



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Ciencias en Energía Renovable

Producción de Biomasa y Captura de Carbono de
Germoplasma de *Jatropha curcas* L. en Yucatán,
México

Tesis que presenta

IBT JALSEN IVÁN TECO BRAVO

En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS EN ENERGÍA RENOVABLE

Mérida, Yucatán, México, Octubre de 2014



DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de materiales y métodos experimentales, los resultados y discusión de este documento proviene de las actividades de experimentación realizadas durante el periodo que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las unidades y laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y a contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la ley federal del derecho de autor y la ley de propiedad industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho centro de investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la ley federal del derecho de autor y la ley de la propiedad intelectual, en el tenor de lo expuesto en la presente declaración.

Mérida, Yucatán, México.

Octubre de 2014.



I.B.T. Jalsen Iván Tecó Bravo.

El trabajo de tesis titulado "Producción de Biomasa y Captura de Carbono de Germoplasma de *Jatropha curcas* L. en Yucatán, México", fue desarrollado por el IBT. Jalsen Iván Teco Bravo en las instalaciones del laboratorio USF15 de la Unidad de Energía Renovable y el herbario de la Unidad de Recursos Naturales del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., bajo la dirección del Dr. Javier Orlando Mijangos Cortés y del Dr. Luis Felipe Barahona Pérez, conforme al programa de Maestría en Ciencias en Energía Renovable.



Dr. Felipe Vázquez Flota.
Director de Docencia.
Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C.

AGRADECIMIENTOS

- Al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. y a la Unidad de Energía Renovable por darme la oportunidad de ser uno de sus estudiantes, darme el privilegio de obtener un posgrado y por formarme como Maestro en Energía Renovable.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca número 342742.
- Al Dr. Javier Orlando Mijangos Cortés por darme la oportunidad de realizar este trabajo, por abrirme las puertas, por la confianza depositada, porque no solo se necesita interés por contribuir sino oportunidades para hacerlo.
- Al Dr. Luis Felipe Barahona Pérez, además de su papel como codirector, por brindarme la mano en los momentos difíciles cuando creí que no tenía nadie a quién recurrir y por los recursos para los trabajos de campo.
- Al Dr. Abelardo Navarrete Yabúr, por el préstamo del terreno donde se estableció la plantación experimental, por facilitarme el equipamiento de irrigación de la parcela y por la donación de cuatro accesiones de *Jatropha curcas*.
- A la empresa Agroindustria Alternativa del Sureste S.P.R de R.L de C.V. por las facilidades otorgadas para trabajar con seis de sus accesiones de *Jatropha curcas*.
- A mi comité tutorial y a los revisores de tesis: Dr. Raúl Tapia Tussell, Dra. Guadalupe López Puc, Dra. Nancy Santana Buzzy y Dr. Alberto Uc Vázquez.
- Al Dr. Roger Orellana Lanza, por la asesoría brindada desinteresadamente.
- Al CIATEJ-Unidad Sureste, al Fondo SAGARPA-CONACYT y al Programa “Mejoramiento genético de *Jatropha* para generar al menos una variedad con alto rendimiento agronómico, alto contenido de aceite y baja toxicidad para la obtención de biodiesel” No. 163502, por la asignación de una parte de los recursos destinados para el trabajo de campo.
- Al herbario del CIY, en especial a la Dra. Ivón Mercedes Ramírez Morillo por facilitar el equipo para la deshidratación del material vegetal.
- Al M.C. Erick Alberto Aguilera Cahuich por su asesoría en diferentes etapas del proyecto.

- Al personal técnico de la Unidad de Energía Renovable y de la Unidad de Recursos Naturales, Q.I. Tanit Toledano Thompson, M.C. Jorge Domínguez Maldonado y Q.F.B. Matilde Margarita Ortiz García por la ayuda técnica prestada en la parte experimental de la tesis.
- A mis profesores de la maestría, por transmitirme sus conocimientos y contribuir en mi formación como estudiante de posgrado.

DEDICATORIAS

A Dios:

Por concederme la vida, el privilegio de conocer este maravilloso mundo y realizar cosas como este posgrado entre tantas otras alegrías. Sobre todo por darme la salud y fuerza necesaria para luchar todos los días.

A mi Esposa María de los Ángeles López Arroyo:

Por su invaluable compañía, por compartir su vida conmigo, por apoyarme en las malas, las difíciles y las muy difíciles. Por no dejarme solo cuando más la necesito, porque gracias a ella sé que tengo alguien a quien contar mis penas, que siempre estará ahí para reconfortarme. Gracias también por aquellas tantas ocasiones que me acompañó a los trabajos de campo, cuando las cosas al inicio se veían más imposibles que difíciles, fue bueno saber que éramos dos y no uno solo contra el mundo, nunca lo olvidaré.

A mi Madre Aridai Bravo Roblero:

Por todo lo que ha hecho por mí, por su incansable esfuerzo. Por ser un ejemplo de lucha, constancia, tenacidad y valentía. Porque me enseñó, quizás sin darse cuenta, que nunca hay que rendirse y que no hay obstáculos lo suficientemente grandes para renunciar a la vida.

A Forest:

Por ser la alegría de la casa, por estar siempre dispuesto a dar cariño a los demás integrantes de la familia en todo momento sin pedir nada a cambio.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	3
Objetivos Específicos.	3
CAPÍTULO 1	4
ANTECEDENTES	4
1.1. Biomasa como fuente de energía.....	4
1.2. Biomasa, captura de carbono y cambio climático.....	5
1.3. <i>J. curcas</i> como fuente de biomasa.	7
1.4. Métodos para la estimación de biomasa.	10
1.4.1. Método directo e indirecto.....	10
1.4.2. Ecuaciones alométricas.	10
Hipótesis.	13
CAPÍTULO 2	14
MATERIALES Y MÉTODOS	14
2.1. Sitio de estudio.....	14
2.2. Establecimiento de la plantación experimental de <i>J. curcas</i>	14
2.3. Muestras.	15
2.4. Cuantificación y distribución de biomasa de <i>J. curcas</i>	15
2.5. Cuantificación de la captura de CO ₂ por <i>J. curcas</i>	15
2.6. Construcción de modelos alométricos para la estimación de biomasa de <i>J. curcas</i>	16
2.6.1. Transformación del modelo de potencia a su forma lineal.	16
2.6.2 Cálculo de los parámetros de los modelos de regresión.	17
2.6.3. Detección de observaciones atípicas e influyentes.	17

2.6.4. Medida de la bondad de ajuste de las ecuaciones de regresión y de la intensidad de la relación entre las variables.	18
2.6.5. Prueba de significancia de la regresión.....	19
2.6.6. Comparación de los modelos de regresión.....	19
2.6.7. Medida del desempeño predictivo de los modelos.....	20
2.6.8. Análisis residual: confirmación de las suposiciones del modelo de regresión lineal simple.....	21
2.6.8.1. Prueba de linealidad.....	21
2.7. Caracterización fenotípica de las 10 accesiones de <i>J. curcas</i>	22
CAPÍTULO 3	24
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
3.1. Establecimiento de la plantación experimental de <i>J. curcas</i>	24
3.2. Producción de aceite de las accesiones de <i>J. curcas</i>	25
3.3. Producción de biomasa y captura de carbono de <i>J. curcas</i>	26
3.4. Distribución de biomasa de <i>J. curcas</i>	29
3.5. Construcción de modelos alométricos para la estimación de biomasa de 10 accesiones de <i>J. curcas</i>	31
3.5.1. Características dasométricas de las accesiones de <i>J. curcas</i>	31
3.5.2. Relación entre la biomasa aérea y el diámetro de la base del tallo de 10 accesiones de <i>J. curcas</i>	32
3.5.3. Parámetros de las ecuaciones de regresión de 10 accesiones de <i>J. curcas</i>	35
3.5.4. Comparación de los parámetros de regresión.....	35
3.5.5. Agrupamiento de accesiones con tendencias similares en su relación entre la biomasa aérea y el diámetro de la base del tallo.....	36
3.5.6. Parámetros de regresión de accesiones agrupadas.....	37
3.5.7. Comparación de parámetros de regresión entre y dentro de grupos de accesiones.....	38
3.5.8. Modelos finales de regresión para la estimación de biomasa aérea de 10 accesiones de <i>J. curcas</i>	39
3.5.9. Significancia y ajuste de los modelos finales de regresión.....	40
3.5.10. Estabilidad de los parámetros de los modelos finales de regresión.....	42
3.5.11. Desempeño predictivo de los modelos finales de regresión.....	42

