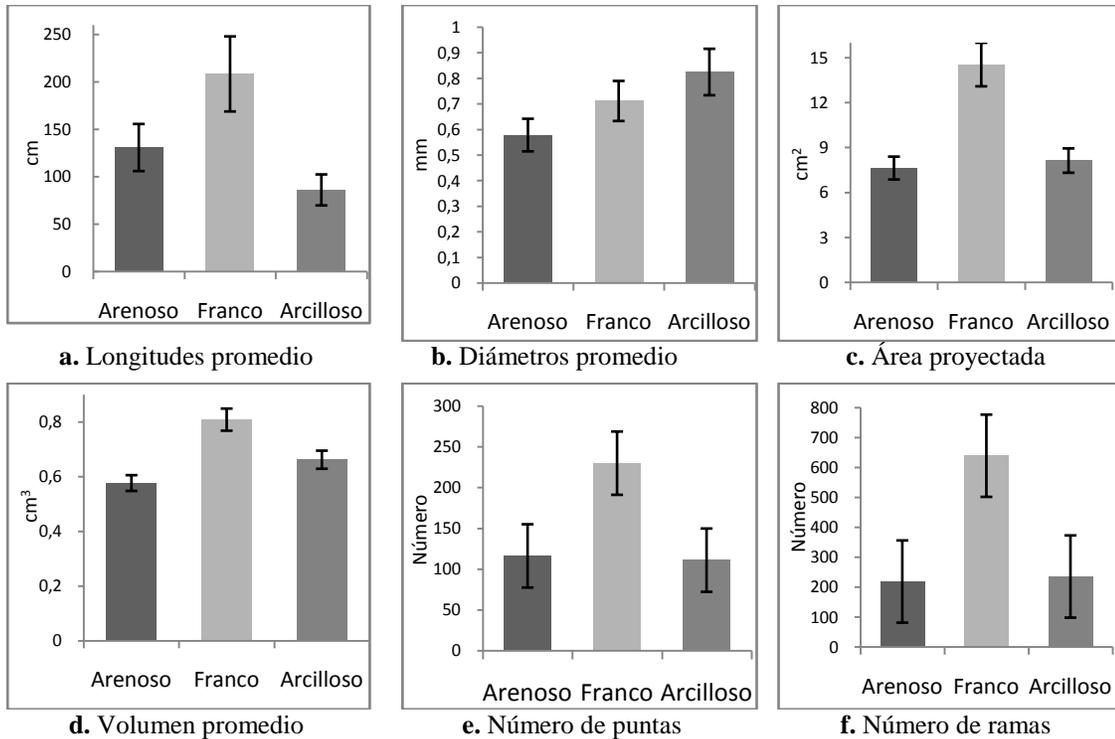


Figura 8.14. Crecimiento de tallos y diámetros promedio (+EE) finales por sustrato.



**Figura 8.15.** Sistemas de raíces extraídos de tres diferentes sustratos.

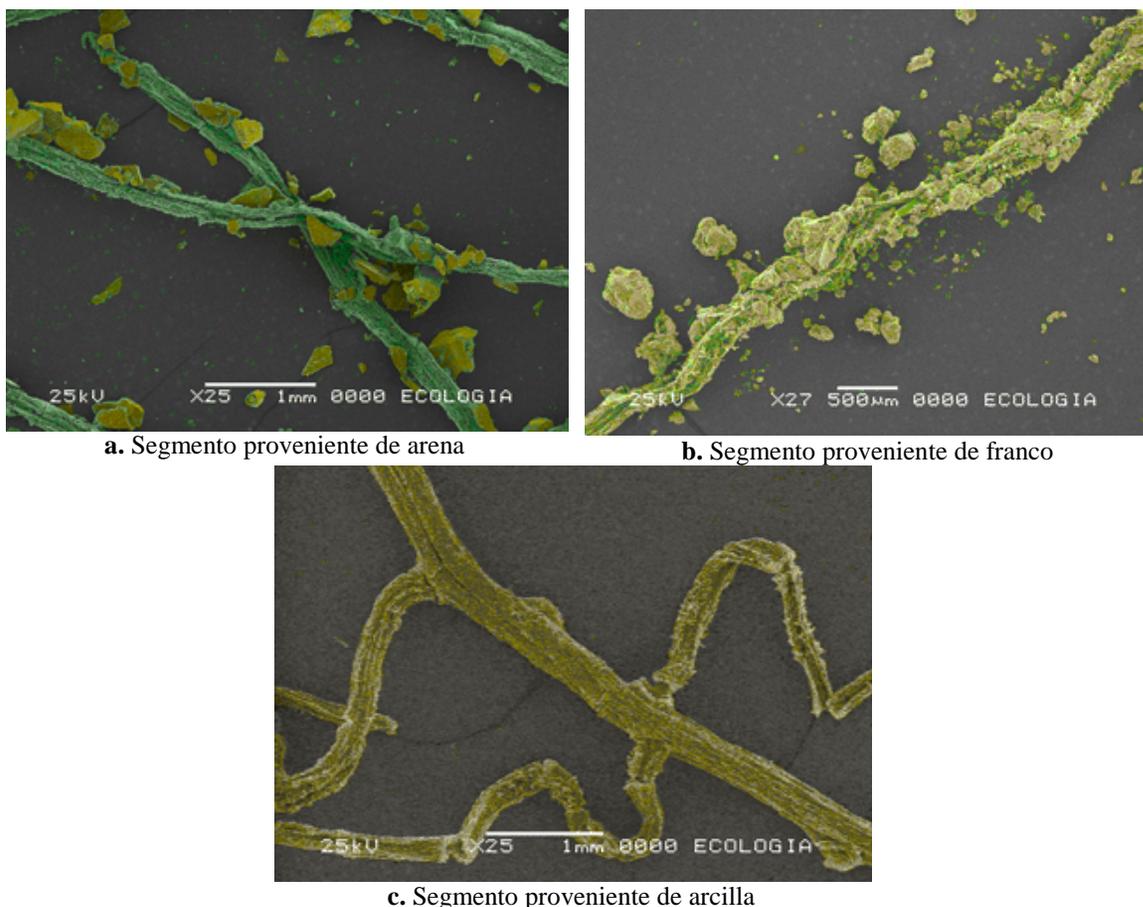


**Figura 8.16.** Longitudes, diámetros y volúmenes promedio ( $\pm$ EE) ocupados por raíces de *Jatropha curcas* en tres diferentes sustratos.

### 8.3.4.2. Análisis del sistema de raíces mediante microscopio electrónico de barrido

**Experimento Octubre-2010.** Las fotografías obtenidas con el microscopio electrónico de barrido muestran una mayor capacidad de adherencia para las raíces encontradas en suelos Arcilloso y Franco, con respecto al suelo Arenoso (Figura 8.17 a, b y c). En La Figura 8.17a se puede observar el segmento de raíz con partículas de arena, identificadas por su mayor tamaño y con poca

adherencia a las raíces. La [Figura 8.17b](#) muestra el segmento de una raíz proveniente del suelo Franco, y en ella se puede observar una mayor cantidad de partículas agrupadas y adheridas entre ellas y en todos los extremos de la raíz. La [Figura 8.17c](#) muestra un segmento proveniente del suelo Arcilloso, donde el tamaño de las partículas es mucho más diminuto, pero aun puede apreciarse la cobertura de las mismas sobre todo el segmento. La gran cantidad de sustrato adherido es indicativa de formación de partículas agregadas que podrían ser rizocorazas, y que permiten un mejor aprovechamiento de los nutrientes (De León *et al.*, 2009). Un mayor factor de amplificación (140x – 190x) permite visualizar el efecto de la interacción del sustrato con los pelos y estructuras de las raíces. En la serie de la [Figura 8.18](#) se observan más pelos radicales en los segmentos provenientes de sustratos Franco y Arcilloso ([Figura 8.18b](#) y c); que en el segmento proveniente de suelo Arenoso ([Figura 8.18a](#)). En el suelo Franco se observan partículas aglutinadas o partículas agregadas de suelo, que también podrían proteger a las raíces de las pérdidas de agua bajo condiciones extremas. En suelo Arcilloso se observa menor cantidad de estas partículas, posiblemente por la menor cantidad de pelos asociados a las mismas, que se aprecia mayor en el suelo Franco que en el suelo Arcilloso (comunicación personal Dubrovsky, 2011).



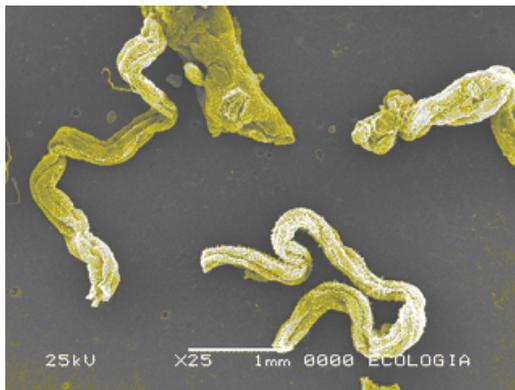
**Figura 8.17.** Sistemas de raíces extraídos de los diferentes sustratos.



a. Segmento en suelo Arenoso      b. Segmento en suelo Franco      c. Segmento en suelo Arcilloso

**Figura 8.18.** Sistemas de raíces extraídos de los diferentes sustratos.

**Experimento Agosto 2011.** Las imágenes de segmentos de raíces extraídas de los tres sustratos permiten apreciar un mejor desarrollo de los pelos radicales en el suelo Franco-Arcilloso y Franco-Arenoso, donde se observan los pelos de mayor tamaño ([Figura 8.19b y c](#)). En suelo arenoso los pelos radicales se aprecian más cortos que en los otros suelos, posiblemente por un mayor estrés osmótico (situación congruente con las imágenes del Experimento Octubre-2010). Por la misma razón las células epidérmicas son más cortas, su relación longitud: ancho es 2:1 o menor que en los otros suelos ([Figuras 8.20a, b y c](#)) (análisis de Dubrovsky, 2011). Mayor formación de pelos radicales incrementan el contacto con el suelo y la absorción de nutrientes (Neergaard *et al.*, 2000). Por lo que las raíces localizadas en suelos Franco-Arenosos y Franco-Arcillosos tendrán mejor capacidad de proporcionar recursos al sistema, lo que impacta a su vez en su crecimiento aéreo, como se ha reportado en esta investigación durante los Capítulos VII y VIII.



a. Segmentos proveniente de arena



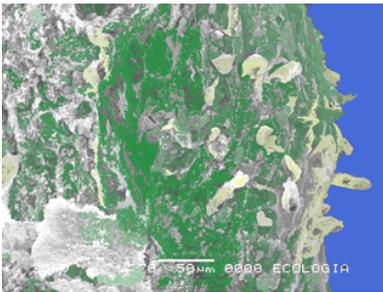
b. Segmentos proveniente de franco-arena

**Figura 8.19.a y b.** Sistemas de raíces extraídos de los diferentes sustratos.

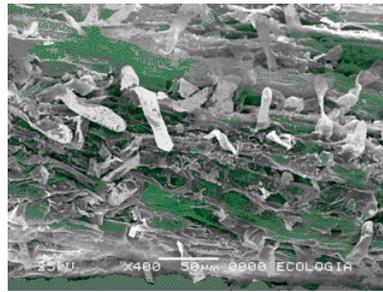


c. Segmento proveniente de franco-arcilla

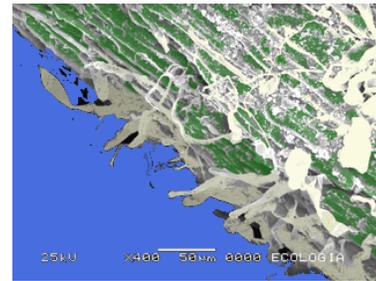
**Figura 8.19.c.** Sistemas de raíces extraídos de los diferentes sustratos.



a. pelos proveniente de suelo Arenoso



b. pelos provenientes de suelo Franco-Arenoso



c. Pelos proveniente de suelo Franco-Arcilloso

**Figura 8.20.** Pelos radicales de raíces en los tres sustratos.

## 8.4. Conclusiones

El sistema de raíces principales de *Jatropha curcas* tiene un crecimiento primario que se aproxima a un modelo logístico, con un periodo estable de crecimiento localizado entre el segundo y el cuarto día después de la emergencia, que no se ve afectado por el sustrato donde se localiza la planta. Sin embargo, un sustrato pesado, como el arcilloso, debido a su dureza, presenta la mayor dificultad para la penetración y crecimiento de las raíces, lo que impacta en su crecimiento subterráneo y aéreo inicial. Aunque, es el contenido de nutrientes el que determina el crecimiento final de las plantas, ya que después de periodos mayores a un mes, en sustratos con muy bajo contenido de nutrientes las plántulas tuvieron un desarrollo menor al obtenido en sustratos más ricos. Respecto a la granulometría, el microscopio de barrido mostró mejor adhesión de partículas en sustratos finos con respecto a sustratos gruesos. Texturas medias a finas permitieron mayor cantidad y longitudes más largas de pelos radicales, que se asocian a un mejor aprovechamiento de los nutrientes contenidos en los suelos. Por lo que se considera que suelos tipo franco-arenosos a franco-arcillosos, con niveles nutrimentales mayores que los suelos arenosos impactarán sobre un mejor desarrollo de las plántulas de esta especie.

## IX. Estructura y arquitectura de las raíces de *Jatropha curcas*\*

### 9.1. Introducción

Las raíces constituyen el sistema de fijación de las plantas al suelo, y efectúan las funciones vitales de absorción y transporte de agua y nutrientes a las partes aéreas. Su funcionamiento tiene implicaciones ecológicas, ya que su comportamiento y estructura afectan las propiedades del suelo, tales como la tasa de infiltración, la estabilidad de los agregados, el contenido de humedad, el contenido de materia orgánica y la resistencia a la penetración; factores que contribuyen a controlar la velocidad de la erosión en varios grados (Gaytán *et al.*, 2005; De Baets *et al.*, 2008, Gyssels y Poesen, 2003). A su vez, la estructura y la forma del sistema de raíces determina la eficiencia que éste tiene para adquirir sus recursos (Vercambre *et al.*, 2003). En este sentido, el conocimiento sobre la morfología y estructura de las raíces se requiere para poder determinar: los suelos apropiados para la especie; los requerimientos nutricionales e hídricos del sistema; la manera en que la planta distribuye sus recursos en relación con su ambiente; las interacciones con otras plantas; la influencia del sistema sobre los agregados del suelo; y las capacidades de anclaje de la planta, entre otros (Coutts, 1983; Atkinson, 2000). Una metodología que permite estudiar la morfología y la estructura de las raíces es la caracterización estructural tri-dimensional (3D); porque con ella se obtiene una representación completa de las raíces y además, es el primer paso para obtener un modelo para simular el comportamiento del sistema dentro del sustrato donde se encuentra (Danjon *et al.*, 1999).

#### 9.1.1. Conceptos básicos para estudios estructurales de raíces

##### 9.1.1.1. Arquitectura de raíces

Las raíces de una planta forman un sistema porque sus componentes están conectados y organizados en una red (Danjon y Reubens, 2008). Los diferentes tipos de sistemas se identifican mediante la definición de su arquitectura. La arquitectura de plantas describe la información topológica y geométrica de los componentes que integran un individuo. La información topológica es relativa a las conexiones físicas de los componentes del sistema. Y la información geométrica se refiere al tamaño, localización y orientación de tales componentes (Danjon y Reubens, 2008). Su importancia radica en que es un dato requerido para obtener los modelos estadísticos y de funcionamiento estructural de la planta, que tratan con dinámicas de crecimiento y desarrollo (Godin *et al.*, 1999). Un Modelo Arquitectural define al programa de crecimiento de una planta que está determinado genéticamente (morfo genético) (Arias, 2004). Se divide en fases de arquitectura sucesivas, resultando en una fuerte estructuración topológica como función del tiempo (Danjon y Reubens,

2008). La arquitectura del sistema radicular juega un papel importante en el anclaje de la planta, el almacenamiento, deposición, excreción de componentes bioquímicos y en la asociación con organismos simbióticos (Danjon y Reubens, 2008; Dupuy *et al.*, 2005b). Los estudios tradicionales sobre arquitectura de raíces utilizan datos de plano y profundidad, seguidos por análisis cualitativo en mediciones topológicas, geométricas y de orientación (ángulos) de las ramas (McMinn 1963; Gray and Leiser 1982; Watson y O'Loughlin 1990).

### 9.1.1.2. Topología de raíces

Desde el punto de vista topológico las raíces individuales se pueden agrupar en distintos tipos de manera cualitativa, en base a sus características anatómicas o funcionales (Danjon y Reubens, 2008). En estudios del sistema radical que involucran la arquitectura de raíces se realizan básicamente las distinciones que se muestran a continuación (Gaytán *et al.*, 2005 y Pages *et al.*, 2004):

En base a su morfología y funcionamiento, las raíces en una planta se pueden clasificar en:

- a) **Raíces finas (RF) o de absorción.** Puesto que adquieren los recursos de los suelos. Varían con la estación y pueden cambiar rápidamente. La intensidad del sistema radical, que está asociada con la distribución de RF, es más sensible a las condiciones del suelo (Gaytán *et al.*, 2005). Se estudian en masa o mediante extracciones de tractos de suelo, donde se pesan y obtiene su volumen; y mediante bolsas de crecimiento o técnicas de paredes transparentes que permiten ver su crecimiento (rizotrones) (Danjon y Reubens, 2008).
- b) **Raíces gruesas (RG).** También conocidas como raíces estructurales; proporcionan la estabilidad y el transporte de los nutrientes al tallo. El hábito de arraigamiento, que está relacionado con la forma, dirección y distribución de las raíces gruesas, tiende a estar bajo control genético (Gaytán *et al.*, 2005; Danjon y Reubens, 2008).

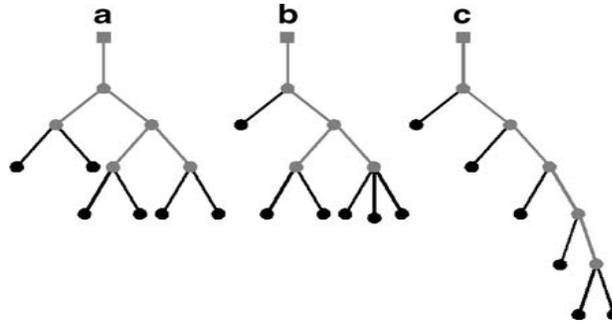
En base a su orden de aparición en una planta las raíces se pueden clasificar como:

- a) **Raíces de primer orden.** Son las raíces que emergen primero. Por convención la raíz pivotante es de primer orden (Danjon y Reubens, 2008).
- b) **Raíces de segundo orden y orden superior.** Las raíces de segundo orden son las que emergen de las raíces de primer orden. Si de una raíz de segundo orden, emerge otra; está podrá etiquetarse como raíz de tercer orden, y así sucesivamente (Danjon y Reubens, 2008).

En base a su desarrollo y conexiones físicas, los sistemas de raíces se pueden dividir en dos extremos (Danjon y Reubens, 2008):

**Sistema de ramas dicotómico.** (Figura 9.1a y 1b) Con una longitud y altitud mínima, que es más eficiente para explotar un volumen de suelo restringido y más eficiente en transportar los materiales al tallo.