3.6. Análisis residual de los modelos finales de regresión: confirmación de los supuestos de la regresión lineal.....	44
3.7. Caracterización fenotípica de las 10 accesiones de <i>J. curcas</i>	49
CONCLUSIONES.....	55
RECOMENDACIONES.	57
BIBLIOGRAFÍA.....	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Supervivencia de las estacas de 10 accesiones de <i>J. curcas</i> plantadas en la parcela experimental.....	24
Tabla 3.2. Contenido de aceite (%) de las semillas de 10 accesiones de <i>J. curcas</i>	25
Tabla 3.3. Producción de biomasa aérea (g) de 10 accesiones de <i>J. curcas</i> durante nueve meses	26
Tabla 3.4. Producción de biomasa y captura de carbono y CO ₂ de <i>J. curcas</i> con una densidad de siembra de 1709 plantas.ha ⁻¹	27
Tabla 3.5. Dimensiones de las plantas (2 - 9 meses de edad) de 10 accesiones de <i>J. curcas</i> utilizadas para la construcción de ecuaciones alométricas.....	31
Tabla 3.6. Parámetros calculados del análisis de regresión entre la Biomasa Aérea (g) y el Diámetro de la Base del Tallo (cm) mediante el modelo $\text{Log B} = \beta_1 \text{Log D} + \text{Log } \beta_0$ para 10 accesiones de <i>J. curcas</i> , significancia ($\alpha = 0.05$) y ajuste.....	35
Tabla 3.7. Resultado de la prueba de homogeneidad de parámetros entre el Modelo Reducido (MR) y el Modelo Completo (MC).	36
Tabla 3.8. Parámetros calculados del análisis de regresión entre la Biomasa Aérea (cm) y el Diámetro de la Base del Tallo (cm) mediante el modelo $\text{Log B} = \beta_1 \text{Log D} + \text{Log } \beta_0$ para los grupos de accesiones (ADEFGI), (BCH) y la accesión J de <i>J. curcas</i> , significancia ($\alpha = 0.05$) y ajuste.....	38
Tabla 3.9. Resultado de la prueba de homogeneidad de parámetros entre los modelos (ADEFGI), (BCH) y J así como dentro de los dos primeros grupos.....	38
Tabla 3.10. Modelos de regresión para la estimación de biomasa aérea (g) de 10 accesiones de <i>J. curcas</i> a partir del diámetro de la base del tallo (cm).....	39
Tabla 3.11. Intervalos de confianza (IC) de 95% del parámetro β_1 de los tres modelos de regresión finales, como una medida de la estabilidad.....	42
Tabla 3.12. Desempeño predictivo de los modelos de regresión finales para la estimación de biomasa de 10 accesiones de <i>J. curcas</i>	43
Tabla 3.13. Autovalores y autovectores de los dos primeros componentes principales para 19 caracteres agromorfológicos de 10 accesiones de <i>J. curcas</i>	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Planta y frutos de <i>J. curcas</i>	6
Figura 2.1. Distribución de las accesiones de <i>J. curcas</i> en la parcela experimental.....	14
Figura 3.1. Distribución de la biomasa en los tallos, ramas y hojas de las accesiones B y D de <i>J. curcas</i> como representativas de todas las accesiones.....	30
Figura 3.2. Relación entre la Biomasa Aérea (g) y el Diámetro de la Base del Tallo (cm) de 10 accesiones de <i>J. curcas</i> y el modelo reducido (MR), en plantas de 2 - 9 meses de edad.....	33
Figura 3.3. Relación entre la Biomasa Aérea (g) y el Diámetro de la Base del Tallo (cm) de <i>J. curcas</i> , transformados con logaritmos, de 10 accesiones y el modelo reducido (MR), en plantas de 2-9 meses de edad.....	34
Figura 3.4. Relación entre el Logaritmo de la Biomasa Aérea (g) y el del Diámetro de la Base del Tallo (cm) de 10 accesiones de <i>J. curcas</i>	37
Figura 3.5. Prueba de linealidad de los modelos (ADEFGI), (BCH) y (J) para la estimación de biomasa aérea de 10 accesiones de <i>J. curcas</i>	45
Figura 3.6. Prueba de homocedasticidad de los modelos (ADEFGI), (BCH) y (J) para la estimación de biomasa aérea de 10 accesiones de <i>J. curcas</i>	47
Figura 3.7. Prueba de normalidad de los modelos (ADEFGI), (BCH) y (J) para la estimación de biomasa aérea de 10 accesiones de <i>J. curcas</i>	48
Figura 3.8. Dispersión de las 10 accesiones de <i>J. curcas</i> con base en los dos primeros componentes principales.....	50
Figura 3.9. Agrupamiento de 10 las accesiones de <i>J. curcas</i> a partir de 19 rasgos agromorfológicos, construido usando el método UPGMA.....	52

RESUMEN

Jatropha curcas L. es una especie con potencial para la mitigación del cambio climático tanto como fuente de biomasa para la producción de energía como mediante la captura y almacenamiento de CO₂. En el presente trabajo se cuantificó la producción de biomasa y la captura de CO₂ de 10 accesiones de *J. curcas*, propagadas vegetativamente, durante nueve meses bajo las condiciones ambientales del Estado de Yucatán y se construyeron modelos alométricos para la estimación posterior de la biomasa de cada una de las accesiones mediante análisis de regresión a partir del diámetro de la base del tallo como variable independiente. La producción de biomasa de las 10 accesiones estuvo en el intervalo de 406-1544 g siendo el promedio de 1 kg.planta⁻¹. La captura anual de CO₂ de las accesiones fue de 4.7 t.ha⁻¹. Todas las relaciones de regresión entre el diámetro de la base del tallo como variable independiente y la biomasa aérea como variable dependiente fueron significativas ($\alpha = 0.05$) y en todos los casos, más del 96% de la variabilidad de la biomasa aérea fue explicada por la variabilidad del diámetro del tallo. La comparación de los 10 modelos alométricos mostró que son tres los necesarios para estimar la biomasa de las 10 accesiones, uno para seis, otro para tres y uno más para una sola accesión. Los tres modelos alométricos finales cumplieron con los criterios de linealidad, homocedasticidad y normalidad, además, fueron insesgados y con errores estándar inferiores a 5%.

ABSTRACT

The potential of *Jatropha curcas* L. as a species for climate change mitigation is based in its use as a biomass source for energy production and its capacity to sequester and store CO₂. In this work, biomass production and CO₂ sequestration of 10 *J. curcas* accessions that were propagated vegetatively, for nine months under ambient conditions of the Yucatán State, was quantified. Allometric models were constructed for the subsequent biomass estimation of each accession by regression analysis. The stem base diameter was used as an independent variable. The results showed that biomass production of 10 *J. curcas* accessions was 406-1544 g with an average production of 1 kg.plant⁻¹. The annual average CO₂ sequestration of these accessions was 4.7 t.ha⁻¹. All regression relationships between stem diameter as the independent variable and above ground biomass as dependent variable were significant ($\alpha = 0.05$) and in all cases, over 96% of the variability of above ground biomass was explained by stem diameter variability. The comparison of 10 allometric models showed that three are necessary to estimate biomass production of the 10 accessions, one model to six accessions, another model to three and one more model for a single accession. The final three allometric models met the linearity, homocedasticity and normality criteria and were also unbiased with standard errors below 5%.