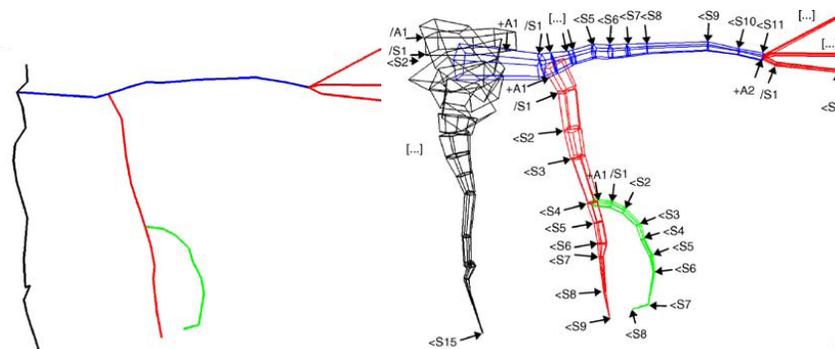
**Sistema de columna de pescado.** (Figura 9.1c) Con una longitud y altitud mayor, que es más eficiente en la exploración del suelo.



**Figura 9.1.** Sistemas arquitecturales. **a** y **b**: Sistema dicotómico. **c**: Sistema de columna de Pescado. Fuente: Danjon y Reubens, 2008.

### 9.1.13. Representaciones arquitectónicas para sistemas de raíces

Godin y Caraglio (Godin *et al.*, 1999) desarrollaron una forma sencilla de representar la arquitectura de las plantas de tal manera que se pueden visualizar las relaciones entre un elemento inicial y sus ramas. Estas representaciones se conocen como gráficas de árbol (MTG por sus siglas en inglés). El sistema consta de ejes que se descomponen en segmentos. Cada línea es un vértice listada secuencialmente como función de su posición. Los datos se ordenan en columnas, que pueden ser usadas para coordenadas, dimensiones, ángulos y etiquetas. Los límites entre las categorías de las raíces se pueden definir mediante segmentos de diferentes colores (Figura 9.2) (Danjon *et al.*, 2005). Bajo esta representación el análisis geométrico se facilita mediante la inclusión de coordenadas 3D en cada entidad de la gráfica MTG.



**Figura 9.2.** Representación esquemática del proceso de registro del formato MTG. Fuente: Danjon y Reubens (2008).

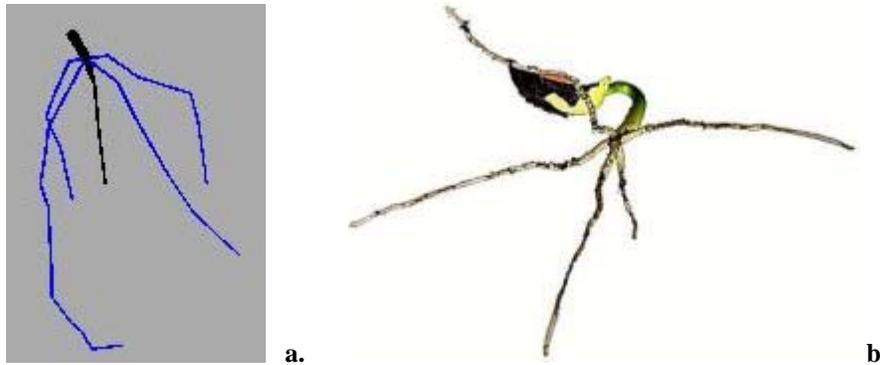
### 9.1.1.4. Modelado de raíces

Para establecer un modelo del sistema de raíces de una planta se combina el marco matemático, que determina el desarrollo principal que envuelve a las dinámicas de la arquitectura del sistema, de manera independiente al modelado de los suelos. El modelado de los suelos no se contempla debido

a su gran complejidad, por estar compuesto de diferentes capas con propiedades distintas que se encuentran a lo largo del sistema radicular (Pages *et al.*, 2004). Es por ello que en general se considera solo el crecimiento y la estructura geométrica del sistema de raíces dentro del volumen donde se encuentra (Danjon *et al.*, (2005).

#### 9.1.1.5. La arquitectura del sistema de raíces de *J. curcas*

De manera general, las plantas de la familia Euphorbiaceae poseen un sistema alorrizo, caracterizado porque hay una raíz principal y raíces laterales no equivalentes morfológicamente. El sistema radical generalmente es unitario y presenta ramificación racemosa, acrópeta. (UNN, 2008). Actualmente solo se reporta un estudio formal que define la arquitectura de la raíz de *J. curcas* (Reubens *et al.*, 2011). Sin embargo, este estudio se realizó con un solo sustrato (arena de río), por lo que no se sabe la respuesta de la planta ante diversos tipos de suelo. Se ha establecido que *J. curcas* posee un patrón original consistente de una raíz pivotante y cuatro laterales que emergen solamente de plántulas procedentes de semillas (Reubens *et al.*, 2011). La [Figura 9.3.a](#) muestra un modelo del sistema radical de una plántula de esta especie (Achten *et al.*, 2007); donde se observa la raíz pivotante y cuatro raíces laterales. En la [Figura 9.3.b](#) se muestra una fotografía donde se aprecia un sistema de raíces inicial de *J. curcas*, con las mismas características del modelo.



**Figura 9.3. a)** Modelo arquitectónico de *Jatropha curcas*. **b)** Sistema radical inicial de *Jatropha curcas*.  
Fuentes: **a)** Achten *et al.*, (2007). **b)** Foto del personal.

Un punto importante al definir la arquitectura del sistema de raíces consiste en validar su estructura geométrica en relación con su simetría, ya que a mayor simetría, mejor estabilidad del sistema ante las perturbaciones que podrían derribarlo; y por lo tanto, mejor capacidad como retenedor de suelos (Dupuy *et al.*, 2005a; Reubens *et al.*, 2011).

Con base en las definiciones topológicas presentadas anteriormente, y con el objetivo de validar la estructura original del sistema de raíces de *J. curcas* y su estabilidad en diferentes suelos, en esta investigación se denominan a las cinco raíces que conforman la arquitectura del sistema como raíces principales (Capítulo VIII) o gruesas. Esta investigación propone un índice de similitud del sistema en tres diferentes tipos de suelo, para evaluar su simetría y su estabilidad.

### 9.1.2. Objetivos

- Evaluar la arquitectura del sistema de raíces de *Jatropha curcas* en tres diferentes tipos de suelo.
- Determinar la estabilidad del patrón estructural de la arquitectura del sistema de raíces de *Jatropha curcas* en tres diferentes tipos de suelo, mediante un índice de similitud propuesto.

### 9.1.3. Hipótesis

La estructura de las raíces de *Jatropha curcas* es diferente en los tres tipos de suelo.

## 9.2. Materiales y métodos

### 9.2.1. Crecimiento de plántulas de *Jatropha curcas* en tres diferentes sustratos

Los datos analizados en esta investigación corresponden al experimento denominado 3\_MESES, iniciado en Septiembre del 2010, y cuyas características se describen detalladamente en la sección de Materiales y Métodos del capítulo VII (Cuadros 7.1 y 7.2).

#### 9.2.1.1. Selección de los sustratos

Los sustratos seleccionados fueron: Arenoso, Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso (Apéndice A.2), cuyas propiedades se presentan en los Cuadros A.1 y A.2, del Apéndice A.

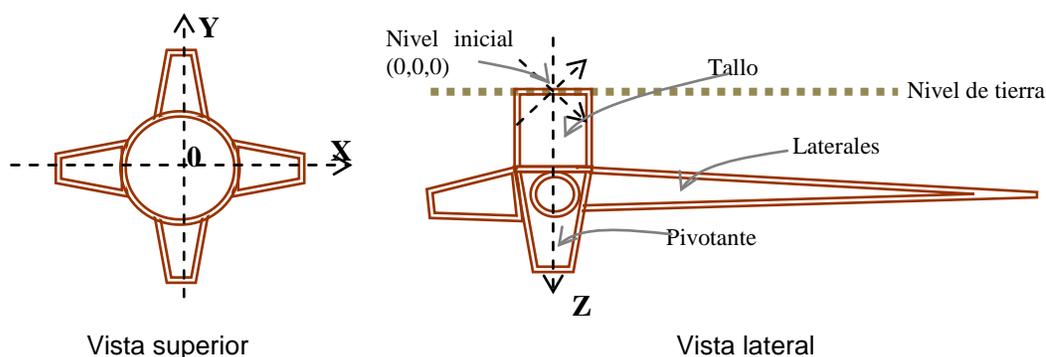
#### 9.2.1.2. Diseño experimental

El diseño experimental fue completamente al azar, con un factor sustrato consistente de tres niveles: suelo Arenoso, Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso. Los sustratos fueron colocados en bolsas de polietileno de 30 cm de diámetro por 40 cm de largo llenas con el sustrato correspondiente, y 15 semillas fueron sembradas en cada bolsa por tratamiento. Las semillas fueron enterradas en el sustrato correspondiente en posición vertical con la carúncula hacia abajo a una profundidad equivalente a su longitud (2 cm aproximadamente). Cuando las semillas no germinaron, semillas adicionales fueron colocadas, para completar el número de individuos. Las plántulas emergentes permanecieron un promedio de 110 días, en sus respectivos contenedores.

#### 9.2.1.3. Métodos de desentierre y mediciones de raíces

Al final del periodo de evaluación las plantas se desenterraron y las raíces fueron medidas con base en experiencias previas y en adaptaciones a las metodologías propuestas por Danjon y Reubens 2008 y Reubens *et al.* (2011), para mediciones manuales. Cada maceta fue colocada sobre una mesa

de 1.0 m de altura para facilitar el desentierre y la toma de medidas. Las plantas en suelo Arenoso fueron desenterradas con una manguera de agua a muy baja presión; las plantas en Franco-Arenoso, con agua a presión ligeramente mayor que en el suelo Arenoso; y las plantas en Franco-Arcilloso fueron humedecidas completamente un día antes del desentierre, para posteriormente desenterrarlas manualmente sin usar la manguera. Conforme emergían las raíces de las plantas, se registraba su orientación mediante un transportador manual (1° de precisión). La orientación se determinó estableciendo el nivel donde el tronco de la planta es cubierto por el suelo como el centro de origen del sistema tridimensional ( $X=0$ ,  $Y=0$ ,  $Z=0$ ). Adicionalmente, se eligió una raíz lateral como centro de origen de la coordenada Y (coordenada de orientación, según Dupuy, 2011). De esta manera, todas las medidas angulares se referenciaron con respecto a estas coordenadas iniciales (Figura 9.4). Para cada raíz se registró su diámetro (con vernier 0.01 mm precisión) en la base de su emergencia y la longitud (con cinta métrica 1 mm precisión). El diámetro siguiente a lo largo de la raíz se determinó por la emergencia de alguna ramificación con diámetro superior a 1.0 mm o bien de un cambio súbito de dirección.



**Figura 9.4.** Referenciación utilizada para registrar las coordenadas 3D de la arquitectura de las raíces de *Jatropha curcas*.

### 9.2.2. Análisis de la arquitectura del sistema de raíces y su índice de simetría

El análisis de la arquitectura de este sistema se realizó con base en observaciones personales y el estudio reportado por Reubens *et al.* (2011) para raíces de *J. curcas*, considerando que la simetría del sistema de raíces consiste en:

- Una raíz pivotante orientada verticalmente
- Cuatro raíces laterales simétricamente distribuidas en el plano horizontal.
- Los diámetros de las laterales son iguales (están simétricamente distribuidos).
- Todas las raíces laterales inician en un mismo punto.

Tal simetría podría medirse en una escala de 0-1. Los parámetros seleccionados para determinarla fueron:

a) La distribución simétrica de las cuatro raíces laterales en el plano horizontal:

$$\bullet_{\text{symm}} = [(\bullet_{12} - 90^\circ) + (\bullet_{23} - 180^\circ) + (\bullet_{34} - 270^\circ)] / 540^\circ \quad (9.1)$$

Donde

$\bullet_{ij}$  = Ángulo horizontal entre la lateral  $ij$  y la referencia inicial.

0 = perfectamente simétrico, 1 = todas las laterales en un mismo punto.

**Modificaciones al modelo propuesto.** En esta investigación se consideró el comportamiento de las raíces de *J. curcas* bajo tres suelos diferentes, por lo que los siguientes parámetros se proponen como modificaciones al modelo propuesto por Reubens *et al.*, (2011):

b) Simetría del diámetro de las cuatro raíces laterales:

$$D_{\text{symm}} = \frac{\sum_{i=1}^4 (D_i - \bar{D})^2}{D_{\text{max}}^2} \quad (9.2)$$

Donde

$D_i - \bar{D}$  = Diámetro de la raíz  $i$ -ésima – Diámetro promedio

$D_{\text{max}}^2$  = Cuadrado del Máximo diámetro encontrado

0 = perfectamente simétricos, 1 = una sola raíz lateral.

c) Desviación de la horizontal ( $\bullet_{\text{Symm}}$ )

Este índice fue calculado por Reubens *et al.* (2011) considerándolo como una desviación del ángulo oblicuo de  $45^\circ$ , resultante entre la raíz lateral y la intercepción con el límite de la Zona de Reducción Rápida de la Pivotante (Zone of Rapid Taper o ZRT, definida por Danjon *et al.*, 2005 como la distancia que comprende 2.2 veces el diámetro de la base del tallo —Db). Sin embargo, en esta investigación se considera que este índice no representa realmente la simetría del sistema, por lo que se propone evaluar la constante en el grado de inclinación de las laterales con respecto a la horizontal (Figura 9.5) de la siguiente manera:

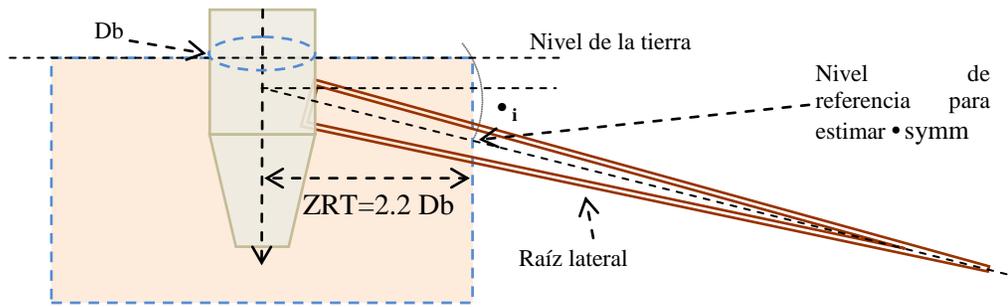
$$\theta_{\text{symm}} = \frac{\sum_{i=1}^4 (\theta_i - \bar{\theta})^2}{\theta_{\text{max}}^2} \quad (9.3)$$

Donde

$\theta_i$  = Ángulo formado entre la horizontal y la raíz  $i$  al interceptar la zona ZRT.

$\theta_{\text{max}}$  = Máximo  $\theta$  encontrado.

0 = perfectamente horizontal, 1 = perfectamente vertical.



**Figura 9.5.** Determinación de  $\bullet_{symm}$  a partir del ángulo con la horizontal.

**d) Desviación de Longitud Media estándar del tronco ( $\bullet_{LCM}$ ):**

LCM representa la longitud media entre el origen en el tronco y el punto de ramificación de las raíces laterales. El origen en el tronco se estableció previamente como el nivel donde la tierra empieza a cubrir al tallo de la planta (Figura 9.4). Reubens *et al.* (2011) consideraron esta longitud como un valor arbitrario de 2.5 cm. Sin embargo, este valor no puede ser aplicado de manera general por que la distancia entre el inicio de la parte subterránea y las ramificaciones de las raíces dependerá de la profundidad a la que se haya sembrado la semilla, y el tipo de suelo donde se encuentre localizada, en otros factores. Por lo que se propone un índice que considera un LCM promedio obtenido en cada tipo de suelo, quedando:

$$\bullet_{LCM} = \text{Abs}((\text{MeanLCM}) - (\text{ST\_MeanLCM})) / (\text{Max}(\text{StumpLength}) - \text{ST\_MeanLCM}) \quad (9.4)$$

Donde:

ST\_MeanLCM = Promedio de longitudes LCM del suelo donde se encuentra la planta (Arenoso, Franco-Arenoso, Franco-Arcilloso)

MeanLCM = LCM de las raíces laterales en una planta específica.

StumpLength = Distancia del origen del tronco a la ramificación.

Los siguientes índices se tomaron igual que en el modelo propuesto por Reubens *et al.* (2011)

**e) Variabilidad dentro del LCM para laterales individuales:**

$$\text{LCM}_{symm} = ((\text{LCM}_2 - \text{LCM}_1) + (\text{LCM}_3 - \text{LCM}_2) + (\text{LCM}_4 - \text{LCM}_3)) / \text{StumpLength} \quad (9.5)$$

Donde

LCM<sub>i</sub> = LCM de la raíz i.

0 = todas las laterales se originan en un mismo punto, 1 = dos laterales se originan en la punta del tronco y dos al final del mismo.

f) Similitud total del modelo (SI):

El índice de similitud que define el modelo de *J. curcas* se propuso como el promedio de los índices específicos de la siguiente manera:

$$SI = (\bullet \text{ symm} + D\text{symm} + \bullet \text{ symm} + 0.5 \bullet \text{ LCM} + 0.5 \times \text{LCMsymm})/4 \quad (9.6)$$

Donde un SI de cero representa un sistema que satisface perfectamente el modelo propuesto.

### 9.2.3. Representación y análisis 3D

Los valores obtenidos de la medición de las raíces al ser desenterradas se codificaron conforme Dupuy (2011) y mediante la metodología de codificación MTG, para estimar las coordenadas espaciales correspondientes a cada punto y representar los sistemas de raíces. Posteriormente se utilizó el programa AMAPmod (AMAP, 2009; Godin *et al.*, 1999; Danjon *et al.*, 1999), desarrollado específicamente para estudiar arquitectura de plantas, para obtener las gráficas 3D para cada sistema. Para cada sistema se estimaron los volúmenes de las cinco raíces principales y sus ramificaciones con diámetros basales superiores a 1.0 mm, conforme al [Apéndice B.3](#), y el área proyectada por el sistema se estimó en base a la longitud máxima de las raíces laterales.

#### 9.2.3.1. Análisis estadístico

Los datos obtenidos durante el cálculo del Índice de Simetría, el volumen y el área proyectada de los sistemas de raíces fueron analizados aplicando ANOVAs de una vía para determinar significancia entre tratamientos. Las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas se aplicaron *a priori* para poder determinar la aplicación de los métodos paramétricos o no paramétricos correspondientes. Los datos normales fueron analizados mediante el Modelo Lineal General y las comparaciones pareadas mediante el método de Holm-Sidak; mientras que los datos no normales se analizaron mediante el método de Kruskal-Wallis y las comparaciones pareadas mediante el método de Dunn; ambos con un nivel de significancia del 5%. Se utilizó el programa SigmaPlot versión 10 para realizar los análisis.