INTRODUCCIÓN

El uso de biomasa como fuente de energía ha sido fundamental para el desarrollo de la civilización [1]. Actualmente su combustión directa contribuye con el 15 % del suministro de energía primaria de la población rural a nivel global, principalmente para la cocción de alimentos y la calefacción [2]. Sin embargo, ahora es posible obtener otras formas de energía a partir de biomasa, mediante su transformación en combustibles líquidos, sólidos y gaseosos como el biodiesel, el bioetanol y el biogás principalmente [3].

Por otra parte, el uso de biomasa como fuente de energía contribuye con la mitigación del cambio climático debido a que el CO₂ emitido a la atmósfera durante su combustión fue capturado previamente por las plantas mediante la fotosíntesis [4]. Para potenciar la captura de carbono por las plantas se ha sugerido incrementar el área destinada a la producción de biomasa, enfatizando en el aprovechamiento de tierras marginales que no son fértiles para la producción agrícola [5].

Jatropha curcas L. es una especie potencial para este propósito, debido a su adaptabilidad a suelos marginales, su ciclo de vida de hasta 50 años y al contenido de aceite de sus semillas cuyos ésteres metílicos (biodiesel) obtenidos por la reacción de transesterificación tienen composición química y contenido energético similares a los del diesel de petróleo, lo cual permite su uso en los motores de este tipo sin modificaciones tecnológicas importantes [6, 7]. Además, es posible aprovechar la biomasa residual de la cadena productiva de *J. curcas* para producir más energía. Los restos de madera pueden utilizarse para la producción de etanol lignocelulósico; las hojas, la cáscara de los frutos y la torta de las semillas pueden fermentarse en anaerobiosis para la producción de biogás, mientras la cascarilla de las semillas podría emplearse para la producción de briquetas dado su alto contenido de lignina [8, 9].

Por lo tanto, resulta necesario cuantificar la producción de biomasa y la captura de carbono de *J. curcas*, para hacer proyecciones tanto de la cantidad de energía que podría producirse a partir de ella como del balance de carbono que esto implicaría [10].

El método más preciso para estimar la biomasa es el corte y deshidratación del material vegetal hasta peso constante, sin embargo, es destructivo, costoso y requiere de mucho tiempo [11].

La alometría es el método alternativo más común y sencillo para estimar la biomasa vegetal. En ella se desarrollan ecuaciones relacionando la biomasa como variable dependiente con variables independientes de fácil medición, como el diámetro del tallo y la altura de la planta, entre otras. Este método es rápido, barato y no destructivo. Sin embargo, es empírico y específico del sitio y de la especie [12].

Debido a que los suelos de la península de Yucatán son de escasa importancia agrícola puesto que son pedregosos, poco profundos y susceptibles a la erosión [13]; el cultivo de *J. curcas* en esta región parece ser adecuado dada su capacidad para crecer en tales condiciones.

En el presente trabajo se midió la producción de biomasa y la captura de CO₂ de 10 accesiones de *J. curcas* cultivadas en el estado de Yucatán y se construyeron modelos alométricos para la estimación posterior de la biomasa a partir del diámetro de la base del tallo como variable independiente.

Objetivo general

Cuantificar la producción de biomasa de 10 accesiones de *J. curcas* bajo las condiciones ambientales de Temozón Norte, Mérida, Yucatán y con ello construir modelos matemáticos que permitan su estimación posterior a partir de una variable de fácil medición sin emplear métodos destructivos.

Objetivos Específicos

Cuantificar la producción de biomasa y la captura de CO₂ de 10 accesiones de *J. curcas* en Temozón Norte, Mérida, Yucatán.

Construir modelos alométricos para estimar la producción de biomasa de 10 accesiones de *J. curcas*.

Caracterizar fenotípicamente 10 accesiones de *J. curcas* a partir de variables agromorfológicas en Temozón Norte, Mérida, Yucatán.

Cuantificar la producción de aceite de 10 accesiones de *J. curcas*.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1. Biomasa como fuente de energía

La biomasa se refiere a la materia orgánica no fosilizada y biodegradable derivada de plantas, animales y microorganismos con un contenido intrínseco de energía química. Puede ser clasificada en virgen y residual, la primera corresponde la vegetación terrestre mientras que la segunda incluye residuos orgánicos sólidos y líquidos de origen agrícola, agroindustrial, municipal y doméstico [14].

La biomasa ha sido utilizada desde la antigüedad por la humanidad como fuente de energía mediante la combustión directa de la madera. En la actualidad esta contribuye con el 15 % del suministro de energía primaria a nivel global ya que es utilizada aproximadamente por 2.5 billones de personas de la población rural mundial principalmente para la cocción de alimentos y la calefacción [1, 2].

Sin embargo, la combustión directa es un proceso ineficiente energéticamente puesto que únicamente se aprovecha el 7% de la energía disponible [15]. El avance tecnológico actual permite obtener mayor cantidad de energía a partir de ella, ya sea directamente mediante la combustión para producir calor, vapor y electricidad (cogeneración) o indirectamente mediante su transformación en combustibles líquidos y/o gaseosos [16].

La cogeneración es una alternativa para la generación de electricidad. En este proceso la biomasa se quema en calderas para producir vapor, éste hace girar una turbina y acciona un generador, produciendo electricidad. Las centrales eléctricas de biomasa utilizan tecnología muy similar a la utilizada en las plantas eléctricas de carbón y actualmente proveen de energía a una alta proporción de la población en algunos países del norte de Europa [17].

Los principales combustibles líquidos que se pueden producir a partir de biomasa son el biodiesel y el etanol los cuales pueden utilizarse como sustitutos del petrodiesel y la

gasolina respectivamente, mientras que los gaseosos son el metano y el hidrógeno que juntos componen lo que se denomina biogás [3].

El biodiesel actualmente es producido principalmente a partir de aceite de soya y canola a través del proceso de transesterificación. Este puede utilizarse puro o mezclado con petrodiesel en los motores diesel [15].

El etanol es producido mediante la fermentación microbiana de azúcares presentes en diferentes fuentes de biomasa, las principales actualmente son la caña de azúcar y el maíz. Sin embargo, puede ser producido también a partir de biomasa lignocelulósica, sometiénola a un pretratamiento en el cual se rompen los enlaces glucosídicos de las cadenas largas de los polisacáridos que la conforman para fermentarlos posteriormente [18]. La gasolina mezclada con el 10% de etanol puede utilizarse directamente en los motores de gasolina sin modificación alguna [19].

El biodiesel, el etanol y el biogás ya se han introducido con éxito en el mercado y se encuentran en uso; mientras que las tecnologías para la transformación de la biomasa (transesterificación, fermentación y cogeneración) ya están disponibles en un sentido técnico [3].

Por otra parte, las reservas de combustibles fósiles son finitas y por lo tanto, susceptibles de agotarse a medida que se consumen. La biomasa es la única fuente de carbono que contiene la suficiente energía para sustituirlos [17].

1.2. Biomasa, captura de carbono y cambio climático

Los mercados energéticos del mundo dependen en gran medida de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) como fuente de energía y de productos químicos. Sin embargo, su combustión emite cantidades abundantes de CO₂, uno de los principales gases de efecto invernadero, lo cual ha incrementado su concentración atmosférica, provocando el calentamiento global y con ello el cambio climático [17].

La biomasa por su parte, es una fuente de energía limpia y renovable ya que tras su combustión (directa o indirecta) el CO₂ que se libera es aquel que sirvió como fuente de

carbono para generar la biomasa durante la fotosíntesis, por lo tanto, no hay incremento neto de este gas en la atmósfera [20].

Para la captura de carbono *J. curcas* es una especie con potencial ya que se ha estimado que puede fijar entre 5.5 y 8 t.ha⁻¹.año⁻¹ de CO₂. Además, tiene un ciclo de vida de hasta 50 años y es capaz de desarrollarse en terrenos marginales y en ecosistemas severamente degradados, lo cual puede potenciar la captura de CO₂ atmosférico y ayudar en la reincorporación de carbono en el suelo [7, 21].

Un estudio de Yan y Chen [22], basado en la evaluación del potencial de producción de biomasa de *J. curcas* en tierras marginales en el norte de China, estima una reducción de las emisiones de CO₂, para el año 2020, de alrededor de 75 millones de toneladas equivalentes de carbono, lo que representaría el 4% del total de emisiones de ese país.