## 9.3. Resultados y discusión

### 9.3.1. Arquitectura del sistema, simetría e índice de similitud

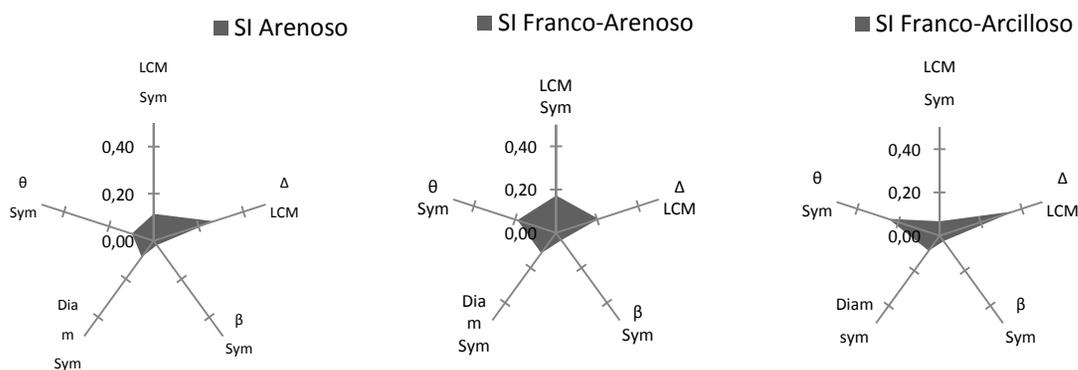
Los índices promedio de simetría obtenidos para cada sustrato se muestran en el [Cuadro 9.1](#). No se detectaron diferencias significativas para ningún índice ( $P > 0.05$ ). Los SI generales tampoco tuvieron diferencias significativas entre sustratos ( $P > 0.05$ ), lo cual indica que las desviaciones en la arquitectura de raíces de *J. curcas* se mantuvieron similares independientemente del tipo de suelo donde se encontró. La desviación promedio del modelo fue de 13%, para todos los sustratos, siendo

las mayores desviaciones las causadas por •symm y Dsymm. Para Dsymm y •symm, Reubens *et al.*, (2011) reportaron un incremento en la desviación de 13% y 7% respectivamente, entre dos semanas y un mes de edad de las raíces de *J. curcas*. Esto indica que los diámetros y los ángulos de inclinación de las raíces laterales fueron los más sensibles al ambiente, independientemente del tipo de suelo. Una representación gráfica del comportamiento de los índices se observa en la [Figura 9.6](#). Un diagrama pentagonal que representa el alcance de cada índice muestra a •symm como el índice más cercano al modelo, lo que indica que la distribución equidistante de las raíces laterales es el patrón genético más dominante de la arquitectura original de esta especie.

**Cuadro 9.1.** Índices de simetría promedio ( $\pm$ •) de raíces de *Jatropha curcas* en tres tipos de suelo.

Suelo	•symm	Dsymm	•symm	• LCM	LCMsymm	SI
Arenoso	0.02 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	0.09 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	0.10 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>	0.27 $\pm$ 0.26 <sup>a</sup>	0.11 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	0.10 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>
Franco-Arenoso	0.04 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	0.12 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>	0.19 $\pm$ 0.20 <sup>a</sup>	0.21 $\pm$ 0.20 <sup>a</sup>	0.17 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	0.14 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>
Franco-Arcilloso	0.03 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	0.09 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	0.25 $\pm$ 0.20 <sup>a</sup>	0.37 $\pm$ 0.28 <sup>a</sup>	0.07 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	0.15 $\pm$ 0.09 <sup>a</sup>

<sup>a,b</sup> Las medias en las columnas que no comparten la misma letra son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).



**Figura 9.6.** Gráficos de índices de simetría de *J. curcas* en tres tipos de suelo.

En el análisis de la arquitectura del sistema también es importante considerar el ángulo de inclinación de la raíz pivotante y las laterales, ya que su orientación impacta sobre su fijación al suelo (Gaytán *et al.*, 2005; Danjon y Reubens, 2008). En el [Cuadro 9.2](#) se observa que las pivotantes de *J. curcas* de tres meses manifiestan una desviación menor al 6% con respecto a la vertical, independientemente del sustrato, mientras que los ángulos de sus raíces laterales promedian una inclinación de  $19^{\circ} \pm 3.5$ . Esta simetría indica que la función de soporte la provee principalmente la pivotante, mientras que las raíces laterales realizan principalmente funciones de exploración del suelo (Arias, 2004), ya que sus ángulos de inclinación las colocan en zonas muy superficiales (Dupuy *et al.*, 2005b).

**Cuadro 9.2.** Ángulos de inclinación promedio ( $\pm$ ) de las raíces principales de *J. curcas* en la ZRT.

Suelo	Ángulo de inclinación de pivotante	Ángulo de inclinación de laterales
Arenoso	-89.36 $\pm$ 4.48 <sup>a</sup>	-20.71 $\pm$ 4.79 <sup>a</sup>
Franco-Arenoso	-85.21 $\pm$ 3.72 <sup>a</sup>	-18.59 $\pm$ 3.05 <sup>a</sup>
Franco-Arcilloso	-88.67 $\pm$ 6.12 <sup>a</sup>	-17.94 $\pm$ 3.31 <sup>a</sup>

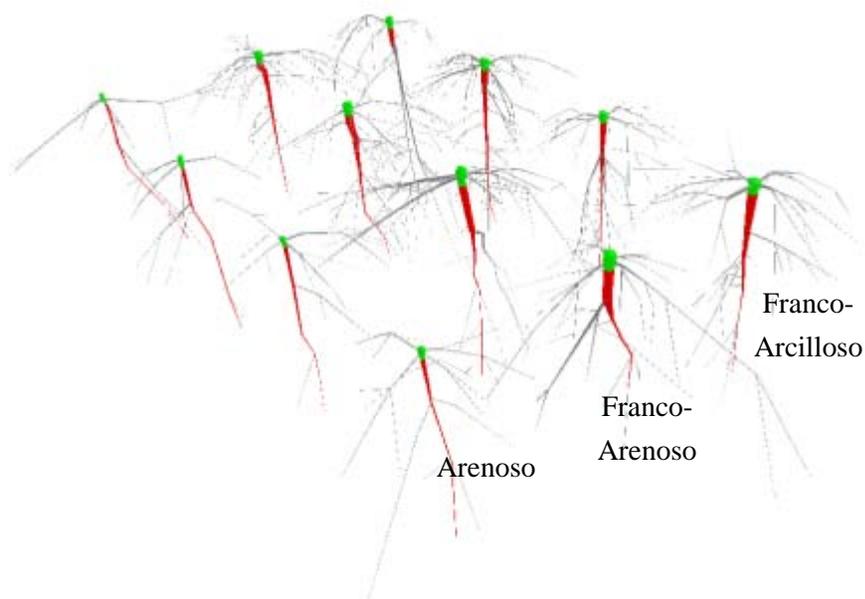
<sup>a,b</sup> Las medias en las columnas que no comparten la misma letra son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).

### 9.3.2. Representación y análisis 3D

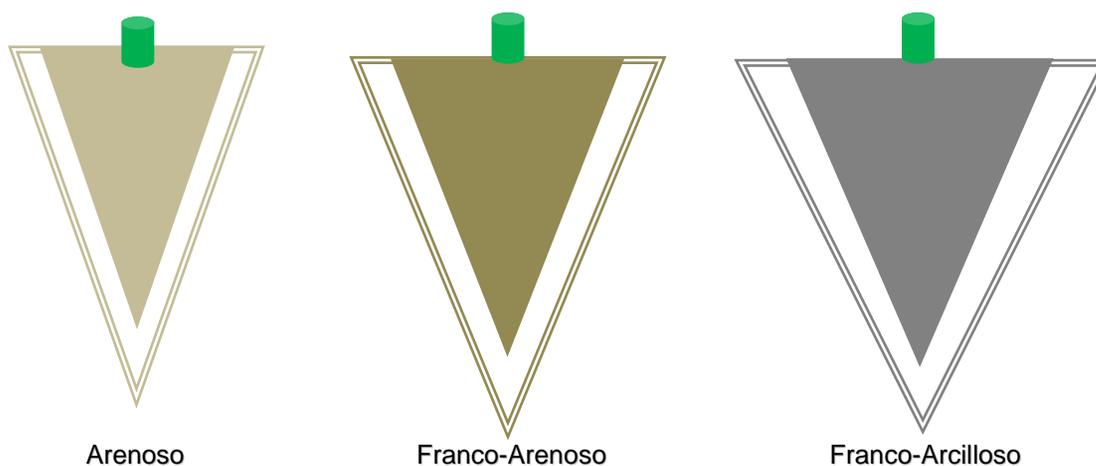
En la [Figura 9.7](#) se muestra que los sistemas de raíces de *J. curcas* tuvieron un desarrollo similar en suelos Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso, mientras que en suelo arenoso tuvieron un desarrollo menor. Este resultado se comprueba al analizar las dimensiones de longitud, diámetro de tallos, número de ramas a partir de las cinco raíces principales y el volumen estimado de los sistemas, que son similares entre suelo Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso ( $P > 0.05$ ) y superiores al suelo Arenoso ( $P < 0.05$ ), como se observa en el [Cuadro 9.3](#). No obstante las diferencias en el desarrollo de los sistemas, las longitudes de las raíces principales fueron similares en los tres tipos de suelo ( $P > 0.05$ ); por lo que la superficie proyectada por los sistemas fue similar en los tres tipos de suelo ([Figura 9.8](#)). La elongación de las raíces principales a expensas de una reducción en su diámetro ([Cuadro 9.3](#)), es una estrategia para alcanzar zonas más profundas y húmedas (Tsakalimi *et al.*, 2009). Así mismo, esta característica de *J. curcas* de mantener una longitud de raíces alta, a pesar de deficiencias nutricionales en el sustrato, le confiere una mayor capacidad de sobrevivencia en suelos pobres (Malamy, 2005). Ya que los sistemas de raíces con una larga estructura principal son más eficientes para adquirir agua y nutrientes que los sistemas densamente ramificados, por que exploran más suelo por unidad de volumen (Tsakalimi *et al.*, 2009). Esta condición se observa en las raíces de *J. curcas* que crecieron en suelo Arenoso; pero es diferente de los sistemas en suelos Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso, con ramificaciones hasta 10 veces mayores ([Figura 9.7](#) y [Cuadro 9.3](#)). Por lo que se puede considerar que esta especie es capaz de desarrollar adaptaciones morfológicas que le otorguen características para ajustarse a suelos pobres en nutrientes y sobrevivir exitosamente, aunque en estados de desarrollo menor o latente.

### 9.3.3. Relación tallo:raíz con sustrato de crecimiento

La relación de peso seco tallo: raíz se mantuvo estadísticamente similar en los tres tipos de suelo ( $P > 0.05$ ) ([Cuadro 9.3](#)). Generalmente bajos niveles de nitrógeno y azufre, como en el caso del suelo Arenoso, provocarían un aumento en el peso de las raíces con respecto al tallo, al proveer más recursos a éstas para aumentar el volumen de suelo explorable (Vamerali *et al.*, 2003). Sin embargo, en el caso de *J. curcas*, esta relación podría ser compensada por el decremento en el diámetro de las raíces, lo que le permite explorar la misma cantidad de suelo y mantener sus reservas en el tallo; por lo que la proporción tallo:raíz es similar en diferentes sustratos.



**Figura 9.7.** Modelos 3D de raíces de *J. curcas* en suelo: Arenoso, Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso.



**Figura 9.8.** Superficie promedio (+•) proyectada por raíces de *J. curcas* en tres tipos de suelo.

**Cuadro 9.3.** Medidas promedio ( $\pm$ ) de raíces principales.

Parámetro	Raíz	Sustrato		
		Arenoso	Franco-Arenoso	Franco-Arcilloso
Longitud de raíces (cm)	Total	115.9 $\pm$ 17.0 b	132.0 $\pm$ 18.2 ab	144.6 $\pm$ 38.6 a
	Pivotante	36.1 $\pm$ 85.1 a	39.7 $\pm$ 95.9 a	41.1 $\pm$ 72.1 a
	Laterales principales	27.7 $\pm$ 8.5 a	32.3 $\pm$ 10.1 a	37.5 $\pm$ 14.6 a
Diámetro basal (mm)	Pivotante	8.2 $\pm$ 1.3 b	20.1 $\pm$ 4.4 a	18.4 $\pm$ 3.2 a
	Laterales principales	2.9 $\pm$ 0.4 b	4.8 $\pm$ 1.9 a	5.2 $\pm$ 1.3 a
Diámetro del ápice (mm)	Pivotante	0.70 $\pm$ 0.25 a	0.63 $\pm$ 0.17 a	0.70 $\pm$ 0.15 a
	Laterales principales	0.41 $\pm$ 0.11 b	0.53 $\pm$ 0.09 ab	0.59 $\pm$ 0.19 a
Ramificaciones	Diámetro basal > 2 mm	0.1 $\pm$ 0.3 b	5.9 $\pm$ 4.5 a	10.0 $\pm$ 7.2 a
Volumen de	Total	7.7 $\pm$ 2.2 b	53.5 $\pm$ 22.2 a	48.6 $\pm$ 21.7 a

Parámetro	Raíz	Sustrato		
		Arenoso	Franco-Arenoso	Franco-Arcilloso
raíces (cm <sup>3</sup> )	Pivotante	3.8 ± 1.4 <b>b</b>	31.6 ± 11.9 <b>a</b>	27.4 ± 12.3 <b>a</b>
	Laterales principales	2.9 ± 0.7 <b>b</b>	15.9 ± 8.0 <b>a</b>	17.2 ± 8.4 <b>a</b>
Peso seco de raíces (g)	Total	0.61 ± 0.20 <b>b</b>	5.33 ± 1.74 <b>a</b>	5.34 ± 3.02 <b>a</b>
	Pivotante	0.44 ± 0.01 <b>b</b>	4.65 ± 0.71 <b>a</b>	4.05 ± 0.21 <b>a</b>
	Laterales principales	0.16 ± 0.18 <b>b</b>	0.68 ± 0.40 <b>a</b>	1.29 ± 0.70 <b>a</b>
Tallo: Raíz	Raíz: peso total	20.3 ± 7.3 <b>a</b>	18.2 ± 2.9 <b>a</b>	17.0 ± 4.0 <b>a</b>

<sup>a,b</sup> Las medias en las columnas que no compartan la misma letra son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).

#### 9.4. Conclusiones

El sistema de raíces de *J. curcas* se ajusta a un modelo que contiene una raíz pivotante orientada verticalmente y cuatro raíces laterales equidistantes, que desarrollan de manera similar independientemente del sustrato donde se encuentre. Este sistema le confiere un alto nivel de simetría y le permite mantener una buena estabilidad ante perturbaciones externas. Las raíces tienen también una alta plasticidad al adaptarse morfológicamente a las condiciones nutrimentales del sustrato donde se encuentran y explorar eficientemente el suelo, con un menor sacrificio de la parte aérea. Por lo que se puede afirmar que esta especie está adaptada para penetrar suelos pesados y con alto contenido de nutrientes, pero también para sobrevivir en suelos pobres.

## X. Aislamiento y patogenicidad de un posible *Pythium aphanidermatum* en *Jatropha curcas* L. no tóxica\*

### 10. Introducción

Aunque los orígenes de *Jatropha curcas* se ubican entre México y Centroamérica (Heller, 1996 y Maes *et al.* 2009), existe poca información sobre sus posibles amenazas patológicas en el trópico mexicano. Esta situación se da principalmente por los escasos antecedentes sobre plantaciones comerciales establecidas en estas zonas, ya que hasta hace pocas décadas la especie tenía poco interés comercial para los productores de su región de origen (Schmook y Sanchez, 2000). Para la forma tóxica de *J. curcas*, se cuenta con estudios sobre patógenos del suelo realizados en África y Nicaragua, en donde se reporta susceptibilidad de la planta a *Pythium* spp, *Phytophthora* spp y *Fusarium* spp (Heller, 1996). También se reportan problemas de pudrición de tallos en asociación con suelos mal drenados y condiciones de alta humedad, encontrándose a *Fusarium* spp. en las muestras analizadas (Padilla y Monterroso, 2007). En Guatemala, bajo condiciones de alta humedad (2000 mm anuales), se reporta a *Fusarium* spp y *Erwinia* spp como patógenos de elevada incidencia que atacan los tallos de la planta. (Biocombustibles de Guatemala, 2008). Para la forma no tóxica, en México se tiene mucha menor información. El Centro de Validación y Transferencia de Tecnología de Sinaloa y la Fundación Produce Sinaloa, que tuvieron experiencias con plantaciones no tóxicas solamente reportan a *Phymatotrichum omnivorus* afectando siembras realizadas en suelos con poco drenaje (Félix, 2008).

Por su parte, al género *Pythium* se le ha responsabilizado de la necesidad de abandonar la tierra en la agricultura trashumante (García, 2010), aunque su papel como limitante de la productividad suele confundirse con otros factores debido a la complejidad de la vida del suelo, donde se desarrolla. Una especie adaptada al trópico es *Pythium aphanidermatum* (Edson) Fitz. Un cromista del suelo de amplia distribución global; común en regiones cálidas porque su crecimiento se favorece con temperaturas superiores a los 30° C (Rodríguez, 2001; Watanabe, 2002). *P. aphanidermatum* se caracteriza por dañar frutos, semillas, raíces y bases de tallos de plántulas juveniles (Parker, 2009). En México este patógeno se ha detectado atacando a más de 60 especies vegetales (Rodríguez, 2001). Entre otros, ataca diversos cultivos como solanáceas y cucurbitáceas en suelos de Sinaloa (Romero, 1988); así como frijol (*Phaseolus vulgaris*) en el valle de México (Rodríguez, 2001) y fresa (*Fragaria x ananassa*) en Michoacán (Ceja-Torres *et al.*, 2008). Este cromista podría ser el *Pythium* spp. reportado por Heller, (1996) como causante de ahogamiento (*damping off*) y pudrición de tallos en plántulas de *J. curcas*; aunque no se encuentra especificada la especie, ni se reportan las

pérdidas de manera cuantificada. Dado que las plantas son más vulnerables al ataque de *Pythium* durante la germinación o sus primeros estadíos y, a que las suculentas (como *J. curcas* lo es en su etapa juvenil) son más susceptibles a su ataque (Paulus y Correl, 2001), es probable que este patógeno sea causante de una baja tasa de germinación y muerte prematura de las plántulas de esta especie cuando se registran condiciones de alta humedad, como ocurren generalmente en los trópicos. En este contexto, el objetivo de este estudio fue definir la capacidad patogénica del aislamiento de un posible *Pythium aphanidermatum* durante las etapas de pre-emergencia y post-emergencia de la forma no tóxica de *J. curcas* localizada en la región central de Veracruz, México.

### **10.1.1. Objetivo**

Determinar los efectos patogénicos de *Pythium aphanidermatum* sobre las etapas de pre-emergencia y post-emergencia de la forma no tóxica de *J. curcas*.

### **10.1.2. Hipótesis**

La forma no tóxica de *Jatropha curcas* es sensible a *Pythium aphanidermatum* durante las etapas de pre-emergencia y post-emergencia.

## **10.2. Materiales y métodos**

### **10.2.1. Localización del área de estudio**

La investigación de campo se llevó a cabo en el Sitio Veracruz (Apéndice C). El clima en esta región se considera cálido subhúmedo, con temperatura anual promedio de 23° C y máximas promedio de 32° C (INEGI, 2010).

### **10.2.2. Selección y preparación del material vegetativo**

Las semillas de *J. curcas* utilizadas en los ensayos corresponden a genotipos considerados no tóxicos o de muy baja toxicidad procedentes de la región de Papantla, Veracruz (coordenadas: N 20° 15' 17", O 97° 15' 32" y 71 msnm), colecta Enero-Marzo 2009. Un análisis a una muestra de semillas escarificadas de la misma procedencia indicaron un nivel de forbol ésteres de 0.11 mg/g (Schmook y Sanchez, 2000). Con la finalidad de eliminar presencia de patógenos en su superficie, las semillas fueron desinfectadas con peróxido de hidrógeno de 20 volúmenes durante 60 segundos antes de su siembra.