Por otra parte, existen políticas internacionales que incentivan la mitigación del cambio climático mediante la reforestación y mantenimiento de áreas forestales a largo plazo, a través del esquema de comercio de emisiones de gases de efecto invernadero asentado en el Mecanismo de desarrollo limpio del Protocolo de Kyoto; el cual permite vender el carbono secuestrado en los árboles y bosques a las industrias y gobiernos para que compensen sus emisiones de GEI [23]. Por lo tanto, el cultivo de *J. curcas* puede generar créditos de carbono para venderlos en el mercado mundial de comercio de carbono, lo cual podría reducir el costo de su cultivo [24].

Además, la biomasa es un parámetro que caracteriza la capacidad de los ecosistemas u organismos vivos para capturar y acumular carbono a lo largo del tiempo [25]. La acumulación de biomasa en las plantas es afectada por factores ambientales como la radiación solar, la concentración atmosférica de CO₂, la disponibilidad de agua y nutrimentos, así como por factores biológicos como la vía de fijación de CO₂ y la capacidad fotosintética de las plantas. Los factores biológicos están determinados por el genotipo de las plantas, lo que en última instancia determina en gran medida su eficiencia bioquímica y fisiológica [26].

1.3. *J. curcas* como fuente de biomasa

J. curcas (Figura 1.1) es definida como un arbusto grande o un árbol pequeño, perenne, puede alcanzar una altura de hasta 5 m y su ciclo de vida es de hasta 50 años [27]. La planta muestra un crecimiento articulado, con discontinuidad morfológica en cada entrenudo [8].



Figura 1.1. Planta y frutos de *J. curcas*.

Las plantas propagadas generativamente, desarrollan una raíz pivotante profunda y cuatro periféricas las cuales se distribuyen simétricamente en el plano horizontal con una inclinación de -45° ; las plantas propagadas vegetativamente no forman la raíz principal [8].

Presenta pequeños brotes terminales y axilares así como ramas cercanas al suelo. Su tallo es recto, con corteza marrón pálido y numerosas cicatrices debido a la caída de sus hojas. Sus ramas son glabras y contienen látex [28].

Las hojas de *J. curcas* están dispuestas alternadamente, su longitud y anchura es de 6-15 cm, tienen de 5-7 lóbulos y los pecíolos tienen longitud de 5-20 cm [8].

Sus frutos son cápsulas elipsoidales generalmente triloculares de color verde-marrón, 2-3.5 g de peso, 4 cm de largo y 3 cm de diámetro [8]. El exocarpio permanece carnosos, indehiscente y verde hasta que las semillas están maduras; después de 2-3 meses cuando los frutos están completamente desarrollados y alcanzan la madurez, el exocarpio se seca y su color cambia de verde a amarillo, marrón y finalmente negro [28]. Las semillas son elipsoidales, triangular-convexas, de color negro, de 0.5-0.7 g de peso, 2 cm de largo, 1 cm de espesor y contienen aproximadamente 30-35% de aceite por peso seco [29].

J. curcas es una especie suculenta que pierde las hojas durante la estación seca y presenta latencia inducida por descensos en las precipitaciones y en la temperatura [4]. Crece en una amplia gama de condiciones climáticas, desde semiárida a húmedas, con precipitación anual que varía de 300 hasta 3000 mm y principalmente a bajas altitudes (0-500 m) [28]. Está distribuida en las regiones tropicales y subtropicales, con límites de cultivo en 30° N y 35° S [8]. Es capaz de crecer en suelos de mala calidad, en términos de estructura y contenido de nutrientes, tales como los suelos aluviales y los suelos rojos lateríticos, incluso en grava, arena así como en suelos salinos [8].

J. curcas ha atraído la atención como fuente potencial de biomasa para la producción de biodiesel debido al contenido de aceite de sus semillas de hasta 40% respecto a su peso y a la composición de éste (proporción de ácidos grasos saturados e insaturados). Además, los ésteres metílicos de sus ácidos grasos tienen contenido energético y propiedades fisicoquímicas (gravedad específica, densidad, punto de turbidez, punto de fluidez, índice de yodo, etc.) similares a los del diesel de petróleo, lo cual permite su uso en los motores de este tipo sin modificaciones tecnológicas importantes [27].

Aunado a lo anterior, el aceite de *J. curcas* no es comestible, lo cual es de suma importancia para la producción de biodiesel, principalmente en los países en vías de desarrollo, debido a que no compite con la producción de alimentos y porque los aceites comestibles son demasiado caros como para ser transformados en combustible [9].

Por otra parte, la cadena de producción de biodiesel a partir de *J. curcas* genera importantes residuos que pueden aprovecharse para producir otras formas de energía además del biodiesel. Durante las actividades de mantenimiento de las plantaciones de *J. curcas* se generan hojas y restos de madera que podrían aprovecharse para la producción de biogás y etanol lignocelulósico respectivamente [8].

En el proceso de obtención de aceite de *J. curcas* existen tres etapas que generan cantidades importantes de biomasa residual. 1) Descascarado, en la cual se separan las semillas del mesocarpio; 2) Descascarillado, donde se separa la cascarilla del endocarpio y 3) Extracción, en el cual se obtiene el aceite y la torta de la semilla extruida [28].

En el proceso de descascarado se genera la cáscara o mesocarpio como subproducto, el cual representa el 75% del peso de los frutos, esta cantidad es la mayor respecto a los demás residuos e incluso al aceite mismo, su valor calorífico es de aproximadamente 10 MJ.kg⁻¹ [29]. Durante el descascarillado se produce la cascarilla que representa el 11.9% del peso de los frutos, el 48.5% del peso de la semilla y tiene un valor calorífico de 17 MJ.kg⁻¹ [30].

En la extracción de aceite se produce otro importante residuo, la semilla extruida, la cual representa el 66% de su peso inicial. Este residuo es muy importante energéticamente ya que su valor calorífico es de 17.5 MJ.kg⁻¹, la mitad respecto al de la semilla completa (37.7 MJ.kg⁻¹) esto significa que ambas fracciones tienen similar contenido de energía [29]. La semilla extruida, el mesocarpio y el endocarpio pueden quemarse directamente como combustible debido a su alto valor calorífico, o bien, para mejorar su desempeño como tal, pueden compactarse para producir briquetas ya que tendrían mayor densidad y por lo tanto, mayor contenido de energía por unidad de masa [8].

Otra forma de aprovechar los tres residuos de los frutos que resultan de la extracción de aceite es mediante la producción de biogás a través de un proceso de digestión anaerobia. El biogás tiene un valor calorífico aproximado de 20 MJ. Dependiendo del inóculo y del residuo a fermentar, ya sea cáscara o semilla extruida, puede obtenerse entre 0.4 y 0.6 m³.kg⁻¹ de biogás, respectivamente [6].

1.4. Métodos para la estimación de biomasa

Para hacer proyecciones de la cantidad de energía que podría producirse a partir de la biomasa de *J. curcas*, del balance de carbono que esto implicaría así como para el comercio de carbono, se necesitan estimaciones confiables de la biomasa producida por esta planta [10]. Existen métodos directos e indirectos para estimar la biomasa.

1.4.1. Método directo e indirecto

El método directo consiste en cortar y deshidratar el material vegetal hasta obtener su peso constante. Este método es el más preciso y confiable, sin embargo, es destructivo, caro y requiere de mucho tiempo [25].

La estimación indirecta de la biomasa se realiza aplicando métodos de cubicación de plantas en la cual se estima el volumen del tallo y las ramas del árbol y se determina la gravedad específica de la madera dividiendo el peso de un bloque de madera totalmente seca entre el peso de un volumen de agua igual al del bloque de madera. La biomasa se calcula multiplicando el volumen de la madera por su gravedad específica. Sin embargo, este método es menos preciso que el método directo [31].

1.4.2. Ecuaciones alométricas

Son modelos matemáticos, basados en relaciones alométricas de las plantas, que estiman la biomasa vegetal. Mediante análisis de regresión, estos modelos relacionan la biomasa como variable dependiente con variables independientes de fácil medición tales como el diámetro del tallo, la altura de la planta, la densidad de la madera, etc., son generados a partir de una muestra pequeña de árboles y pueden ser utilizados después a gran escala [32].

El diámetro del tallo es la variable independiente predictiva más utilizada para la estimación de biomasa. La relación entre estas variables es expresada como una función de potencia debido a que el crecimiento de las plantas mantiene la proporción entre sus diferentes partes. La forma general de dicha función es $B = \beta_0 D^{\beta_1}$; donde B es la biomasa aérea (g); D es el diámetro del tallo (cm), β_0 y β_1 son los parámetros a calcular [23].

Sin embargo, para la construcción de modelos para la estimación de biomasa, los parámetros β_0 y β_1 se calculan mediante el modelo de regresión lineal simple $y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon$; donde “ y ” es la variable dependiente, “ x ” es la variable independiente, β_0 y β_1 son los parámetros a calcular y ϵ es el término del error [33]. Por lo tanto, la función de potencia $B = \beta_0 D^{\beta_1}$ se transforma a su forma lineal aplicando logaritmos a ambas variables, quedando en la forma $\text{Log } B = \text{Log } \beta_0 + \beta_1 \text{ log } D + \epsilon$; donde $\text{Log } \beta_0$ es la intersección con la ordenada al origen y β_1 es la pendiente de la recta de regresión [12].

En un análisis de regresión se empieza por hacer una suposición acerca del modelo apropiado para la relación entre las variables dependientes e independientes. En el caso de la regresión lineal simple, el modelo de regresión es $y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon$. Después, empleando el método de mínimos cuadrados se obtienen los valores de β_0 y β_1 , que son las estimaciones de los parámetros del modelo [33].

Para saber qué tan bien se ajusta a los datos la ecuación de regresión estimada, se debe calcular una medida de la bondad de ajuste, el coeficiente de determinación r^2 . Sin embargo, aun cuando se obtenga un valor de r^2 cercano a uno, la ecuación de regresión estimada no debe ser usada hasta que se realice un análisis para determinar si el modelo empleado es adecuado [34].

Un paso importante para constatar si el modelo obtenido es adecuado consiste en probar la significancia de la relación. Las pruebas de significancia en el análisis de regresión están basadas en las suposiciones siguientes acerca del término del error [34]:

1. Linealidad. Es decir, el término de error es una variable aleatoria cuya media o valor esperado es una función lineal de X .

2. Homocedasticidad. La varianza del error es la misma para todos los valores de la variable independiente, es decir, la varianza de “y” respecto a la recta de regresión es la misma para todos los valores de “x”.

3. Normalidad. El término del error es una variable distribuida normalmente, esto es, como “y” es función lineal de \mathcal{E} , también “y” es una variable aleatoria distribuida normalmente.

En una ecuación de regresión lineal simple, la media o valor esperado de “y” es una función lineal de “x”. Pero si el valor de β_1 es cero, entonces, el valor medio de “y” no depende del valor de “x”, por lo tanto, se puede concluir que “x” no está relacionada linealmente con “y”. Pero si el valor de β_1 es distinto de cero, se concluirá que las dos variables están relacionadas. Por lo tanto, para probar si existe una relación de regresión significativa, se debe realizar una prueba de hipótesis para determinar si el valor de β_1 es distinto de cero [33].

Aunque ya se han desarrollado varias ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa, principalmente para especies forestales, su aplicación en especies distintas para las que fueron generadas pueden ser imprecisas debido a que no se estarían tomando en cuenta las diferencias en parámetros como la densidad de la madera, la forma y arquitectura del árbol, todo lo cual puede afectar las relaciones modeladas entre la variable predictiva y la biomasa producida [35].

Para *J. curcas* también se han desarrollado modelos alométricos que permiten la estimación de su biomasa. Ghezehei *et al.* [12] desarrollaron un modelo alométrico de potencia para la estimación de la biomasa aérea total ($B = 0.000907BD^{3.354}$); $R^2 = 0.98$ en una plantación experimental ubicada en la localidad de Pietermaritzburg, Sudáfrica utilizando el diámetro de la base del tallo como variable independiente [12].

Achten *et al.* [36] por su parte, desarrollaron otro modelo alométrico también de potencia para la estimación de la biomasa aérea a partir de plántulas establecidas bajo condiciones de invernadero en la localidad de Heverlee, Bélgica, tomando también el diámetro de la base del tallo como variable independiente predictiva $B = 0.029D^{2.33}$; $R^2 = 0.89$.

Hellings y Romijn [10] publicaron el modelo alométrico de potencia $B = 0.0042BD^{2.8361}$; $R^2 = 0.841$ para estimar la biomasa aérea; generado a partir de datos de plantas colectadas en la región Arusha, ubicada en el norte de Tanzania. Makuwa *et al.* [23] reportaron la ecuación $B = 0.0067XBD^{2.891}$; $R^2 = 0.726$; usando datos colectados en las regiones Centro y Norte de Malawi.

Sin embargo, aunque ya existan modelos para *J. curcas*, estos no son transferibles a la misma especie cuando crece en condiciones ambientales diferentes debido a que el crecimiento de las plantas es afectado por las características y condiciones climáticas del sitio donde se desarrolla, por lo tanto, las ecuaciones alométricas son específicas tanto del sitio como de la especie [12].

Hipótesis

La producción, acumulación y distribución de biomasa es diferente en cada una de las 10 accesiones de *J. curcas* estudiadas debido a que sus eficiencias intrínsecas para capturar CO₂ y almacenar energía en la planta son diferentes.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Sitio de estudio

La parcela experimental estuvo ubicada en la localidad de Temozón Norte, Mérida, Yucatán, México (N 21° 3' 22" O 89° 36' 43"). De acuerdo a Bautista y Batllori-Sampedro [13] los suelos de esta zona están clasificados como litosoles, cuya característica principal es la escasa profundidad, inferior a 10 cm.

2.2. Establecimiento de la plantación experimental de *J. curcas*

La plantación experimental se estableció mediante reproducción vegetativa con 10 accesiones de *J. curcas* proporcionadas por el Dr. Abelardo Navarrete Yabur y el Banco de germoplasma de la empresa Agroindustria Alternativa del Sureste S.P.R de R.L de C.V. con las denominaciones A, B, C, D, E, F, G, H, I y J. Se sembraron 24 estacas por accesión bajo un diseño de bloques al azar. Un bloque estuvo compuesto por seis estacas y a cada accesión contó con cuatro bloques. Las distancias de siembra fueron de un metro entre estacas, dos entre bloques y cuatro entre filas (Figura 2.1).

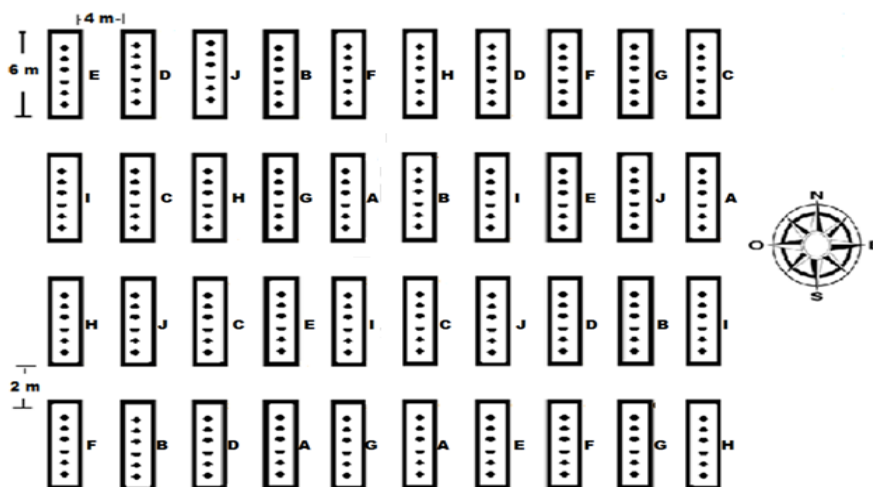


Figura 2.1. Distribución de las accesiones de *J. curcas* en la parcela experimental. Los rectángulos representan a los bloques, los puntos a las estacas que conforman a los bloques y las literales a las accesiones.