### **10.2.3. Detección y aislamiento del patógeno**

Esta investigación se inició en abril del 2009, con la recolección de semillas y plántulas de reciente emergencia localizadas en la región y severamente afectadas por un patógeno. Las muestras fueron transportadas en bolsas de plástico al laboratorio, donde se procedió a lavarlas con agua corriente y

detergente, y posteriormente se sometieron a 30 segundos de inmersión en peróxido de hidrógeno de 20 volúmenes para eliminar cualquier otro contaminante superficial. Las muestras fueron segmentadas y secadas sobre toallas estériles para posteriormente colocarlas en cajas de Petri conteniendo medio de cultivo harina de maíz-agar adicionado con antibióticos que permiten el aislamiento selectivo de especies de *Pythiaceos*. Los antibióticos usados fueron: Rifamicina, Ampicilina, Pimaricina y Penta-Cloro-Nitro-Benceno (PCNB), aplicados conforme al método desarrollado por Tsao y Ocana (1969). Las cajas de Petri se colocaron dentro de bolsas negras gruesas para evitar la luz y se introdujeron en una incubadora a temperatura constante de 35° C para favorecer las condiciones de desarrollo del cultivo. El desarrollo de un *Pythiaceo* se observó a las 48 horas después de la siembra.

Para identificar al patógeno cultivado se procedió a promover su esporulación, para lo cual se hirvieron hojas de pasto (*Festuca arundinacea*) durante 5 minutos. La solución se dejó enfriar a temperatura ambiente y posteriormente se vertió en cajas de Petri a las que se agregaron colonias tomadas de los márgenes de los discos que contenían al patógeno. Las cajas se colocaron dentro de una estufa germinadora a 35° C e iluminación constante de luz fría. Después de un tiempo aproximado de 48 horas se realizaron las observaciones de la esporulación obtenida con microscopio óptico de 20x y 40x de magnificación. Las estructuras formadas se caracterizaron por la producción de oosporas, anteridios únicos e intercalares o terminales, formación de esporangios lobulados (hinchamientos hifales) con formación de vesículas cortas para la liberación de zoosporas; aspectos que definen la posible especie como *Pythium aphanidermatum* de acuerdo con las claves de Van Der Plaats-Niterink (1981) y el fitopatólogo García-Espinoza (2010).

#### **10.2.3.1. Preparación e inoculación de los sustratos**

Los sustratos utilizados fueron: Arenoso Franco-Arenoso, y Franco-Arcilloso (Apéndice A.2). Antes de la inoculación se esterilizaron los suelos (suelo colocado en jarras conservas de 1 litro, sometido a 20 lb psi. en autoclave por cuatro horas durante dos días consecutivos). Posteriormente se adicionaron los aislamientos del *Pythiaceo* y se mezclaron uniformemente. Las jarras se cubrieron para protegerlas de la luz y los cultivos sembrados se mantuvieron en incubación durante 20 días a temperatura ambiente (25° C). La cuantificación del número de unidades formadoras de colonias (ufc) se realizó después del periodo de almacenamiento de 20 días, mediante el método de dilución en placa empleando concentraciones:  $1 \times 10^{-2}$ ,  $1 \times 10^{-3}$  y  $1 \times 10^{-4}$  sembradas en cajas de Petri conteniendo el medio de cultivo para aislamiento selectivo de especies de *Pythiaceos* mencionado anteriormente. Se prepararon cinco cajas de Petri por cada dilución y se colocaron en el mismo ambiente controlado detallado anteriormente. Las ufc se contabilizaron 48 horas después de la siembra.

#### 10.2.4. Patogenicidad en condición de pre-emergencia

La observación de la patogenicidad en pre-emergencia se realizó mediante dos ensayos con sustratos inoculados previamente con el patógeno. En ambos ensayos durante un periodo de 14 días se registró el número de semillas germinadas y los efectos sobre las plántulas sobrevivientes. El Cuadro 10.1 resume los diseños y condiciones experimentales.

**Ensayo I:** se implementó bajo las condiciones ambientales naturales de la región (Cuadro 10.1). El diseño consistió de dos tratamientos completamente al azar (sustrato estéril y sustrato inoculado), cada tratamiento con dos niveles (sustrato arenoso y sustrato arcilloso) y 100 individuos por tratamiento. Las semillas de *J. curcas* se sembraron de forma vertical quedando cubiertas completamente por el sustrato a una profundidad igual al largo de la semilla (2 cm aproximadamente). El sustrato fue hidratado diariamente, manteniéndose una humedad en suelo superior al 90% para sustrato arenoso y de 100% para sustrato arcilloso, según estimaciones realizadas con tensiometro Aquater Digital E300.

**Ensayo II:** se realizó en germinadora diseño propio. El diseño fue completamente al azar con dos tratamientos (sustrato estéril y sustrato inoculado) y 40 individuos por tratamiento. Las semillas fueron colocadas en cajas de Petri con suelo franco estéril o inoculado, según correspondiera, a razón de cuatro semillas por caja. Posteriormente se introdujeron en la cámara germinadora con foto-periodos alternados de 12 horas y una temperatura constante de 30° C para los periodos de luz y 24° C para los periodos de oscuridad. Las cajas de Petri se mantuvieron cerradas e hidratadas durante el periodo de observación.

**Cuadro 10.1.** Diseño experimental para determinar patogenicidad pre-emergente con *Pythium aphanidermatum* en semillas de *Jatropha curcas* no tóxica.

Ensayos	Tratamientos	N	Niveles	Condiciones ambientales
Ensayo I	Control (suelo estéril)	100	I. sustrato arenoso II. sustrato arcilloso	*Naturales de la región Temp. promedio: 23-32° C
	<i>P. aphanidermatum</i>	100	I. sustrato arenoso II. sustrato arcilloso	Humedad ambiental: 64% Humedad del sustrato > 90%
Ensayo II	Control (suelo estéril)	40	I. sustrato Franco	Germinadora con luz fría
	<i>P. aphanidermatum</i>	40	I. sustrato Franco	Temp. 24-30° C

#### 10.2.5. Patogenicidad en condición de post-emergencia

Para estudiar esta condición se implementaron dos ensayos, ambos con sustratos arenosos y plántulas emergidas de semillas con en edad promedio de 15 días.

**Ensayo I:** se inició el 25 de junio. El diseño experimental fue completamente al azar con tres tratamientos (cero propágulos de *P. aphanidermatum* por gramo de suelo (ppgs), 160 ppgs y 400 ppgs) y 60 individuos trasplantados aleatoriamente a raíz desnuda a bolsas individuales de polietileno negro de 12 cm de diámetro × 16 cm de fondo conteniendo el tratamiento correspondiente y donde permanecieron por un periodo de 31 días.

**Ensayo II:** Se inició el seis de Octubre. El diseño consistió fue completamente al azar con tres tratamientos (cero ppgs, 160 ppgs y 400 ppgs) y 120 plántulas trasplantadas a raíz desnuda en bolsas de polietileno de 8cm × 16 cm conteniendo el tratamiento correspondiente, y donde permanecieron por un periodo de 64 días.

Posterior a su trasplante, las plántulas fueron regadas diariamente, manteniéndose la humedad del suelo siempre por arriba del 90%, de acuerdo con estimaciones de Tensiometro Aquater Digital E300. Los registros diarios de temperatura ambiente se realizaron con Estación meteorológica Skymaster. En ambos ensayos las plántulas se mantuvieron bajo condiciones ambientales naturales de la región, mismas que fueron registradas, y sin recibir fertilizantes ni soluciones nutrientes. El resumen de los diseños se muestra en el [Cuadro 10.2](#). Las variables registradas durante los ensayos fueron: diámetro basal del tallo al nivel del suelo usando vernier digital (0.001 mm de precisión); altura del tallo al inicio de la emergencia de las últimas hojas usando cinta métrica (1mm precisión); y número de hojas al momento del trasplante. Parámetros que fueron medidos 31 días después del trasplante, cuando se extrajeron para medidas de peso húmedo y seco. Durante el periodo de duración de este experimento, algunas plántulas fueron atacadas por insectos fitófagos, por lo que fueron eliminadas y sus medidas no se consideraron en los análisis. Las variables reportadas fueron previamente analizadas por normalidad y homogeneidad de varianzas para determinar las pruebas ANOVAs de una vía correspondientes a distribuciones normales o anormales, según correspondiera.

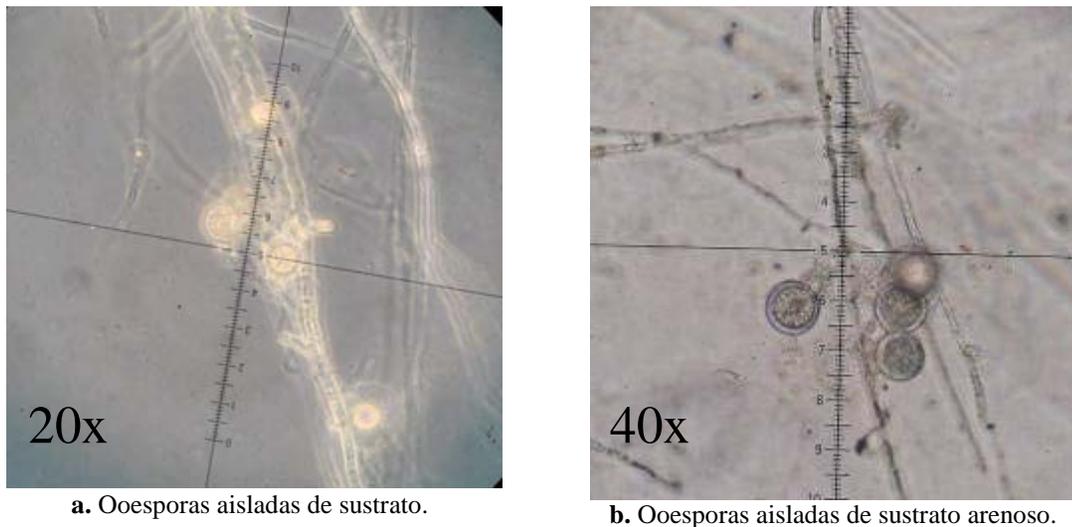
**Cuadro 10.2.** Diseño experimental para determinar patogenicidad post-emergente con *Pythium aphanidermatum* en plántulas de *Jatropha curcas* no tóxica.

Ensayos	Tratamientos	N	Condiciones ambientales		
			Temperatura	Humedad mínima en suelo	Inicio y Periodo
Ensayo I	Control (0 ppgs)	30	Max. 32° C	90%	Junio 25
	Inoculo 160 ppgs	30	Mín. 22° C	90%	31 días
	Inoculo 400 ppgs	30		90%	
Ensayo II	Control (0 ppgs)	40	Max. 30° C	90%	Octubre 6
	Inoculo 160 ppgs	40	Mín. 16° C	90%	64 días
	Inoculo 400 ppgs	40		90%	

### 10.3. Resultados y discusión

#### 10.3.1. Patogenicidad en condición de pre-emergencia

Para el ensayo I, realizado bajo condiciones ambientales naturales, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre porcentajes de germinación en semillas sembradas en sustratos arenosos y arcillosos inoculados con el patógeno (Tukey;  $P < 0.05$ ). Las semillas colocadas en sustrato arenoso tuvieron un porcentaje de muerte pre-emergente del 36%; mientras que las semillas colocadas en sustrato arcilloso tuvieron un porcentaje de muerte pre-emergente del 78%. Los síntomas observados en las semillas que no germinaron consistían en la aparición de estructuras con aspecto de hifas de hongos en el sustrato y sobre las propias semillas. Las estructuras amplificadas (oosporas, esporangios y tipo de micelio) del *Pythiaceo* se pueden apreciar en la [Figura 10.a](#) y [10.b](#).

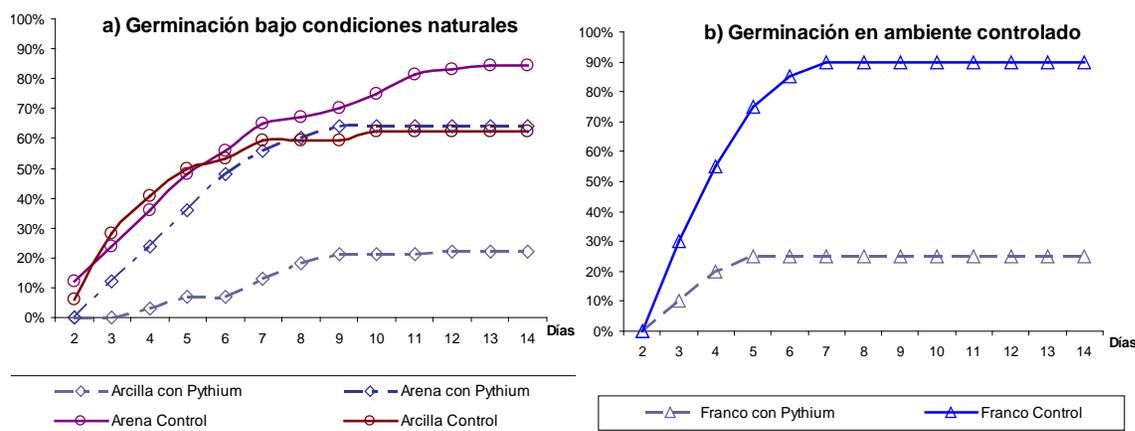


**Figura 10.1.** Oosporas formadas por posible *Pythium aphanidermatum*.

En el ensayo II la inoculación por *P. aphanidermatum*, realizada bajo condiciones controladas, mostró un porcentaje de germinación de solo el 25% de las semillas sembradas. Lo que implicó un decremento de la tasa de germinación del 65% en presencia del patógeno, con relación a las semillas no infectadas, que obtuvieron un porcentaje de 90% de germinación. Estos resultados indicaron diferencias estadísticamente significativas entre el número de semillas infectadas por *P. aphanidermatum* (Tukey,  $P < 0.001$ ) con respecto a las que se encontraron libres del patógeno. Las semillas infestadas que no germinaron mostraron síntomas de pudrición con pérdida total de los embriones. El [Cuadro 10.3](#) muestra un resumen de los porcentajes de germinación obtenidos en ambos ensayos; mientras que la [Figura 10.2](#) permite visualizar las curvas de germinación obtenidas.

**Cuadro 10.3.** Porcentajes de germinación de *Jatropha curcas* bajo condiciones naturales y en germinadora con ambiente controlado en ausencia y presencia del *Pythiaceo*

Ensayos	Tratamientos	N	Porcentajes de germinación
<b>Ensayo I:</b> Condiciones naturales	Control Arena	100	84
	Control Arcilla	100	62
	<i>Pythium</i> Arena	100	64
	<i>Pythium</i> Arcilla	100	22
<b>Ensayo II:</b> germinadora	Control Franco	40	90
	<i>Pythium</i> Franco	40	25



**Figura 10.2.** Porcentaje acumulativo de germinación de semillas de *Jatropha curcas* en presencia y ausencia de *Pythium aphanidermatum*. **a)** Bajo condiciones naturales. **b)** En germinadora con ambiente controlado.

El deterioro de la capacidad de germinación de *J. curcas* en presencia del *P. aphanidermatum* coincide con lo reportado sobre sus efectos negativos durante las etapas de germinación y fases juveniles en otros cultivos (Martin, 1992; Bolton, 1980; Lumsden *et al.*, 1976). La condición de vulnerabilidad de las semillas de *J. curcas* puede residir en que la variedad no tóxica contiene niveles muy bajos de esteroides de forbol (Harinder *et al.*, 2008); mismos que han demostrado tener propiedades fungicidas (Suntornsuk, 2010), lo que probablemente aumenta su sensibilidad al ataque de este patógeno. Los efectos negativos fueron más evidentes cuando las semillas se sembraron en suelo tipo arcilloso bajo las condiciones naturales de la región, obteniéndose un 78% de muerte pre-emergente, y en suelo tipo franco bajo condiciones de temperatura controlada a 30 °C, con un 75% de muerte en pre-emergencia. Sin embargo, el ataque del patógeno se atenúo significativamente bajo las mismas condiciones ambientales naturales, pero en suelos arenosos, obteniéndose el 36% de muerte pre-emergente. Esto indica que el sustrato arenoso fue el más adecuado para obtener un mayor porcentaje de germinación de *J. curcas*. Resultados que coinciden con lo reportado por Kahl *et al.* (2008), quienes al comparar la germinación en sustratos arenosos contra sustratos a base de composta con excreta de ganado vacuno, determinaron mayor germinación en sustratos arenosos. Lo cual coincide de igual manera con lo indicado por Ouwens *et al.* (2007) sobre la capacidad de *J. curcas* para sobrevivir mejor en suelos arenosos que arcillosos. Por otra parte, los análisis de

contenido de materia orgánica y nutrimentos de las muestras de suelo indican que los sustratos francos y arcillosos contenían una cantidad mayor de materia orgánica y macro-nutrimentos (Apéndice A. Cuadro A.2) que los sustratos arenosos. Tal contenido de nutrimentos podría servir de alimento al patógeno, favoreciendo su propagación en el sustrato, a diferencia de los suelos arenosos, donde no se detectó materia orgánica y el contenido de nutrimentos fue significativamente menor. Otro factor importante, es que la arena tiene una menor capacidad de retención de humedad (Aguilera y Martínez, 1996) y *P. aphanidermatum* requiere de condiciones de alta humedad para su desarrollo (Romero, 1988). Por lo que es probable que el sustrato arenoso sea la mejor opción para disminuir la muerte pre-emergente en semillas de *J. curcas*, altamente susceptibles a este patógeno. Por tanto se sugiere usar suelo arenoso para germinar semillas de *J. curcas* y una vez obtenidas las plántulas, éstas pueden ser trasplantadas a cualquier tipo de suelo donde se tengan condiciones adecuadas.

### **10.3.2. Patogenicidad en condición de post-emergencia**

#### **10.3.2.1. Patogenicidad post-emergente en plántulas infestadas desde la semilla**

Los resultados aquí presentados se refieren a niveles de patogenicidad de *P. aphanidermatum* en plántulas germinadas de las semillas infestadas con el patógeno durante los experimentos de patogenicidad pre-emergente.

Para plántulas germinadas bajo condiciones naturales se observó muerte post-emergente del 8% de las plántulas localizadas en arena y un porcentaje de muerte post-emergente del 14% de las plántulas en suelo arcilloso (Cuadro 10.4). Los síntomas post-emergentes consistían en estructuras con aspecto de hifas de hongos en las bases de los tallos y puntas de las raíces de las plántulas germinadas, los cuales causaron la mortalidad en los dos tipos de sustrato. En la Figura 10.3a, b y 3c, se muestra el aspecto de las semillas y plántulas atacadas por el patógeno. En las plántulas mantenidas en germinadora el efecto de *P. aphanidermatum* durante la etapa post-emergente a la reciente germinación mostró severos daños a las raíces primarias de las plantas durante su desarrollo. En la Figura 10.4 se observan los daños causados en raíces de plántulas cuyas semillas sobrevivieron al ataque pre-emergente del patógeno. La severidad del ataque, que en algunos casos excede la capacidad de regeneración del sistema de raíces, resultó en una muerte post-emergente del 80%. Sin embargo, a pesar de lo dañino del ataque a todas las raíces, es importante destacar que el 100% de las plántulas que sobrevivieron al patógeno después del periodo de duración del experimento, no perecieron al ser trasplantadas en el suelo de la región sin tratamiento alguno.