Las estacas de cada accesión fueron colectadas de una sola planta madre para garantizar la homogeneidad del material vegetal y tuvieron una longitud de aproximadamente 50 cm. La plantación fue sometida a riego por goteo cada cuarto día las primeras seis semanas después de la siembra hasta el inicio de la temporada de lluvias en la región.

2.3. Muestreos

Se realizaron cuatro muestreos a lo largo de nueve meses, tiempo de duración del experimento. En cada muestreo se tomaron aleatoriamente cuatro plantas por accesión, una por bloque, a las cuales se les midió el diámetro de la base del tallo y el contenido de biomasa.

2.4. Cuantificación y distribución de biomasa de *J. curcas*

La biomasa de las plantas de *J. curcas* se obtuvo sometiéndolas a 80 °C en horno eléctrico hasta peso constante [36]. La biomasa producida durante los nueve meses de plantación se obtuvo a partir de la producida por las plantas en el noveno mes; la producción anual de biomasa se calculó extrapolando a 12 meses la producida en nueve, mientras que la producción por hectárea se obtuvo multiplicando la producción de biomasa de una planta ($t.planta^{-1}.año^{-1}$) por la densidad de siembra de la plantación ($plantas.ha^{-1}$) al inicio de la producción exponencial de biomasa. Se realizó un análisis de varianzas para verificar diferencias significativas de la producción de biomasa entre las 10 accesiones ($\alpha = 0.05$).

La distribución de biomasa en los componentes de la planta se calculó a partir del porcentaje de peso seco que ocuparon el tallo, las ramas y las hojas [36]; los cálculos se hicieron a partir de los valores del grupo representativo de accesiones que resultó de la comparación múltiple de medias previo análisis de varianzas ($\alpha = 0.05$, Tukey).

2.5. Cuantificación de la captura de CO₂ por *J. curcas*

El CO₂ capturado por *J. curcas* se calculó a partir de la ecuación:

$$CO_2 = (B \times 0.5) 3.67 \quad (1)$$

Donde B es la biomasa, 3.67 es la relación entre el peso de la molécula de CO_2 y la de carbono y 0.5 es el Factor de Carbono propuesto por Kollman [37], quien indica que todas las maderas contienen aproximadamente 50% de carbono y que la composición de la madera es similar entre las diferentes especies leñosas así como dentro de un mismo árbol en sus diversas partes.

Si bien el contenido de carbono puede variar entre especies, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático recomienda considerar este porcentaje en caso de no existir datos específicos de la especie.

2.6. Construcción de modelos alométricos para la estimación de biomasa de *J. curcas*

Se construyó un modelo alométrico para cada una de las 10 accesiones de *J. curcas* mediante análisis de regresión lineal simple entre la biomasa aérea (tallos + ramas) como variable dependiente y el diámetro de la base del tallo como variable independiente [23]. Para ello se utilizó el modelo alométrico general de potencia:

$$B = \beta_0 D^{\beta_1} \quad (2)$$

Donde B es la biomasa aérea (g); D es el diámetro del tallo (cm), β_0 y β_1 son los parámetros a calcular [38].

2.6.1. Transformación del modelo de potencia a su forma lineal

Para calcular los parámetros β_0 y β_1 mediante el modelo de regresión lineal simple:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon \quad (3)$$

Donde y es la variable dependiente, x es la variable independiente, β_0 y β_1 son los parámetros a calcular y ϵ es el término del error.

La función de potencia $B = \beta_0 D^{\beta_1}$ se transformó a su forma lineal aplicando logaritmo base 10 a ambas variables [12]; quedando como se muestra en la ecuación 4.

$$\text{Log } B = \text{Log } \beta_0 + \beta_1 \log D + \epsilon \quad (4)$$

Donde $\text{Log } B$ es el logaritmo base 10 de la variable dependiente Biomasa (g); $\text{Log } \beta_0$ es la intersección con la ordenada al origen; β_1 es la pendiente de la recta de regresión y $\text{Log } D$ es el logaritmo base 10 de la variable independiente diámetro de la base del tallo (cm) [12].

2.6.2 Cálculo de los parámetros de los modelos de regresión

Los parámetros β_0 y β_1 de las ecuaciones de regresión de cada una de las 10 accesiones se obtuvieron por el método de mínimos cuadrados [39].

$$\beta_1 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x} \quad (6)$$

Se calcularon, además, los intervalos de confianza (IC) de 95% de cada uno de los parámetros β_1 como una medida de la estabilidad [40].

$$IC \ 95\% = \beta_1 \pm t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2}} \quad (7)$$

Donde x_i y y_i son los valores de las observaciones i de las variables independientes y dependientes respectivamente, \bar{x} y \bar{y} son las medias de ambas variables; S es el error estándar de estimación y $t_{\alpha/2}$ es el área bajo la curva de la distribución t con $(n - 2)$ grados de libertad.

2.6.3. Detección de observaciones atípicas e influyentes

Las observaciones cuyo residual eliminado estudentizado (ree) fueron menores a $-t_{\alpha/2}$ ó mayores a $t_{\alpha/2}$ se consideraron como atípicas y se excluyeron para análisis posteriores. Utilizando un $\alpha=0.05$ y $[(n - 1) - p - 1]$ grados de libertad; donde n es el número de observaciones y p el número de variables independientes [41].

$$ree = \frac{y_i - \hat{y}_i}{S_{y_i - \hat{y}_i}} \quad (8)$$

Los residuales eliminados estudentizados de cada observación se calcularon dividiendo su correspondiente residual ($y_i - \hat{y}_i$) entre su desviación estándar ($S_{y_i - \hat{y}_i}$), en el cual el error estándar (S) fue calculado sin incluir la observación y_i en cuestión.

$$S_{y_i - \hat{y}_i} = S\sqrt{1 - h_i} \quad (9)$$

$$h_i = \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

Donde h_i es la influencia de la observación; x_i y \bar{x} son la observación (i) y la media de la variable independiente respectivamente.

Las observaciones influyentes se detectaron mediante el cálculo de la Distancia de Cook (D_i):

$$D_i = \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{(p-1)s^2} \left[\frac{h_i}{(1-h_i)^2} \right] \quad (11)$$

Observaciones con valores de $D_i > 1$ fueron identificadas como influyentes y se eliminaron de la base de datos [23].

2.6.4. Medida de la bondad de ajuste de las ecuaciones de regresión y de la intensidad de la relación entre las variables

Como medida de la bondad del ajuste de los datos a las ecuaciones de regresión estimadas y de la intensidad de la relación lineal entre la variable dependiente e independiente, se calcularon el coeficiente de determinación (r^2) y el coeficiente de correlación (r) respectivamente [23].

$$r^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (12)$$

$$r = \sqrt{r^2} \quad (13)$$

Donde (y_i) y (\hat{y}_i) son el valor real de la biomasa (g) y el valor estimado (g) por la regresión respectivamente para cada observación; mientras que (\bar{y}) es la media de la biomasa.

2.6.5. Prueba de significancia de la regresión

La significancia de la relación de regresión se midió mediante la prueba F, con $\alpha = 0.05$, un grado de libertad en el numerador y $(n - 2)$ grados de libertad en el denominador [41]. La Hipótesis nula probada fue $H_0: \beta_1 = 0$; no existe relación de regresión significativa entre la variable dependiente biomasa y la independiente diámetro de la base del tallo. Mientras que la Hipótesis alternativa fue $H_a: \beta_1 \neq 0$; las variables de la regresión están relacionadas significativamente [12]. β_1 es la pendiente de la ecuación de regresión.

$$F = \frac{\frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{1}}{\frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}} \quad (14)$$

Donde (y_i) y (\hat{y}_i) son el valor real de la biomasa y el valor estimado por la regresión respectivamente para cada observación; mientras que (\bar{y}) es la media de la biomasa [41].