**Cuadro 10.4.** Porcentajes de sobrevivencia en plántulas germinadas de *Jatropha curcas* bajo condiciones naturales y en germinadora con ambiente controlado, en ausencia y presencia de *Pythium aphanidermatum*.

Ensayos	Tratamientos	N	Porcentajes sobrevivencia
<b>Ensayo I:</b> Condiciones naturales	Control Arena	84	100
	Control Arcilla	62	100
	<i>Pythium</i> Arena	64	92
	<i>Pythium</i> Arcilla	22	86
<b>Ensayo II:</b> germinadora	Control Franco	36	100
	<i>Pythium</i> Franco	10	20



a. Ataque en semilla



b. Ataque durante germinación



c. Ataque en la base del tallo.

**Figura 10.3.** Aspecto de semillas y plántulas de *Jatropha curcas* con muerte pre y post emergente causada por *Pythium aphanidermatum*.



a. Radícula afectada tres días posteriores a la germinación.



b. Radícula dañada cinco días posteriores a la germinación.

**Figura 10.4.** Efectos del ataque de *P. aphanidermatum* sobre radículas en plántulas de reciente germinación.

### 10.3.2.2. Patogenicidad post-emergente en plántulas de 15 días transplantadas a suelo infestado con *P. aphanidermatum*

**Ensayo I.** Al inocular *P. aphanidermatum* en la etapa post-emergente se observó un amarillamiento en las hojas cotiledonares durante la primera semana después de transplantadas las plántulas, respuesta que no se observó en los individuos libres del patógeno. Sin embargo, al finalizar el periodo de experimentación de 31 días los resultados no indicaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en los crecimientos diferenciales del diámetro del tallo ( $H = 5.56$ ;  $P$

= 0.07), la altura de la planta (H = 1.93; P = 0.38) ni el número de hojas generadas (H = 0.47; P = 0.8). Por otra parte, el análisis de los pesos secos por partes: sistema de raíces (H = 1.01; P = 0.61), tallos (H = 0.024; P = 0.99), hojas (H = 0.12; P = 0.94) y pesos totales (H = 0.003; P = 0.998) de todas las muestras, al final del experimento tampoco proporcionó diferencias significativas entre tratamientos (Cuadros 10.5 y 10.6 y gráficas de Figura 10.5).

**Cuadro 10.5.** Crecimientos diferenciales promedios ( $\pm$ ) de longitud de tallo, altura y número de hojas bajo los tres tratamientos durante un periodo de 31 días.

Tratamientos	N	Diámetro de tallo (mm)	Altura de tallo (mm)	Número de hojas
Control -0- ppgs	20	1.50 $\pm$ 0.46 <sup>a</sup>	54.58 $\pm$ 53.18 <sup>a</sup>	1.90 $\pm$ 1.10 <sup>a</sup>
Inoculo 160 ppgs	17	1.29 $\pm$ 0.36 <sup>a</sup>	32.18 $\pm$ 44.92 <sup>a</sup>	1.94 $\pm$ 0.75 <sup>a</sup>
Inoculo 400 ppgs	16	1.63 $\pm$ 0.40 <sup>a</sup>	35.44 $\pm$ 33.65 <sup>a</sup>	2.13 $\pm$ 0.72 <sup>a</sup>

<sup>a,b</sup> Las medias en las columnas que no comparten la misma letra son significativamente diferentes (P < 0.05).

**Cuadro 10.6.** Valores promedios ( $\pm$ ) de pesos secos bajo los tres tratamientos durante un periodo de 31 días.

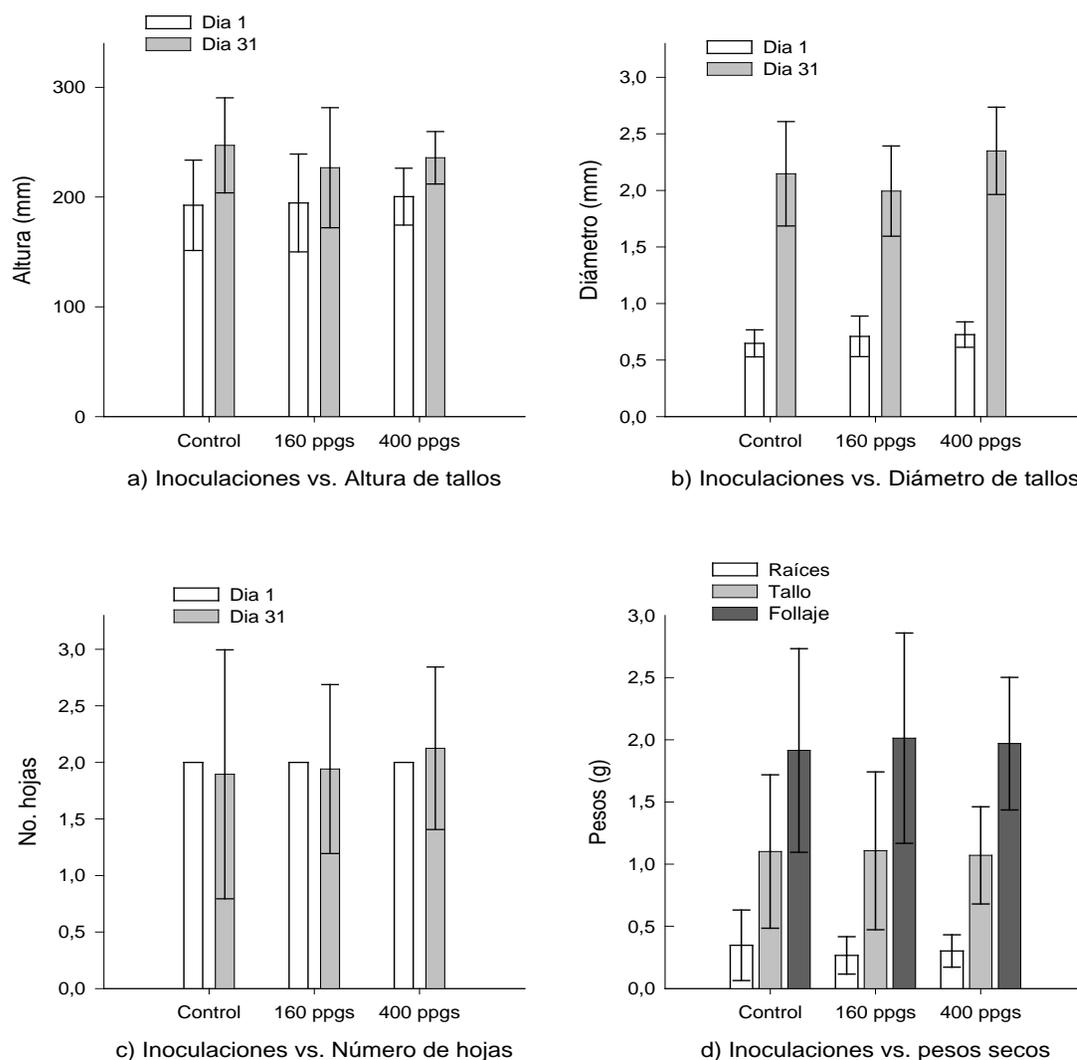
Tratamientos	n	Raíces (g)	Tallos (g)	Follaje (g)
Control -0- ppgs	20	0.348 $\pm$ 0.28 <sup>a</sup>	1.102 $\pm$ 0.62 <sup>a</sup>	1.914 $\pm$ 0.18 <sup>a</sup>
Inoculo 160 ppgs	17	0.267 $\pm$ 0.15 <sup>a</sup>	1.107 $\pm$ 0.63 <sup>a</sup>	2.013 $\pm$ 0.21 <sup>a</sup>
Inoculo 400 ppgs	16	0.302 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>	1.071 $\pm$ 0.39 <sup>a</sup>	1.969 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>

<sup>a,b</sup> Las medias en las columnas que no comparten la misma letra son significativamente diferentes (P < 0.05).

**Ensayo II.** El experimento de inoculación post-emergente para un periodo de dos meses no indicó diferencias significativas para el crecimiento diferencial del diámetro del tallo (H = 0.33; P = 0.85), ni tampoco para el número de hojas (H = 4.38; P = 0.11). En cambio, se encontraron diferencias significativas en relación con la altura de los tallos (H = 24.608; P < 0.001); donde el mayor crecimiento en altura se registró en las plántulas inoculadas a 160 ppgs con respecto a las del grupo control y a las del grupo inoculadas a 400 ppgs. Sin embargo, esta diferencia no indica efectos patogénicos negativos sobre los grupos sometidos a las pruebas. Por otra parte, en los pesos secos finales sólo hubo diferencias significativas en el peso del follaje, ya que el grupo inoculado con 400 ppgs mostró un peso ligeramente mayor al grupo control (H = 7.4, P = 0.02). Situación que tampoco parece indicar efectos patogénicos negativos sobre el grupo sometido al mayor contenido de estos *Pythiaceos*. En los Cuadros 10.7 y 10.8 y las gráficas de la Figura 10.6, se muestran promedios y desviación estándar de las tallas y los pesos secos obtenidos en el experimento.

La baja infección registrada por *P. aphanidermatum* al ser inoculado en plántulas de *J. curcas* de 15 días de edad evidencia la capacidad de la planta para tolerar al patógeno en sus etapas de mayor desarrollo. La menor capacidad del patógeno de infección a plántulas de mayor edad puede estar asociada con el incremento en la lignina de tallos y raíces, ya que se ha encontrado que ésta incrementa la resistencia a los patógenos fúngicos (Ogundana, 1971). Sin embargo, es importante considerar la disminución de la temperatura (por abajo de los 20 °C para el periodo de 64 días) y el tipo de suelo utilizado (franco y arenoso), con menor contenido de nutrimentos y menor capacidad

de retención de humedad que el suelo arcilloso, como atenuantes de la potencia de infección del patógeno. De hecho Michereff *et al.* (2005) indica que la temperatura puede determinar la frecuencia de las especies de hongos patógenos y suprimir diferencialmente sus poblaciones.



**Figura 10.5.** Tallas y pesos promedio de plántulas de *Jatropha curcas* para los tres tratamientos con inoculaciones de *P. aphanidermatum* por un periodo de 31 días. **a)** Alturas iniciales y finales. **b)** Diámetros de base de tallo iniciales y finales. **c)** Número de hojas al inicio y al final del experimento. **d)** Pesos secos finales. Las barras de error representan la desviación estándar de la media.

**Cuadro 10.7.** Valores diferenciales promedios ( $\pm$ ) de longitud, altura de tallo y número de hojas bajo los tres tratamientos después de un periodo de 64 días.

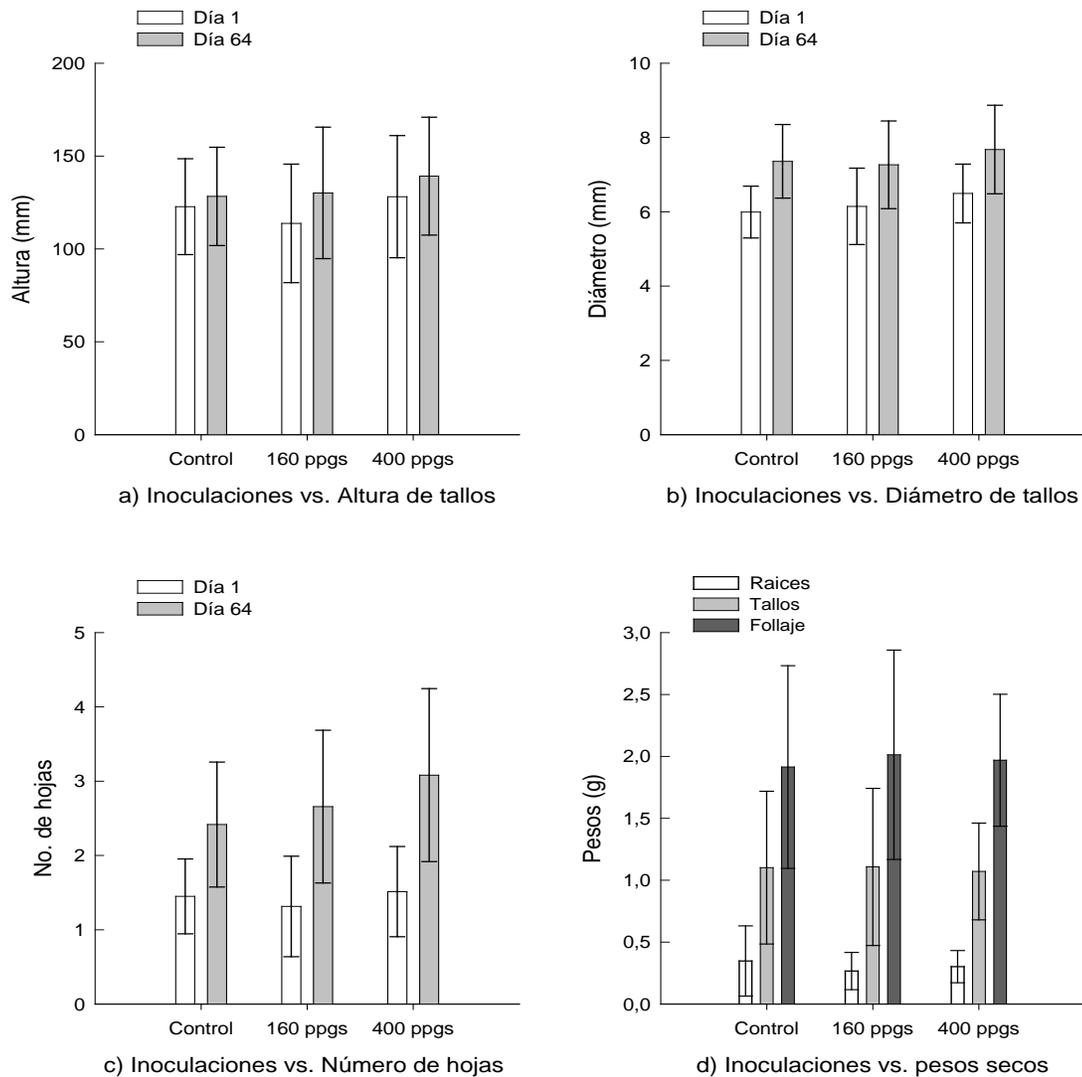
Tratamientos	N	Diámetro de tallo (mm)	Altura de tallo (mm)	Número de hojas
Control -0- ppgs	37	1.26 $\pm$ 0.40 <sup>a</sup>	10.22 $\pm$ 5.77 <sup>b</sup>	0.97 $\pm$ 0.16 <sup>a</sup>
Inoculo 160 ppgs	35	1.12 $\pm$ 0.36 <sup>a</sup>	16.43 $\pm$ 6.00 <sup>a</sup>	1.34 $\pm$ 0.99 <sup>a</sup>
Inoculo 400 ppgs	37	1.2 $\pm$ 0.43 <sup>a</sup>	11.05 $\pm$ 4.36 <sup>b</sup>	1.57 $\pm$ 0.26 <sup>a</sup>

<sup>a,b</sup> Las medias en las columnas que no comparten la misma letra son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).

**Cuadro 10.8.** Valores promedios ( $\pm$ ) de pesos secos bajo los tres tratamientos al final del periodo de 64 días.

Tratamientos	N	Raíces (g)	Tallos (g)	Follaje (g)
Control -0- ppgs	37	0.118 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	0.640 $\pm$ 0.31 <sup>a</sup>	0.290 $\pm$ 0.13 <sup>b</sup>
Inoculo 160 ppgs	35	0.134 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>	0.520 $\pm$ 0.31 <sup>a</sup>	0.314 $\pm$ 0.15 <sup>ab</sup>
Inoculo 400 ppgs	37	0.143 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	0.623 $\pm$ 0.35 <sup>a</sup>	0.377 $\pm$ 0.16 <sup>a</sup>

<sup>a,b</sup> Las medias en las columnas que no comparten la misma letra son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).



**Figura 10.6.** Tallas promedio y pesos secos de plántulas de *Jatropha curcas* para diferentes inoculaciones con *P. aphanidermatum* por un periodo de 64 días. **a)** Alturas iniciales y finales. **b)** Diámetros de base de tallo iniciales y finales. **c)** Número de hojas al inicio y al final del experimento. **d)** Pesos secos finales. Las barras de error representan la desviación estándar de la media.

#### 10.4. Conclusiones

Con base en los resultados se concluye que la inoculación con *P. aphanidermatum* en etapas de pre y post germinación evidencian que en la condición pre-emergente el patógeno muestra un nivel más alto de infección, afectando drásticamente la germinación de *J. curcas*, especialmente si se encuentran en sustratos ricos en nutrientes y con alta retención de humedad. El patógeno atacó severamente las raíces y la base de los tallos de las plántulas germinadas de semillas infectadas. Sin embargo, se encontró que *J. curcas* tienen una gran capacidad de regeneración en su sistema de raíces, ya que si los individuos logran superar esta fase, éstos pueden crecer satisfactoriamente, aunque con un desarrollo menor que las plantas sanas. En la condición de inoculación post-emergente, se determinó que plántulas de 14 días o más son capaces de desarrollarse sin efectos significativos ante la presencia y ataque del patógeno. Cabe resaltar que los tipos de suelos utilizados (franco y arenoso) y el descenso de temperatura registrado durante el experimento de 64 días pudo haber tenido un efecto importante sobre la atenuación de la infección y el daño del patógeno. Por lo que, una segunda fase de estudio debe considerar realizar ensayos con diferentes niveles de inoculación, en diferentes épocas del año y con suelos arcillosos, que mantienen mayor humedad. Esto podría evidenciar posibles interacciones entre estos factores. Finalmente, la utilización de fungicidas para tratar a las semillas y la comparación con semillas de materiales tóxicos y no tóxicos podría demarcar el nivel de infección del patógeno y mejorar los métodos de propagación en esta especie.

## XI. Discusión y conclusiones

### 11.1. Discusión

En función del objetivo general de esta investigación: analizar propiedades físico químicas de las semillas y evaluar el crecimiento aéreo y del sistema de raíces de la forma no tóxica de *Jatropha curcas* a partir de su germinación en diferentes tipos de suelos, se consideraron los aspectos: **1)** las semillas tóxicas y no tóxicas, y sus propiedades; **2)** alometría de las semillas y **3)** su relación con germinación y vigor de emergencia; **4)** relación del sustrato con germinación y vigor de plántulas; **5)** relación del suelo con crecimiento aéreo y del sistema de raíces; **6)** desarrollo del sistema de raíces en diferentes suelos; **7)** arquitectura del sistema de raíces en relación con el sustrato; y **8)** impacto de un patógeno localmente importante (*P. aphanidermatum*) sobre la germinación y el desarrollo de las plántulas, mismos que se discuten a continuación.

#### 11.1.1. Origen de las semillas no tóxicas y sus propiedades

Las investigaciones sobre la forma no tóxica de *Jatropha curcas* consideran su centro de origen en México (Capítulo III). Los ésteres de forbol presentes en las semillas de estas plantas podrían ubicarse entre 0.20 mg/g o menos, comparados con niveles superiores a 0.6 mg/g para las formas tóxicas. Sin embargo, los porcentajes de ácidos grasos, así como las propiedades de los mismos se encuentran dentro de los mismos rangos que las semillas tóxicas; por lo que se puede establecer que ambos genotipos son viables como fuente de biocombustible. Sobresaliendo la forma no tóxica por sus capacidades alimentarias, tanto humanas como animales.

#### 11.1.2. Alometría de las semillas

Las semillas de las formas no tóxicas tienen una amplia variación en pesos y tallas tanto intra-accesión, como entre procedencias, comparable con las semillas tóxicas reportadas por otros autores, por lo que no se pudieron establecer diferencias morfológicas entre variedades (Capítulo IV). Las dimensiones de pesos y tallas de ambas variedades indican una posible asociación con los sustratos y el manejo que se da a las plantaciones y sus cosechas. Lo que implica que podrían obtenerse semillas similares de diferentes procedencias, si se dan condiciones y manejos similares a las mismas. Desde el punto de vista de la productividad, aun se requieren mayores estudios sobre el manejo adecuado para esta especie en nuestro país, ya que los cultivos, en especial en el estado de Veracruz, apenas inician su establecimiento y las colectas no tóxicas que formaron parte de esta investigación no provenían de cultivos comerciales. Desde el punto de vista de la salud pública, la dificultad para establecer diferencias morfológicas entre semillas tóxicas y no tóxicas implica un riesgo de manejo para que los cultivos tóxicos y no tóxicos se ubiquen próximos o intercalados en un mismo campo, ya que las semillas podrían confundirse fácilmente.

### 11.1.3. Propagación sexual y sus relaciones con peso de semilla y sustratos

Los estudios sobre pesos de semillas no tóxicas y su relación con los sustratos mostraron porcentajes de germinación similares a los reportados en estudios sobre semillas tóxicas para pesos y sustratos equivalentes (Capítulos V y VI), por lo que los métodos de propagación para ambas formas se podrían aplicar de manera similar. Los pesos de semillas promedio a superior dentro del rango de distribución de una colecta específica se relacionaron positivamente ( $P > 0.05$ ) con mayores tasas de germinación y plántulas más vigorosas. Los sustratos, por su parte tuvieron un impacto positivo sobre la tasa y la velocidad de germinación de las semillas cuando fueron ligeros y facilitaron el drenado del exceso de humedad; mientras que tuvieron un impacto negativo cuando fueron pesados y con alto contenido de nutrimentos. Sin embargo, los sustratos ricos en nutrimentos favorecen significativamente el desarrollo de las plántulas una vez germinadas (Capítulo V). Por lo que se recomienda propagar semillas de pesos mayores en sustratos ricos en nutrimentos para lograr mejores ejemplares.

### 11.1.4. Los suelos y su relación con el crecimiento de *Jatropha curcas*

Las formas no tóxicas de *J. curcas* son capaces de adaptarse y sobrevivir en suelos muy pobres en nutrimentos; ya que desarrollan un sistema de raíces apropiado para explorar por recursos en estas condiciones; sin embargo, la parte aérea suspende su desarrollo (Capítulo VII). Aunque no se realizaron estudios en ejemplares adultos para determinar la productividad de las procedencias nativas en estos suelos, estudios en plantaciones comerciales fuera del país han determinado que se requieren al menos porcentajes de 0.022 de N en suelo para obtener una producción mínima de 600 mg de semillas por planta (Wani *et al.*, 2009 y Ghosh *et al.*, 2007). Niveles que no alcanzaron los suelos arenosos estudiados aquí (0.008%); pero que sí se encontraron en los suelos franco-arenosos (0.097%) y franco-arcillosos (0.182%). Por lo que puede establecerse que los suelos pobres en nutrimentos no son recomendables para instaurar plantaciones de *J. curcas* a niveles comerciales, ya que implicarían un alto subsidio de fertilizantes, con su respectivo costo energético. Los suelos franco-arenosos, francos y franco-arcillosos, con contenidos mínimos de 1% de N, 88 mmol·kg<sup>-1</sup> de Ca, 35 mmol·kg<sup>-1</sup> de Mg y PH entre 6.5-8.0, son potencialmente más aptos para lograr buenos desarrollos en los cultivos de *J. curcas* y ser más productivos con respecto a suelos más pobres (Capítulos VII, VIII y IX).

### 11.1.5. El sistema de raíces y su relación con los suelos

El análisis del crecimiento inicial del sistema de raíces de *J. curcas* mediante rizotrones y microscopio electrónico de barrido permitió establecer un modelo de crecimiento tipo logístico que no se ve afectado por el tipo de sustrato (Capítulo VIII). Sin embargo la fijación de micro-partículas de suelo y las tasas de crecimiento del sistema de raíces se ven favorecidas en sustratos con texturas franco-arenosas a franco-arcillosas sobre sustratos arenosos; lo que impacta positivamente en el desarrollo aéreo de la planta.

### **11.1.6. La arquitectura del sistema de raíces**

La validación del modelo del sistema de raíces de las variedades no tóxicas de *J. curcas* permitió establecer que éste tiene una estructura similar a las variedades tóxicas. La arquitectura del sistema es altamente simétrica e independiente del tipo de suelo en plantas juveniles; lo que confiere a la planta una mayor estabilidad y capacidad como fijadora de suelos (Capítulo IX). La capacidad del sistema para explorar y lograr un desarrollo similar tanto en suelos ligeros como pesados, es una característica de la enorme adaptabilidad de la especie, que le permitiría distribuirse ampliamente en muchos tipos de suelo. Por lo que las variedades nativas de *J. curcas* tienen un buen potencial para ser aplicadas en restauración de suelos erosionados.

### **11.1.7. El impacto de *P. aphanidermatum* sobre *J. curcas***

*P. aphanidermatum* es un patógeno localmente importante, que fue identificado infestando semillas de *J. curcas* no tóxica en suelos de la región central del estado de Veracruz y que demostró ser capaz de causar daños considerables durante la etapa pre-germinativa y de reciente germinación; sin embargo, no causó daños significativos cuando se inoculó en etapas posteriores. Como se observó en los experimentos del Capítulo X, el sistema de raíces de las variedades no tóxicas de *J. curcas* tiene una alta capacidad de regeneración y es capaz de restablecerse ante el ataque de este tipo de patógeno. Aunque se requieren realizar más estudios sobre el efecto de otros patógenos importantes de la región, se podría inferir que las variedades no tóxicas locales probadas en esta investigación están adaptadas a los patógenos que infestan los suelos de estas regiones. Lo que representa una ventaja sobre variedades importadas.

## **11.2. Recomendaciones**

### **11.2.1. Metodológicas**

#### **11.2.1.1. Propagación sexual y sus relaciones con peso de semilla y sustratos**

Los estudios realizados en esta investigación (Capítulos V y VII) sólo comprendieron categorías de pesos y sus relaciones con los sustratos de germinación. Sin embargo, se requiere realizar estudios que comprendan análisis de correlación entre el peso específico de la semilla y su relación con la germinación en un determinado sustrato. Los resultados encontrados también parecen indicar una estrecha relación entre las condiciones de humedad medioambiental y el tiempo de almacenamiento con la tasa de germinación. Aunque actualmente no existe un rango específico determinado para las procedencias no tóxicas, por lo que se recomienda realizar experimentos de germinación bajo condiciones controladas para determinar los efectos de estas dos variables sobre las semillas no tóxicas.

### **11.2.1.2. Suelos y su relación con el crecimiento de *Jatropha curcas***

Los suelos estudiados en esta investigación no comprenden todos los existentes en las regiones tropicales y subtropicales del país (sitios donde se podría establecer *J. curcas*). En general no existen estudios profundos sobre la relación suelo-planta de *J. curcas* a nivel nacional, muy importantes para determinar el verdadero potencial de *J. curcas* en el trópico mexicano. También se requieren estudios que involucren las etapas de producción de las plantas. Al respecto se propone establecer diseños experimentales que consideren análisis de texturas y nutrimentos de los suelos donde se vaya a sembrar *J. curcas*, para posteriormente combinar estos factores y correlacionar la productividad de las mismas con sus suelos.

### **11.2.1.2. Identificación y evaluación de patógenos de suelo que afectan a las formas no tóxicas**

Durante la identificación del patógeno encontrado en plántulas de *J. curcas* en el capítulo X, no se realizaron estudios de variación genética, por lo que la identificación de la especie quedó como un “posible” *Pythium aphanidermatum*. En este caso se recomienda realizar cultivos nuevos de las cepas aisladas y aplicar métodos de biología molecular que permitan corroborar al patógeno aislado durante este trabajo.

## **11.2.2. Futuras investigaciones**

### **11.2.2.1. Estudios sobre las semillas no tóxicas**

Los estudios presentados en este documento se limitaron a cuestiones morfométricas solamente, sin realizar análisis comparativos entre estas propiedades y los contenidos de esteres de forbol ni los aceites (Capítulo III). Dado que morfológicamente existe una amplia variación entre procedencias tóxicas y no tóxicas, en este momento no se podría diferenciar con certeza a los genotipos tóxicos de los no tóxicos. Sin embargo, tampoco se encontraron referencias científicas al respecto. Posiblemente por ser *J. curcas* un cultivo de reciente comercialización. En este sentido se requieren estudios más profundos para determinar si existen diferencias morfológicas en frutos o plantas, que permitan identificar variedades tóxicas y no tóxicas de manera rápida y segura con aplicaciones para los productores de ambas formas.

### **11.2.2.2. El sistema de raíces y su relación con los suelos**

En el Capítulo VIII se intentó determinar el ciclo de crecimiento celular para *J. curcas* en tres tipos de suelo; sin embargo, la plena diferenciación de las células meristemáticas no se concluyó, por lo que se propone repetir los experimentos de aclarado desarrollados en este capítulo para corroborar las diferentes zonas meristemáticas y efectuar el cálculo del ciclo de crecimiento celular para poder determinar la capacidad de crecimiento radical de *J. curcas* en relación con el suelo. Estudios adicionales sobre interacción natural de micorrizas con raíces de *Jatropha* también permitirían determinar si las capacidades de las raíces en determinados suelos se benefician de las mismas.

### **11.2.2.3. La arquitectura del sistema de raíces**

Los estudios de simetría del sistema de raíces de *J. curcas* y su modelo propuesto (Capítulo IX) solo se aplicaron en plántulas de tres meses de edad. Actualmente solo hay reportado un estudio de *J. curcas* en plantas adultas, que contempló dos ejemplares únicamente (Reubens *et al.*, 2011). Estudiar estructuras de raíces en ejemplares adultos sembrados en diferentes suelos permitiría evaluar las capacidades plenas que tiene esta especie como retenedora de suelos (Stokes *et al.*, 2009). Por lo que se proponen estudios en plantas adultas que consideren: la creación de modelos para analizar la contribución mecánica de las raíces a la cohesión del suelo mediante pruebas de fuerzas de tensión de las raíces, densidad de raíces por área, relaciones entre número de raíces pivotantes y superficiales, la topología del sistema adulto, decaimiento de las raíces y su respuesta a condiciones de estrés del suelo, entre otros.

### **11.2.2.4. Identificación y evaluación de patógenos de suelo que afectan a las formas no tóxicas**

Las formas no tóxicas de *J. curcas*, por carecer o tener niveles muy bajos de esteroides de forbol (Harinder *et al.*, 2008) son más susceptibles al ataque de patógenos (Suntornsuk, 2010). Aunque, como se vio en el capítulo X, se carece de información concreta sobre los patógenos de suelo que afectan a la forma no tóxica de *J. curcas*. Por lo que investigaciones futuras sobre patógenos de suelo no solo deben considerar la identificación y el nivel de patogenicidad de infecciones durante las etapas juveniles y de producción de la planta; sino también las pruebas sobre métodos de prevención y control de estos patógenos.

### **11.2.2.5. Estudios en diferentes tipos de suelo en plantas adultas**

Los resultados presentados en los capítulos V al IX mostraron que *J. curcas* pudo sobrevivir y adaptarse tanto a suelos ligeros, pero pobres en nutrientes, como a suelos pesados con altos contenidos nutrimentales. Sin embargo, aun se requieren estudios en plantas adultas, para determinar los efectos de estos suelos sobre floración, producción de frutos y calidad de semillas.

## **11.2.3. Para tomadores de decisiones**

### **11.2.3.1. Alerta sobre la siembra de procedencias tóxicas y no tóxicas**

Se recomienda a instituciones como CONAFOR (CONAFOR, 2012) e INIFAP (INIFAP, 2012) que promueven y brindan asesorías sobre el cultivo de *J. curcas* mediante programas como Proárbol (SEMARNAT, 2011) y el establecimiento de campos experimentales; que tomen en cuenta las dificultades que representan para los productores diferenciar físicamente entre formas tóxicas y no tóxicas y definan estrictamente la siembra exclusiva de una sola forma en un determinado campo, ya que tal situación aun no está contemplada en estas instituciones.

### **11.2.3.2. Siembra y manejo de *J. curcas***

Con base en los resultados mostrados en los capítulos IV al X se recomienda la siembra de *J. curcas* en suelos franco-arenosos a franco-arcillosos con contenido nutrimental medio-bajo a alto; pero no se recomienda su siembra en suelos arenosos o arcillosos con contenidos nutrimentales muy bajos, porque, aunque la especie tiene la capacidad de sobrevivir en estas circunstancias, las plantas podrían ser improductivas.

### **11.2.3.3. Legislación**

Ante el peligro inminente de mezclar formas tóxicas y no tóxicas de *J. curcas*, se requiere una regulación que establezca zonas de exclusión para algún determinado cultivo, considerando especialmente los sitios donde se han localizado poblaciones nativas de formas tóxicas, misma que no existe en este momento y que podría contemplarse inicialmente con el programa Proárbol (SEMARNAT, 2011), que promueve la siembra indistinta de ambas formas como biocombustible.

## **11.3. Conclusiones**

Durante esta investigación se estudiaron y contrastaron semillas y plantas de formas no tóxicas de *Jatropha curcas* recolectadas en el estado de Veracruz, que mostraron similitudes morfológicas y desarrollo tanto aéreo como subterráneo equiparable con investigaciones reportadas para formas tóxicas. Esta característica confiere grandes ventajas para las formas no tóxicas porque implica que su cultivo posiblemente no requiera cuidados especiales o independientes al de las formas tóxicas, y que el conocimiento generado sobre el manejo de las formas tóxicas podría aplicarse también en las formas no tóxicas. Asimismo también se determinó que estas plantas son capaces de sobrevivir en suelos extremadamente pobres y de diversas texturas, tales como suelos arenosos o arcillosos con contenidos de N inferiores al 0.01%, aunque el establecimiento de estas formas en suelos pobres podría no ser económicamente productivo. Sin embargo, las características estructurales de su sistema de raíces les confieren capacidades prometedoras como retenedoras de suelos, lo que las convierte en candidatos naturales para reforestar sitios degradados en el trópico y subtrópico mexicano, evitando la introducción de especies invasoras. Las formas no tóxicas son un germoplasma de muy alto valor para el país, por ser centro de origen de las mismas, y por sus capacidades alimentarias adicionales a las bioenergéticas, que sin embargo aun no cuentan con regulaciones que las protejan, y que requieren ser más ampliamente investigadas en relación a las propiedades de sus semillas, métodos de propagación, manejo y control de patógenos.

## Apéndice A

### Suelos

#### A.1. Textura

La textura es una propiedad física del suelo que se refiere a la proporción de arena, limo y arcilla que contiene el sustrato. Su importancia radica en su influencia sobre la cantidad de agua que puede almacenar, el movimiento del agua y la facilidad de abastecimiento de nutrientes y aire. Factores de gran importancia para la vida de las plantas.

En general existen tres grandes tipos de texturas, según Casanova *et al.*, (2004):

- Suelo arenoso:** partículas gruesas, y fácilmente separables, se satura con poca agua y seca rápidamente, no es adhesivo.
- Suelo francoso:** (limo) suave en estado húmedo; polvoso en estado seco; adhesivo y poco plástico, no retiene agua por tiempo prolongado.
- Suelo Arcilloso:** partículas muy finas; con poca agua se vuelve resbaladizo, es plástico, más adhesivo y cohesivo que el limo; retiene mucha agua.

El Servicio para la Conservación de los Recursos Naturales (NCRS, 2010 —por sus siglas en inglés) establece sub-clases entre estas tres principales (Figura A.1). La mayor proporción de una fracción respecto a las otras dos, determina la denominación del suelo. Ejemplo: Arcillo-Arenoso (mayor proporción de arcilla que de arena y muy poco limo).

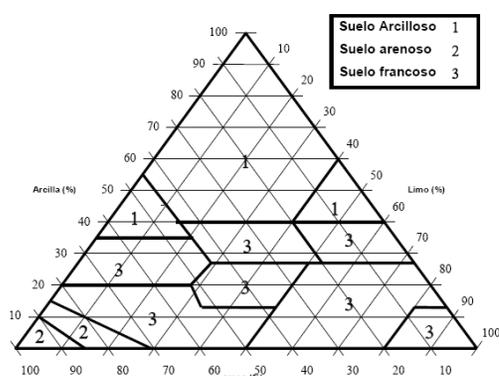


Figura A.1. Triángulo de texturas de la NCRS. Fuente: NCRS (2010).

#### A.2. Selección de los suelos experimentales

Los sustratos utilizados en los experimentos de este proyecto fueron seleccionados visualmente en base a su aspecto granulométrico inicial, y por sus propiedades nutricionales. La designación y procedencia de cada suelo se indica a continuación:

**Arenoso.** Procedente de una duna natural localizada en la región de Paso San Juan, Veracruz (19° 12'N, 96° 19' O y 21msnm).

Franco-Arenoso. Procedente de la zona Tepetates del Colegio de Postgraduados, campus Veracruz (19°11'43 N, 96° 20'20" O y 30 msnm).

**Franco-Arcilloso.** Suelo negro procedente de los bajos de la zona arcillosa del Colegio de Postgraduados, campus Veracruz (19°11'43 N, 96° 20'20" O y 30 msnm).

**Franco-Composteado (Compost).** Suelo tipo franco compuesto con cachaza de caña, procedente del municipio de Úrsulo Galvan (19° 25' N, 96° 27' O).

### A.3. Análisis de texturas

El análisis de texturas se realizó a los suelos Arenoso, Franco-Arenoso y Franco-Arcilloso, mediante el método de Bouyoucos (1963) y con base en las normas NRCS (2010). El Cuadro A.1. muestra las designaciones obtenidas para cada suelo.

**Cuadro A.1.** Resultados del análisis de texturas por Bouyoucos (1963) y NRCS (2010).

Textura designada	Arena %	Limo %	Arcilla %	Designación original de NRCS
Arenoso	96.0	2.5	1.5	Sandy
Franco arenoso	66.0	21.0	13.0	Sandy-loam
Franco arcilloso	30.0	35.0	35.0	Clay-loam

Las características de los sustratos utilizados de acuerdo con SIAR (2009) son los siguientes:

**Textura Arenosa:** es no cohesiva y forma sólo gránulos simples. Las partículas individuales pueden ser vistas y sentidas al tacto fácilmente. Al apretarse en la mano en estado seco se soltará con facilidad una vez que cese la presión. Al apretarse en estado húmedo formará un molde que se desmenuzará al palparlo.

**Textura Franco arenosa:** es un suelo que posee bastante arena, pero que cuenta también con limo y arcilla, lo cual le otorga algo más de coherencia entre partículas. Los granos de arena pueden ser vistos a ojo descubierto y sentidos al tacto con facilidad. Al apretarlo en estado seco formará un molde que fácilmente caerá en pedazos; pero al apretarlo en estado húmedo el modo formado persistirá si se manipula cuidadosamente.

**Textura Franco arcillosa:** es un suelo de textura fina que usualmente se quiebra en terrones duros cuando éstos están secos. El suelo en estado húmedo al oprimirse entre el pulgar y el resto de los

dedos formará una cinta que se quebrará fácilmente al sostener su propio peso. El suelo húmedo es plástico y formará un molde que soportará bastante al manipuleo. Cuando se amasa en la mano no se destruye fácilmente sino que tiende a formar una masa compacta.