2.6.6. Comparación de los modelos de regresión

Para determinar si un solo modelo de regresión podría aplicarse para estimar la biomasa de las 10 accesiones de *J. curcas*, se compararon mediante la prueba F ($\alpha = 0.05$), los parámetros β_0 y β_1 ($P \leq 0.05$) obtenidos previamente para cada una de las 10 accesiones. La hipótesis nula que se probó fue $H_0: \beta_0$ y β_1 eran los mismos para todas las accesiones mientras la hipótesis alternativa fue $H_a: \beta_1$ y β_0 eran diferentes entre accesiones [39].

$$F = \frac{\frac{[SCE(MR) - SCE(MC)]}{gLMR - gLMC}}{\frac{SCE(MC)}{gLMC}} \quad (15)$$

$$SCE = \sum(y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (16)$$

Donde SCE es la suma de cuadrados del error; gI son los grados de libertad; MR se refiere a un modelo reducido en el que todas las accesiones se ajustaron a una ecuación de regresión como si fueran una sola; MC es el modelo completo en el cual cada una de las accesiones se ajustó a su propia ecuación [39].

Los parámetros β_0 y β_1 de MC fueron los calculados previamente para cada una de las 10 accesiones; la $SCE(MC)$ se obtuvo sumando la suma de cuadrados del error de cada una de las 10 ecuaciones correspondientes a cada accesión; mientras que $gLMC$ se obtuvo con la ecuación:

$$gLMC = \sum(n_m - 2) \quad (17)$$

Donde n_m es el número de observaciones por accesión.

Los parámetros β_0 y β_1 de MR se calcularon tomando los datos de las 10 accesiones como si fueran una sola mientras que la $SCE(MR)$ fue la correspondiente a esta ecuación única con $(n - 2)$ grados de libertad [39].

El rechazo de H_0 no implica necesariamente que los parámetros β_0 y β_1 fueran diferentes para todas las accesiones. Para explorar la posibilidad de que algunas de ellas se ajustan a un mismo modelo, se graficó el logaritmo de la Biomasa aérea (g) contra el logaritmo base 10 Diámetro de la Base del Tallo (cm) de cada accesión en un mismo plano, para observar la formación de grupos en la tendencia y se aplicó nuevamente la prueba de homogeneidad de parámetros entre y dentro de los grupos formados para verificar el ajuste a un mismo modelo grupal [39]. Los modelos finales resultantes fueron sometidos a los análisis que se enlistan a continuación.

2.6.7. Medida del desempeño predictivo de los modelos

Se calculó el error medio relativo porcentual (EMR%)

$$EMR\% = \frac{\sum\left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right) \times 100}{n} \quad (18)$$

$$IC(EMR\%) = (EMR\%) \pm t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (19)$$

y el error estándar relativo porcentual de estimación (S%) de los modelos

$$S\% = \sqrt{\frac{\sum\left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right)^2}{n-2}} \times 100 \quad (20)$$

$$IC (S\%) = \sqrt{\frac{(n-2)S^2}{X_{\alpha/2}^2}} \leq S\% \leq \sqrt{\frac{(n-2)S^2}{X_{1-\alpha/2}^2}} \quad (21)$$

con sus correspondientes intervalos de confianza (IC) de 95%, como una medida del sesgo y de la imprecisión respectivamente [35].

Donde n es el número de pares de datos; y_i y \hat{y}_i son el valor real de la biomasa (g) y el valor estimado (g) de la observación i ; S es el error estándar de estimación; t y χ^2 es el área bajo la curva de la distribución t y Chi cuadrada respectivamente con $(n - 2)$ grados de libertad y $\alpha = 0.05$.

2.6.8. Análisis residual: confirmación de las suposiciones del modelo de regresión lineal simple

Se verificó el cumplimiento de los supuestos de linealidad, homocedasticidad y normalidad de los modelos mediante el análisis de tres gráficos de residuales, es decir, la diferencia entre el valor real de biomasa y el valor estimado por el modelo [40].

2.6.8.1. Prueba de linealidad

Se graficaron los valores del logaritmo base 10 del Diámetro de la Base del tallo (cm) en el eje horizontal contra los residuales del modelo correspondiente en el eje vertical. Si el modelo cumple con el supuesto, el aspecto general de la gráfica será el de una banda horizontal de puntos [40].

2.6.8.2. Prueba de homocedasticidad

Los valores del logaritmo de la biomasa (g) pronosticados por el modelo se graficaron en el eje horizontal contra los correspondientes residuales en el eje vertical. Si se cumple con el supuesto de homocedasticidad, el aspecto de esta gráfica también será la de una banda horizontal de puntos [40].

2.6.8.3. Prueba de normalidad

Los valores del logaritmo de la variable independiente Diámetro de la Base del Tallo (cm) se graficaron en el eje horizontal contra los correspondientes residuales estandarizados

(RE) en el eje vertical. Si el modelo cumple con el supuesto de normalidad, el 95% de los residuales estandarizados estarán entre los valores de -2 y +2 de la gráfica [41].

$$RE = \frac{y_i - \hat{y}_i}{s_{y_i - \hat{y}_i}} \quad (22)$$

Donde (y_i) y (\hat{y}_i) son el valor real de la biomasa (g) y el valor estimado (g) por la recta de regresión respectivamente para cada observación; $(y_i - \hat{y}_i)$ es el residual de la observación i ; $(S_{y_i - \hat{y}_i})$ es la desviación estándar de la observación i ; (S) es el error estándar del modelo en cuestión y h_i es la influencia de la observación i ; x_i y \bar{x} son la observación (i) y la media de la variable independiente respectivamente.

2.7. Caracterización fenotípica de las 10 accesiones de *J. curcas*

Se midieron 19 características agromorfológicas a las 10 accesiones de *J. curcas*; 15 de ellas morfológicas y cuatro agronómicas. Las 19 variables agromorfológicas fueron sometidas a un análisis de componentes principales (ACP) para la reducción de las variables a un número de índices no correlacionados y así identificar las principales características agromorfológicas que contribuyen a la explicación de la mayor varianza entre las accesiones. Para ello se calcularon los autovalores y autovectores, los autovectores son los pesos en una transformación lineal al calcular las puntuaciones de los componentes principales mientras que los autovalores indican la cantidad de varianza explicada por cada componente principal. Con los dos primeros componentes principales se generó una representación bidimensional de las 10 accesiones para identificar similitudes entre ellas [42, 43]. El análisis se realizó con el Software InfoStat, versión 2008 (Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina).

Se calculó además, con las mismas 19 variables agromorfológicas, el coeficiente de disimilitud (Distancia Euclidiana) y con este coeficiente se construyó un dendograma empleando el método de grupos de pares no ponderados con media aritmética UPGMA, para representar las relaciones entre las accesiones con base en sus características agromorfológicas [43]. Este procedimiento se realizó con el mismo Software utilizado para el ACP.

Las 15 características morfológicas evaluadas fueron: la altura de la planta desde la superficie del suelo hasta el ápice (m); la biomasa aérea (g), el diámetro de la base del tallo (cm), el cual se calculó dividiendo su circunferencia entre la constante π [10]; el número de ramas; la longitud de las ramas (cm); el número de hojas; el volumen de la madera (cm³), el cual se obtuvo con la ecuación 23 [38]; la densidad de la madera (g/cm³), se calculó dividiendo el valor de su peso seco (g) entre su volumen fresco (cm³) [36]; el diámetro (cm), la longitud (cm) y el grosor (cm) de frutos; el ancho (cm); el grosor (cm), la longitud (cm) y el volumen (cm³) de las semillas [44, 45].

$$V = \left[\frac{\pi}{4} \right] \left[\frac{(D_m)^2 + (D_M)^2}{2} \right] [L] \quad (23)$$

Donde V es el volumen (cm³); L, D_m y D_M son la longitud (cm) y los diámetros (cm) inferior y superior de las ramas, respectivamente mientras que π es la constante con valor de 3.1416. El volumen de la madera de una planta se obtuvo sumando el volumen de sus ramas y del tallo.