#### A.4. Análisis de contenido nutricional de los suelos utilizados

Para determinar su potencial nutricional, durante la colecta de los sustratos se separaron 500 g de suelo a los que se realizaron análisis de pH, contenido de materia orgánica, Fósforo; Calcio y Magnesio. Los valores obtenidos de los sustratos y el método utilizado para su determinación se muestran en Cuadro A.2.

**Cuadro A.2.** Resultados de análisis de suelos para los sustratos utilizados en los experimentos.

Suelo	pH	Materia orgánica (%)	N Total (%)	P (g Kg <sup>-1</sup> )	Ca (mmol kg <sup>-1</sup> suelo seco)	Mg (mmol kg <sup>-1</sup> suelo seco)
Arenoso	7.98 -ligeramente alcalino	0.168 -muy baja	0.008 -muy bajo	0.012	77.174	154.348
Franco-Arenoso	7.26 Neutral	1.824 -media	0.097 Bajo	0.046	175.395	294.664
Franco-arcilloso	7.43 -ligeramente alcalino	3.397 Media-alta	0.182 Medio	0.124	329.743	519.169
Arenoso+Franco-Arenoso (Ar-Fr-Ar)	7.7 -ligeramente alcalino	1.059	0.053 Muy bajo	0.029	126.284	224.506
Franco Composta (Compost)	7.13 -Neutral	68.490 Muy alta	1.690 Alto	0.368	88.800	34.800

## Apéndice B

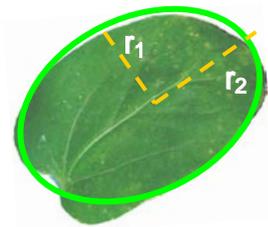
### Estimación de Parámetros

#### B.1. Estimación de área foliar

El área foliar de las hojas de *Jatropha curcas* se estima en base a los tipos de hojas estudiados durante el experimento: las hojas cotiledonares y las hojas verdaderas.

##### B.1.1. Estimación de área foliar de hojas cotiledonares

La forma de las hojas cotiledonares se aproximaron al área de una elipse, definida mediante la siguiente expresión:



$$A = \pi \cdot r1 \cdot r2 \quad (\text{b.1.1})$$

Donde:

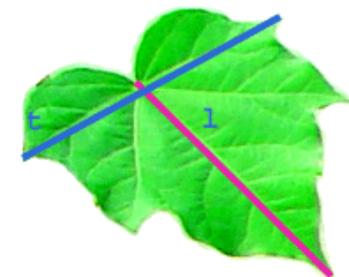
r1=radio menor

r2=radio mayor

**Figura B.1.** Hoja cotiledonea y medidas de un elipse.

##### B.1.2. Estimación de área foliar de hojas verdaderas

El área foliar de las hojas verdaderas se estimó mediante las medidas de la sección longitudinal y transversal de las hojas y usando el modelo determinado por Liv *et al.* (2007), que se muestra a continuación:



$$A = 0.84 \cdot (T \cdot L)^{0.99} \quad (\text{b.1.2})$$

Donde:

T=longitud transversal

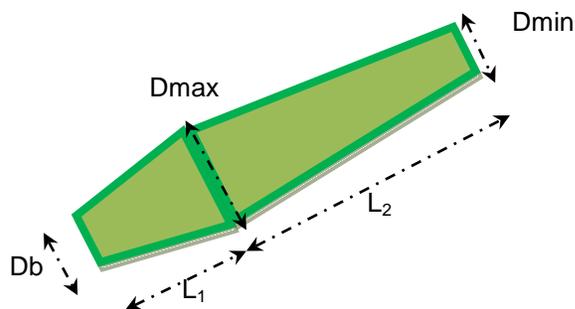
L=Longitudinal

**Figura B.2.** Medidas de longitud de hoja. T=transversal,  
L=longitudinal

#### B.2. Cálculo de volúmenes de tallos

Con base en observaciones de plántulas juveniles, los tallos se aproximaron a dos secciones de conos truncados para estimar su volumen. Las medidas de los segmentos se obtuvieron del diámetro en la base del tallo, el diámetro máximo y el diámetro mínimo en la parte superior del tallo. La

Figura B.3 muestra los parámetros involucrados y la ecuación b.3 representa el cálculo del volumen de un tallo, conforme a los parámetros definidos en la Figura.



**Figura B.3.** Parámetros considerados para estimar volumen de tallos en plántulas de *Jatropha*.

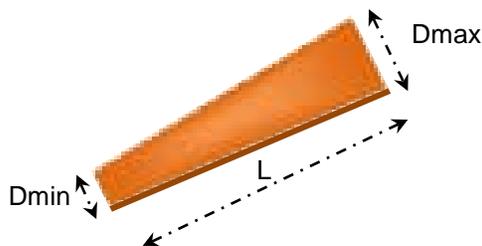
$$V = \frac{\pi}{3} * L_1 \left( \left( \frac{D_b}{2} \right)^2 + \left( \frac{D_{max}}{2} \right)^2 + (D_b * D_{max}) \right) + \frac{\pi}{3} * L_2 \left( \left( \frac{D_{min}}{2} \right)^2 + \left( \frac{D_{max}}{2} \right)^2 + (D_{min} * D_{max}) \right) \quad (b.2.1)$$

Donde:

- L1= longitud de la base del tallo al diámetro máximo
- L2= longitud del diámetro máximo al diámetro mínimo
- Dmax= diámetro máximo detectado
- Db = diámetro en la base del tallo
- Dmin = diámetro mínimo en la parte superior del tallo.

### B.3. Cálculo de volúmenes de segmentos de raíces

El volumen de las cinco raíces principales, sin considerar sus ramificaciones, se estimó aproximándolo a un volumen de cono truncado. La Figura B.4 y la ecuación b.4, muestran esta aproximación.



**Figura B.4.** Parámetros considerados para estimar volumen de raíces en plántulas de *Jatropha*.

$$V = \frac{\pi}{3} * L \left( \left( \frac{D_{min}}{2} \right)^2 + \left( \frac{D_{max}}{2} \right)^2 + (D_{min} * D_{max}) \right) \quad (b.3.1)$$

Donde:

- L = longitud desde la base de la raíz a la punta.
- Dmax= diámetro máximo medido en la base de la raíz.
- Dmin = diámetro mínimo medido en la punta de la raíz.

#### B.4. Modelos de de crecimiento en función del Índice de Sitio (IS)

Los modelos aquí presentados se tomaron de ecuaciones reparametrizadas de autores que consideran el IS como el parámetro base para calcular el valor de la curva en una edad determinada.

**Cuadro B.4.1.** Modelos de crecimiento lineal y no lineal con base en IS.

Modelo	Ecuación reparametrizada	Referencia	
Schumacher (Lineal)	$L = IS * \frac{e^{-\beta_1 * (\frac{1}{E})}}{e^{-\beta_1 * (\frac{1}{E_b})}}$	Hernández, 2010	<b>(b.4.1)</b>
Gompertz (No lineal)	$L = IS * \frac{e^{-e^{-(\beta_1 * (E_b - \beta_2))}}}{e^{-e^{-(\beta_1 * (E - \beta_2))}}}$	Hernández, 2010	<b>(b.4.2)</b>
Logístico (No lineal)	$L = IS * \frac{1 + \beta_1 * e^{-\beta_2 * E_b}}{1 + \beta_1 * e^{-\beta_2 * E}}$	Carrero et al., 2008	<b>(b.4.3)</b>
Chapman-Richards (No lineal)	$L = IS * \left( \frac{1 - e^{-\beta_1 * E}}{1 - e^{-\beta_1 * E_b}} \right)^{\beta_2}$	Carrero et al., 2008	<b>(b.4.4)</b>

Donde:

L = longitud final;

IS= Índice de Sitio estimado

$\bullet_1, \bullet_2$  = Parámetros del modelo.

E = Edad de la planta

$E_b$  = Edad base de la planta

## Apéndice C

### Sitios experimentales

#### **C.1. Campus del Colegio de Postgraduados (sitio Colpos)**

Se localiza en el municipio de Manlio Flavio Altamirano; coordenadas: 19°16'00" N, 96°16'32" O y 16 msnm. Sitio abierto, con luz solar plena. El clima de la región es considerado como el más seco de los cálidos húmedos. En el área se aprecian restos de Selva Baja Caducifolia y pastizales (Ortiz y López, 2000).

#### **C.2. Predio particular Veracruz (sitio Veracruz)**

Localizado en una zona urbana del municipio de Veracruz; coordenadas: 20° 15' 17" N; 97° 15' 32" O y 2 msnm. Predio al aire libre, con malla sombra del 25%. El clima de la región se considera cálido subhúmedo (INEGI, 2010).

#### **C.3. Invernadero del Instituto Nacional de Ecología A. C. (sitio Inecol)**

Localizado en Xalapa, Veracruz; coordenadas: 19° 30' 43" N y 96° 56' 38" O y 1323 msnm. El invernadero no posee climatización artificial, y su clima se consideró cálido húmedo.

#### **C.4. Predio particular Xalapa (sitio Xalapa)**

En un área urbana del municipio de Xalapa; coordenadas: 19°34'34.90" N; 96°55'26.69" O y 1400 msnm. Sitio abierto, con luz solar directa. El clima de la región se considera templado húmedo (INEGI, 2010).

## Bibliografía

- Achten W. M. J., Reubens B., Maes W., Mathijs E., Verchot L., Singh VP., Poesen J., Muys B. 2007. Root architecture of the promising bio-diesel plant *Jatropha*. *Communication in Agricultural and Applied Biological Sciences* 72(1):81-86.
- Achten, W. M. J., Nielsen, L. R., Aerts, R., Lengkeek, A. G., Kjaer, E. D., Trabucco, A., Hanse, J. K. Maes, W.H., Graudal, L., Akinnifesi, F. K. Muys, B. 2010. Towards domestication of *Jatropha curcas*. *Biofuels* 1(1):91-107.
- Aguilera C. M., Martínez R. E. 1996. Relaciones agua suelo. En: Relaciones agua suelo planta atmósfera. Universidad Autónoma de Chapingo, Edo. de México. Pp. 68-69.
- Alfonso B. J. A. 2008. Manual para el cultivo del Piñón (*Jatropha curcas*) en Honduras. Cortés, Honduras. 30p.
- Alianza en Energía y Ambiente con Costa Rica (AEA), Biocombustibles de Guatemala. 2008. Creación de vivero para la producción de plantas de *Jatropha curcas* a nivel regional. Informe final. Guatemala. 22p.
- AMAP. 2009. AMAPSim. Botany and computational plant architecture. Consulta: Enero 27 del 2009. Disponible en: <http://amap.cirad.fr/en/productionsLogicielles.php>.
- Aráoz S., Del Longo O., Karlin O. 2004. Germinación de semillas de *Zizyphus mistol* Grisebach III. Correlaciones paramétricas del tamaño y peso de drupas, endocarpos y semillas con la germinación y el vigor. *Multequina. Latin American Journal of Natural Resources* 13:51-56.
- Arias T. 2004. Arquitectura de Raíces y Vástagos de *Vismia baccifera* y de Raíces de *Vismia macrophylla* (clusiaceae). En: Botánica-Morfología. *Caldasia* 26(2):333-358.
- Atkinson D. 2000. Root characteristics: why and what to measure, Chapter 1. En: Root methods. A handbook. Smith *et al.* (Editores). Springer, Heidelberg, Germany. Pp. 1-32.
- Ayala-Cordero G., Terrazas T., López Mata L, Trejo C. 2004. Variación en el tamaño y peso de la semilla y su relación con la germinación en una población de *Stenocereus beneckeii*. *Interciencia* 29(12):692-697.
- Azcón-Bieto J., Talón M. 2000. Transporte del agua y balance hídrico en la planta. Capítulo 4. En: Fundamentos de Fisiología Vegetal. McGraw Hill Interamericana. Barcelona España. Pp. 45-63.
- Barlow, P. W. 1976. Towards an understanding of the behavior of root meristems. *Journal of Theoretical Biology* 57: 433-451.
- Bautista R. E. 2010. Tolerancia a la desecación y caracterización química de semillas de piñón mexicano (*Jatropha curcas* l.) colectadas en el Totonacapan. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, campus Texcoco, Texcoco, México. 68p.
- Becker K., Makkar H.P.S. 2008. *Jatropha curcas*: A Potential source for tomorrow's oil and biodiesel. *Lipid Technology* 20(5):104-107.
- Biocombustibles de Guatemala, 2008. Creación de vivero para la producción de plantas de *Jatropha curcas* a nivel regional. Informe final. Zona 10, Guatemala. Pp.3-11.
- Bolton A. T. 1980. Effects of temperature and pH of soilless media on root rot of poinsettia caused by *Pythium aphanidermatum*. *Canadian Journal of Plant Pathology* 2: 83-85.
- Bonilla I. 2000. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. In: Azcon-Bieto J, Talón J, editores. Fundamentos de fisiología vegetal. McGraw-Hill, Mexico. pp. 83-97.
- Bouyoucos G. J. 1936. Directions for making mechanical analysis of soil by hydrometer method. *Soil Science* 42(3): 225-230.
- Brittaine R., Lutaladio L. 2010. *Jatropha*: A smallholder bioenergy crop. The potential for Pro-poor Development. Integrated Crop Management. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 96 p.
- Carrero O., Jerez M., Macchiavelli, Orlandono G., Stock J. 2008. Ajuste de curvas de índice de sitio mediante modelos mixtos para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* en Venezuela.

- Casanova P. M., Vera E. W., Luzio L. W., Salazar G. O. 2004. Edafología, guía de clases prácticas. Universidad de Chile. Consulta: enero 22 del 2009. Disponible en: [http://agronomia.uchile.cl/web/manuel\\_casanova/manual%20edafologia%20\\_2004.pdf](http://agronomia.uchile.cl/web/manuel_casanova/manual%20edafologia%20_2004.pdf)
- Catalogue of Life. 2009. Species Fungorum. En: Clasificación por: Indexing of the world's known species. Integrated Taxonomic Information System (ITIS). Consulta: febrero 10 del 2010. Disponible en: [http://www.catalogueoflife.org/annual-checklist/show\\_species\\_details.php?record\\_id=5950054](http://www.catalogueoflife.org/annual-checklist/show_species_details.php?record_id=5950054).
- CATIE. 1996. Biología de semillas forestales. Danida Forest Seed Centre, DFSC, Humlebaek, Dinamarca. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica.
- Ceja-Torres L. F., Mora-Aguilera G., Teliz D., Mora-Aguilera A., Sanchez-Garcia P., Munoz-Ruiz C., Tlapal-Bolanos., R De La Torre-Almaraz B. 2008. Fungi prevalence and etiology of strawberry dry wilt under different crop management systems. *Agrociencia* 42(4):451-461.
- Chang-wei L.; Li-Kun; Chen-You; Sun-Yong-yu; 2007. Floral display and breeding system of *Jatropha curcas* L. *Forestry Studies in China* 9(2): 114-119.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2012. Inicio. Consulta Febrero 21 del 2012. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx>.
- Comisión Nacional Forestal. 2011. REGLAS de Operación del Programa ProArbol 2011. Cuarta Sección Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. En: Diario Oficial. Miércoles 29 de diciembre de 2010. México D.F. 91p.
- Comission of the European Communities (COM). 2007. Communication from the Commission to the European Council and the European Parliament. An Energy Policy for Europe. Brussels, Belgium.
- Coutts M. P. 1983. Root architecture and tree stability. *Plant and Soil* 71 (1-3): 171-188
- Danjon F., Reubens B. 2008. Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation. *Plant and Soil* 303(1-2):1-34.
- Danjon F., Sinoquet H., Godin C., Colin F., Drexhage M.. 1999. Characterisation of structural tree root architecture using 3D digitizing and AMAPmod software. *Plant and Soil* 211: 241-258.
- Danjon F., Thierry F., Didier B. 2005. Root architecture and wind-firmness of mature *Pinus pinaster*. *New Phytologist* 168:387-400.
- De Baets S., Poesen J., Reubens B., Wemans K., De Baerdemaeker J. y Muys B. 2008. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. *Plant and Soil* 305: 207-226.
- De León G. F., Gutiérrez C. C., Hidalgo M. C., Moreno E. I. P., Hanako R. G. S. 2009. Mecanismos de agregación en suelos volcánicos arenosos. *Simposia de Biología*. Amemi.org. Consulta: Enero 20 del 2012. Disponible en: [http://www.amemi.org/Docs/simposia\\_biologia/platicas\\_invitadas/rec\\_nat/MECANISMOS\\_DE\\_AGREGACION\\_EN\\_SUELOS\\_VOLCANICOS\\_ARENOSOS.pdf](http://www.amemi.org/Docs/simposia_biologia/platicas_invitadas/rec_nat/MECANISMOS_DE_AGREGACION_EN_SUELOS_VOLCANICOS_ARENOSOS.pdf).
- De Neergaard E., Lysheide O. B., Gahoonia T. S., Care D., Hooker J. E. 2000. Anatomy and histology of roots and root-soil boundary, Chapter 2. En: *Root Methods. A handbook*, Smith *et al.* (Editores). Springer, Heidelberg, Germany. Pp. 33-74
- Díaz C. P., Campos V. N. 2009. Efecto de diferentes métodos de pregerminado, en semillas de Piñón (*Jatropha curcas* L.) en el distrito de Tarapoto, Región San Martín. Grupo *Jatropha* Perú. Correspondencia privada.
- Dubrovsky J. G. 2011. Conversación personal sobre análisis visual de imágenes en microscopio de barrido electrónico de raíces de *Jatropha curcas* en diferentes tipos de suelo. Departamento de Biología Molecular de Plantas, Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Cuernavaca, Morelos, México.
- Dubrovsky J. G., Soukup A, Napsucialy-Mendivil S, Jeknic Z, and Ivanchenko M. G. 2009. The lateral root initiation index: an integrative measure of primordium formation, *Annals of Botany*. 103: 807-817.

- Dubrovsky, J. G., L. Contreras-Burciaga y V. B. Ivanov. 1998. Cell Cycle Duration in the Root Meristem of Sonoran Desert Cactaceae as Estimated by Cell-flow and Rate-of-cell-production Methods. *Annals of Botany*. 81: 619-624.
- Dupuy L. 2011. Acquiring topological information. In: How does it work -Archiroot. Consulta: Noviembre 25 del 2011. Disponible en: <http://www.archiroot.org.uk/doku.php/navigation/archiroot2>.
- Dupuy L., Fourcaud T., Stokes A. 2005a. A numerical investigation into the influence of soil and root architecture on tree anchorage. *Plant and Soil* 278: 119-134.
- Dupuy L., Fourcaud T., Stokes A., Danjon F. 2005b. A Density-Based Approach for the Modelling of Root Architecture: Application to Maritime Pine (*Pinus Pinaster* Ait.) Root Systems. *Journal of Theoretical Biology* 36(3): 323-334.
- European Commission of Energy (EUR). 2009. Directive of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. EUR-Lex. Consulta: Junio 16 del 2011. Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32009L0028:EN:NOT>
- Fairless D. 2007. Biofuel: the little shrub that could-maybe. *Nature News* 449(7163):652-655.
- Federación Nacional de Biocombustibles (Fedebiocombustibles), 2010. Inician siembras de *Jatropha*. En: Notas de Interés. Consulta abril 13 del 2010. Disponible en: <http://www.fedebiocombustibles.com/v2/interes-web-id-6.htm>
- Félix M. J. G. 2008. Experiencias en el manejo del cultivo de *Jatropha* bajo condiciones de riego y temporal en el norte de Sinaloa. Resultados de proyectos. Fundación Produce Sinaloa A. C., Centro de Validación y Transferencia de Tecnología de Sinaloa A.C. (CVTTS). Consulta Enero 10, 2010. Disponible en: [http://www.fps.org.mx/divulgacion/index.php?option=com\\_attachments&task=download&id=76](http://www.fps.org.mx/divulgacion/index.php?option=com_attachments&task=download&id=76) . 25p.
- Foidl N., Foidl G., Sanchez M., Mittelbach M., Hackel S. 1996. *Jatropha curcas* L. as a source for the production of biofuel in Nicaragua. *Bioresource Technology* 58: 77-82.
- Gaitán Juan José, Peñón Eduardo Augusto, Costa María Cristina. 2005. Distribución de raíces finas de *eucalyptus globulus* ssp. *maidenii* y su relación con algunas propiedades del suelo. *Ciência Florestal* 15(1):33-41.
- Germplasm Resources Information Network (GRIN). 2008. Taxon: *Jatropha curcas* L. En: Plants Taxonomy. United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service, Beltsville Area. Consulta: Enero 10 del 2009. Disponible en: <http://www.ars-grin.gov/cgi-bin/npgs/html/taxon.pl?20692>.
- Ghosh A., Patolia J.S., Chaudhary D.R., Jitendra-Chikara S.N., Kumar R.D., Boricha G.N., *et al.* 2007. Response of *Jatropha curcas* under different spacing to *Jatropha* de-oiled cake. Expert seminar on *Jatropha curcas* L. Agronomy and genetics. March 26-28. Wageningen, The Netherlands: FACT Foundation.
- Godin C., Costes E. y Sinoquet H. 1999. A Method for Describing Plant Architecture which Integrates Topology and Geometry. *Annals of Botany*. 84(3): 343-357.
- Gómez G. 2010. Da inicio SEDARPA a plantaciones con *JATROPHA CURCAS*. Orizaba en Red. Nota No. 79147: Publicada 29/03/2010. Consulta abril 13 del 2010. Disponible en: <http://www.orizabaenred.com.mx/cgi-bin/web?b=VERNOTICIA&%7Bnum%7D=79147>
- González, A.M., Arbo, M. M. Organización del cuerpo de las plantas. Tema 20: Anatomía de la raíz. 20.5 Estructura primaria, caliptra. En: Morfología de Plantas Vasculares. Argentina: Universidad Nacional del Nordeste. Consulta abril 15 del 2010. Disponible en: [www.hiperbotanica.net/tema20/20-5caliptra.htm](http://www.hiperbotanica.net/tema20/20-5caliptra.htm)
- Grime J. P. 1989. Estrategias primarias en la fase establecida. En: Estrategias de adaptación de las plantas y procesos que controlan la vegetación. Limusa, Mexico, D.F. pp 19-75.
- Gyssels G. Y., Poesen J. 2003. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. *Earth Surface Processes and Landforms* 28: 371-384.

- Halloy S. 2008. Crecimiento exponencial y supervivencia del cardón (*Echinopsis atacamensis* subsp. pasacana) en su límite altitudinal (Tucumán, Argentina). *Ecología en Bolivia*, 43(1):6-15.
- Heller Joachim. 1996. Physic nut. *Jatropha curcas* L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/ International Plant Genetic Resources Institute, Rome. Pp. 66.
- Henning R. K. 2002. Using the indigenous knowledge of *Jatropha* – The use of *Jatropha curcas* oil as raw material and fuel. Washington DC: IK Notes, The World Bank; No. 47.
- Henning Reinhard K. 2003. *Jatropha curcas* L. in Africa – case study. Global Facilitation Unit for underutilized species. Consulta: Septiembre 20, 2008. Disponible en: [http://www.underutilized-species.org/documents/publications/Jatropha\\_curcas\\_africa.pdf](http://www.underutilized-species.org/documents/publications/Jatropha_curcas_africa.pdf).
- Iijima M., Sako K., Rao T. P. 2003. A new approach for quantification of root-cap mucilage exudation in the soil. *Plant and Soil* 255(1):399-407.
- INEGI, 2010. Veracruz Ignacio de la Llave: Carta de Climas 1:1000000. En: Página de inicio/ Información por entidad/Veracruz de Ignacio De la Llave/Territorio. Consulta: marzo 9 del 2010. Disponible en: <http://cuentame.inegi.gob.mx/monografias/informacion/ver/territorio/clima.aspx?tema=m&e=30>
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 2012. Inicio. Consulta Febrero 21 del 2012. Disponible en: <http://www.inifap.gob.mx>.
- International Energy Agency (IEA). 2011. World Energy Outlook 2011. Resumen ejecutivo. Paris Francia. Consulta: febrero 13 del 2012. Disponible en: <http://www.iea.org>
- Inurreta A. H. D. 2010. Potencial para producir *Jatropha curcas* L. como materia prima para biodiésel en el estado de Veracruz. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, campus Veracruz. Manlio Fabio Altamirano. 106p.
- Ishikawa H., Evans M. L. 1995. Specialized zones of development in roots. *Plant Physiology* 109:725-727.
- Ivanov V., Dubrovsky J. G.. 1997. Estimation of the cell-cycle duration in the root apical meristem: a model of linkage between cell-cycle duration, rate of cell production, and rate of root growth. *Plant Science* 158 (6):757-763.
- Jepsen J. K., Henning R. K., Nyathi B. 2008. Generative propagation of *Jatropha curcas* L. on Kalahari Sand. The *Jatropha* system. Consulta Agosto 9 del 2010. Disponible en: <http://www.Jatropha.de/zimbabwe/ea/The%20generative%20propagation%20of%20JCL.htm>
- Jongschaap R. E. E., Corré W. J., Bindraban P. S., Brandenburg W. A. 2007. Claims and Facts on *Jatropha curcas* L. Global *Jatropha curcas* Evaluation, Breeding and Propagation Programme. Plant Research International. Report 158. Wageningen. UR. Consulta: Diciembre 22 del 2008. Disponible en: [http://www.fact-fuels.org/en/FACT\\_Knowledge\\_Centre/FACT\\_Publications](http://www.fact-fuels.org/en/FACT_Knowledge_Centre/FACT_Publications).
- Kahl J. J., Henning R. K., Nyathi Bongani. 2008. Generative Propagation of *Jatropha curcas* L. on Kalahari Sand. En: The *Jatropha* Journal. Information on the *Jatropha* System. Consulta: Octubre 07 del 2008. Disponible en: <http://www.Jatropha.de/zimbabwe/ea/The%20generative%20propagation%20of%20JCL.htm>
- Li-Kun, Yang-Wen-yun Li-Li, Zhang-Chun-hua, Cui-Yong-zhong, Sun Yong-yu. 2007. Distribution and development strategy for *Jatropha curcas* L. in Yunnan Province, Southwest China. *Forestry Studies in China*. 9(2):120-126.
- Liv S. S., Do Vale L. S., De Macedo B. N. E. 2007. A simple method for measurement of *Jatropha curcas* leaf area. *Rev. bras ol. Fibras* 11(1):9-14.
- López H. E. 2010. Índice de sitio para *Pinus patula* Schl. Et Cham., en Santiago Comaltepec, Ixtlán; Oaxaca. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Lumsden R. D., Ayers W. A., Adams, P. B., Dow, R. L., Lewis, J. A., Papavizas, G. C., Kantzes, J. G. 1976. Ecology and Epidemiology of *Pythium* Species in Field Soil. *Phytopathology*. The American Phytopathological Society, USA. 66:1203-1209.

- Maes W. H., Trabucco A., Achten W. M. J., Muys B. 2009. Climatic growing conditions of *Jatropha curcas* L. Biomass and Bioenergy 33(10): 1481-1485.
- Makkar H. P., Martínez H. J., Becker K. 2008. Variations in seed, number of fruit, seed physical parameters and contents of oil, protein and phorbol ester in toxic and non-toxic genotypes of *Jatropha curcas*. Journal of Plant Sciences 3(3):260-265.
- Makkar HPS, Becker K, Schmook B. 1998. Edible provenances of *Jatropha curcas* from Quintana Roo state of Mexico and effect of roasting on antinutrient and toxic factors in seeds. Plant Food Human Nutrition; 52:31-6.
- Malamy J. E. 2005 Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture. Plant, Cell and Environment 28(1):67-77.
- Martin F. M. 1992. *Pythium*, in Methods for Research on Soilborne Phytopathogenic Fungi. L.L Singleton, J.D. Mihail and C.M. Rush. APS Press. St. Paul, MN. pp. 39-49.
- Martínez H. J., Martínez A. A.L., Makkar H, Francis G., Becker K. 2010. Agroclimatic conditions, chemicals and nutritional characterization of different provenances of *Jatropha curcas* L. from México. European Journal of Scientific Research 39(3):396-407.
- Martínez H. J., Siddhuraju P., Francis G., Dávila-Ortíz G., Becker K. 2006. Chemical composition, toxic/metabolic constituents, and effects of different treatments on their levels, in four provenances of *Jatropha curcas* L. from México. Food Chemistry 96:80-89.
- Martínez-Herrera J., Chel-Guerrero L., Martínez-Ayala A. L. 2004. The nutritional potencial of Mexican piñon (*Jatropha curcas*). Toxic and antinutritional factors. Proceedings of the fourth international workshop on antinutritional factors in legume and oilseeds; Marzo 8-10; Toledo, España. EAAP No. 110.
- Medina C. A., Salazar C. T. E., Álvarez P. J.L. 2010. Fisiografía y suelos. En: Atlas del patrimonio Natural, Histórico y Cultural de Veracruz. Florescano E. y Ortiz Escamilla J. Coordinadores. Gobierno del Estado de Veracruz. Veracruz, México. Pp: 30-42.
- Mittelbach M., Danninger H., Mangas B. 2010. Situación de los proyectos anteriores y los en ejecución, en relación a la producción de biodiesel basada en la extracción del aceite de *Jatropha curcas*, impulsados en Centroamérica por la Alianza en Energía y Ambiente con Centroamérica AEA. AEA, Managua, Nicaragua.
- Montero M., Kanninen M. 2003. Índice de sitio para *Terminalia amazonica* en Costa Rica. Agronomía Costarricense 27(1): 29-35.
- Namkoong G, Kang H.C., Brouard J.S. 1988. Tree breeding: principles and strategies. Monographs on theoretical and applied genetics, 11. New York: SpringerVerlag. 180p.
- Niembro R. A. 2000. Estructura y morfología de diásporas de árboles y arbustos nativos e introducidos, comunes en la República Mexicana. Tesis de Maestría en Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, Edo. de México.
- NRCS, 2010. Soil Texture Calculator. United States Department of Agriculture. Consulta: Julio 27 del 2010. Disponible en: <http://soils.usda.gov/technical/aids/investigations/texture/>.
- Ortiz S. C. A., López C. C. J. 2000. Los Suelos del Campus Veracruz. Colegio de Postgraduados, campus Veracruz. Veracruz, México. 82p.
- Ouwens K. D., Francis G., Franken Y. J., Rijssenbeek W., Riedacker A., Foidl N., Jongschaap R., Bindraban P. 2007. Position Paper on *Jatropha curcas*. State of the Art, Small and Large Scale Project Development. Fuels from Agriculture in Communal Technology (FACT). Consulta: Septiembre 17 del 2008. Disponible en: [www.fact-fuels.org/media\\_en/Position\\_Paper\\_on\\_Jatropha\\_Curcas](http://www.fact-fuels.org/media_en/Position_Paper_on_Jatropha_Curcas).
- Padilla D., Monterroso D. (2007). Diagnostico Preliminar de Enfermedades del Cultivo de Tempate (*Jatropha curcas*) en Nicaragua. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Consulta: noviembre 18 del 2009. Disponible en: <http://web.catie.ac.cr/informacion/rmip/rmip51/padilla-2.html>.
- Pages L., Vercambre G., Drouet J-L., Lecompte F., Collet C. y Le Bot J. 2004. Root Type: a Generic Model to Depict and Analyse the Root System Architecture. Plant and Soil 258(1-2): 103-119.

- Parker K. C. 2009. *Pythium aphanidermatum*. En: Soilborne plant pathogens. N.C. State University. Consulta: 20 de diciembre del 2009. Disponible en: [http://www.cals.ncsu.edu/course/pp728/Pythium/Pythium\\_aphanidermatum.html](http://www.cals.ncsu.edu/course/pp728/Pythium/Pythium_aphanidermatum.html).
- Pérez M. C., Hernández L.A., González C.F.V., García-de los Santos G., Carballo C.A. Vázquez R.T.R., Tovar G.M.R. 2006. Tamaño de la semilla y relación con su calidad fisiológica en variedades de maíz para forraje. *Agricultura Técnica en México*. (32)3: 341-352.
- Rajagopal R. 2008. Best Practices for Long-Term *Jatropha* Development. Position Paper. En: Conference *Jatropha* World 2008. KnowGenix. Mumbai, India. 14p.
- Reubens B., Achten W. M. J., Maes W. H., Danjon F., Aerts R., Poesen J., Muys B. 2011. More than biofuel? *Jatropha curcas* root system symmetry and potential for soil erosion control. *Journal of Arid Environments*. 75:201-205.
- Rodríguez A. M. Arteaga M. B. 2005. Índice de sitio para *Pinus chiapensis* (Martínez) andresen, en los estados de Veracruz y Puebla, México. *Revista Chapingo: Ciencias forestales y del ambiente* 11(1):39-44.
- Rodríguez G. M. P. 2001. Biodiversidad de los hongos fitopatógenos del suelo de México. *Acta Zoológica Mexicana*, Número especial (1):53-78.
- Romero C. S. 1988. Hongos Fitopatógenos. Universidad Autónoma de Chapingo, México. 347p.
- Sánchez-Sánchez O. 2010. *Jatropha curcas* L. Descripción. En: Atlas de la flora de Veracruz. Gobierno del Estado de Veracruz: Universidad Veracruzana. México. Pp. 437-349.
- Schmook B., Sanchez-Sanchez O. 2000. Usos y potencial de *Jatropha curcas* L. en la península de Yucatán, México. *Revista Foresta Veracruzana*. 2(2):7-11.
- Seiwa K. 2000. Effects of seed size and emergence time on tree seedling establishment: importance of developmental constraints. *Oecologia* 123:208-215.
- Semarnat-INE-UNAM-CIECO. Análisis integrado de las tecnologías, el ciclo de vida y la sustentabilidad de las opciones y escenarios para el aprovechamiento de la bioenergía en México: Reporte final. México: Instituto Nacional de Ecología; 2008; Pp. 11-24.
- SIAR. 2009. Determinación de la textura del suelo en terreno. En: Guías y Manuales de terreno. SIAR, Limarí. Ovalle, Chile. Consulta: Julio 17, 2010. Disponible en: [http://www.siar.cl/docs/protocolos/Det\\_textura\\_suelo.pdf](http://www.siar.cl/docs/protocolos/Det_textura_suelo.pdf).
- Solís G. B. F. 2011. Integración de *Jatropha curcas* L. en agroecosistemas como materia prima para biodiesel en la región centro de Chiapas, México. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Veracruz.
- Stokes A., Glyn B. A., Fourcaud T., Sidle R. C. 2009. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant and soil* 324 (1):1-30.
- Swamy S. L., Lalji Singh. 2006. Strategies for Development of Quality Planting Stock of *Jatropha curcas* for Biofuel Plantations. En: Proceedings of the biodiesel conference toward energy independence - Focus of *Jatropha*, Hyderabad, India. pp. 223-251.
- Thornley J. H. M. 1998. Modelling shoot:root relations: the only way forward? *Annals of Botany* 81:165-171.
- Toral O.C., Iglesias J. M., Montes de Oca S., Sotolongo J.A., García S, Torsti M. 2011. *Jatropha curcas* L., una especie arbórea con potencial energético en Cuba. *Pastos y Forrajes* 31(3):191-207.
- Tsakalidimi M., Tsitsoni T., Ganatsas P., Zagas T. 2009. A comparison of root architecture and shoot morphology between naturally regenerated and container-grown seedlings of *Quercus ilex*. *Plant Soil* 324:103-113.
- Tsao P. H., Ocana G. 1969. Selective Isolation of Species of *Phytophthora* from Natural Soils on an Improved Antibiotic Medium. *Nature* 223:636-638.
- Universidad Nacional del Nordeste (UNN). 2008. Sistema Radicular. En: Organización del cuerpo de las plantas en: Morfología de plantas Vasculares. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Nordeste, Corrientes, Argentina. Consulta: Diciembre 21, 2008. Disponible en: <http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema1/1-7raiz.htm>.

- Valdés R. O. A, Pérez Vázquez A., García Pérez E., Ruiz Rosado O., Avila Resendiz C., Romero López G. 2011a. Distribución y condiciones edafoclimáticas de las variedades nativas de *Jatropha curcas* en el estado de Veracruz. III Congreso Latinoamericano de Agroecología. Agosto 17-18, 2011; Oaxtepec, Morelos.
- Valdés R. O. A. Sánchez S. O. Vázquez P. A., Ruiz B. R. 2011b. Soil texture effects on the development of *Jatropha* seedlings the Mexican variety 'piñon manso'. Biomass and bioenergy 35(8): 3529-3536.
- Valdés R. O.A., García E. R., Sánchez S. O., Pérez V. A. 2011c. Aislamiento y patogenicidad de un posible *Pythium aphanidermatum* en *Jatropha curcas* L. no tóxica. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 14: 649 – 660.
- Vamerali T., Saccomani M., Bona S., Mosca G., Guarise M., Ganis A. 2003. A comparison of root characteristics in relation to nutrient and water stress in two maize hybrids. Plant and Soil 255:157-167.
- Van Der Plaats-Niterink A. J. 1981. Monograph of the genus *Pythium*. Studies in Mycology. Centraalbureau voor Schimmelcultures, Baarn 242:1-24.
- Vercambre G., Pagés L., Doussan C., Habib R. 2003. Architectural analysis and synthesis of the plum tree root system in an orchard using a quantitative modelling approach. Plant and Soil 251:1–11.
- Wani S., Sreedevi T. K, Marimuthu S, Kesava A. V. R., Vineela C. 2009. Harnessing the potential of jatropha and pongamia plantations for improving livelihoods and rehabilitating degraded lands. In: 6th international biofuels Conference; Mar 4-5, New Delhi. India: WII; 2009. p. 256-272.
- Watanabe T. 2002. Pictorial Atlas of Soil and Seed Fungi – Morphologies of cultured fungi and key to species. Second Edition. CRC Press. USA. 504 p.
- Webster, P. L. 1980. Analysis of heterogeneity of relative division rates in root apical meristems. Botanical Gazette 141(4): 353-359.
- Zamarripa C., Díaz P. 2008. Áreas de potencial productivo de piñón *Jatropha curcas* L., como especie de interés bioenergético en México. Proyecto de Biocombustibles del INIFAP. INIFAP. Consulta: 20 de diciembre del 2009. Disponible en: [http://www.oleaginosas.org/art\\_211.shtml](http://www.oleaginosas.org/art_211.shtml)
- Zar J. H. 1999. Multiple Regression and Correlation. En: Biostatistical Analysis. Fourth Edition. Prentice Hall, New Jersey. USA. Pp. 413-450.