Las cuatro variables agronómicas evaluadas fueron el número y peso de semillas por planta (g); la biomasa (g), el contenido de aceite de las semillas (%) y el peso de 100 semillas (g) [46]. El aceite de las semillas se obtuvo por extracción con solvente; para lo cual se emplearon aproximadamente 20 g de semillas secas sin testa y 150 mL de hexano el cual se dejó en recirculación durante 8 h a 60 °C en un equipo Soxhlet. El hexano se recuperó con un evaporador rotatorio a 38 °C mientras que los residuos de éste se eliminaron calentando las muestras de aceite a 80 °C durante una hora en agitación. El contenido de aceite se obtuvo calculando el porcentaje en peso de aceite respecto al peso de la muestra de semilla utilizada [47].

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Establecimiento de la plantación experimental de *J. curcas*

El porcentaje de sobrevivencia de las estacas no fue el mismo entre las 10 accesiones de *J. curcas*. Las accesiones A, B, C, D, E y H tuvieron 100% de sobrevivencia; las accesiones I, J y F presentaron 79.2, 75 y 66.7% respectivamente, mientras que la accesión G fue la que tuvo el menor porcentaje con 58.3%. El porcentaje total de sobrevivencia de la plantación fue de 87.9% con 29 estacas muertas de las 240 sembradas (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Sobrevivencia de las estacas de 10 accesiones de *J. curcas* plantadas en la parcela experimental.

Accesión	Estacas sembradas	Estacas enraizadas	Estacas muertas	Sobrevivencia (%)
A	24	24	0	100
B	24	24	0	100
C	24	24	0	100
D	24	24	0	100
E	24	24	0	100
F	24	16	8	66.7
G	24	14	10	58.3
H	24	24	0	100
I	24	19	5	79.2
J	24	18	6	75

Estos resultados sugieren que las accesiones A, B, C, D, E y H son más competitivas en campo, probablemente debido a sus atributos genéticos intrínsecos, es decir, debido a su genotipo, puesto que todas las accesiones estuvieron sometidas a las mismas condiciones ambientales en la parcela experimental. Por el contrario, las accesiones I, J, F y G en orden descendente, resultaron ser menos competitivas.

Aunque la longitud y los diámetros de las estacas plantadas no fueron los mismos para las 10 accesiones de *J. curcas*, lo cual podría influir en la sobrevivencia debido a que entre mayor es el volumen de las estacas mayor es el reservorio de energía contenido en ellas; se han reportado trabajos que demuestran que estas variables no tienen efecto en el porcentaje de sobrevivencia. Enciso y Castillo [48] evaluaron el efecto de diferentes longitudes de estacas (20, 25, 30, 35 y 40 cm) en la propagación vegetativa de *J. curcas*, encontrando que ésta no tuvo efecto significativo en el porcentaje de sobrevivencia de las estacas. Por otra parte Moreno y Guerrero [49] evaluaron el efecto del diámetro de las estacas de *Trichantera gigantea* en el porcentaje de sobrevivencia, reportando nulo efecto de esta variable. Estos reportes refuerzan la hipótesis de que es el genotipo del material vegetal el que lo hace más o menos competitivo bajo ciertas condiciones ambientales.

3.2. Producción de aceite de las accesiones de *J. curcas*

El contenido de aceite de las semillas de las 10 accesiones de *J. curcas* estuvo en el rango de 36.01-45.38% del peso seco del endospermo de las semillas. La accesión G fue la que presentó el menor porcentaje mientras que el mayor se obtuvo de la accesión F (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Contenido de aceite de las semillas (%) de 10 accesiones de *J. curcas*.

Accesión	n	Medias
G	3	36.01 a
I	3	36.74 ab
J	3	37.88 abc
B	3	38.58 abcd
H	3	40.77 bcde
A	3	41.12 bcdef
D	3	42.18 cdef
C	3	42.50 def
E	3	43.96 ef
F	3	45.38 f

Medias con una letra común no son significativamente diferentes, Tukey ($\alpha = 0.05$).

Estos valores están en el intervalo de lo reportado para *J. curcas* en trabajos previos (30-60%) cultivadas tanto en Asia y África [8, 9, 46, 50, 51, 52] así como en Mesoamérica [53, 54, 55].

De acuerdo a Escobar *et al.* [56] y Mishra [57] la considerable variación en el contenido de aceite de esta especie puede ser generada por factores genéticos y ambientales tales como precipitación y fertilidad de suelos. Así mismo, Heller [58] reportó que la variabilidad en el contenido de aceite de las semillas de *J. curcas* podría ser influenciada por el origen de las accesiones estudiadas y las interacciones genotipo-ambiente. En este estudio, como se ha mencionado anteriormente, todas las accesiones fueron cultivadas en una misma localidad bajo las mismas condiciones, por lo que se puede inferir que las diferencias en el contenido de aceite tienen su origen en factores genéticos.

3.3. Producción de biomasa y captura de carbono de *J. curcas*

La biomasa aérea producida por las accesiones de *J. curcas* estuvo en el intervalo de 406–1544 g.planta⁻¹. La menor cantidad fue de 406 g.planta⁻¹ producida por la accesión I mientras que la mayor fue de 1544 g.planta⁻¹ producida por la accesión E (Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Producción de biomasa aérea (g) de 10 accesiones de *J. curcas* durante nueve meses.

Accesión	Medias
I	406.00 a
F	415.50 a
J	471.50 a
H	667.50 a
G	727.50 a
D	822.50 ab
B	951.00 ab
C	1106.00 ab
A	1119.50 ab
E	1544.00 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes, Tukey ($\alpha = 0.05$).

La biomasa aérea producida no fue la misma entre las 10 accesiones ($P < 0.05$). La comparación múltiple de medias formó tres grupos (a, b y ab). Debido a que el grupo “ab” es igual tanto a “a” como a “b”, los cálculos de biomasa y carbono se hicieron a partir del promedio de las accesiones A, B, C y D por ser representativas de las 10 evaluadas.

La cantidad promedio de biomasa aérea producida por *J. curcas* en nueve meses fue de 1 kg.planta⁻¹ (1.709 t.ha⁻¹). Extrapolando a un año, *J. curcas* produciría 1.33 kg.planta⁻¹ mientras que la producción anual por unidad de superficie ascendería a 2.27 t.ha⁻¹.año⁻¹ con una densidad de siembra de 1709 plantas.ha⁻¹ (Tabla 3.4).

Basado en la producción de biomasa, el factor de carbono de 0.5, la relación del peso molecular CO₂/C de 3.67 y la densidad de siembra; *J. curcas* capturó en promedio, en nueve meses, 0.5 kg.C.planta⁻¹ (0.85 t.ha⁻¹) y 1.83 kg.CO₂.planta⁻¹ (3.13 t.ha⁻¹). Extrapolado a un año, el potencial de captura de C y CO₂ de *J. curcas* es de 0.66 y 2.43 kg.planta⁻¹.año⁻¹ mientras que por unidad de superficie el potencial de captura asciende a 1.13 t.C.ha⁻¹.año⁻¹ y 4.15 t. CO₂.ha⁻¹.año⁻¹ (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Producción de biomasa y captura de carbono y CO₂ de *J. curcas* con una densidad de siembra de 1709 plantas.ha⁻¹.

	9 meses		Extrapolado a 1 año	
	Kg.planta ⁻¹	t.ha ⁻¹	Kg.planta ⁻¹	t.ha ⁻¹
Biomasa	1.00	1.71	1.33	2.27
Carbono	0.50	0.85	0.66	1.13
CO ₂	1.83	3.13	2.43	4.15

Se han reportado trabajos previos a cerca de la producción de biomasa y captura de carbono por parte de *J. curcas*. Firdaus *et al.* [59] encontraron una producción de biomasa aérea de 2.05 t.ha⁻¹; 2.46 t.ha⁻¹.año⁻¹ equivalente a 4.5 t.CO₂.ha⁻¹ t.ha⁻¹.año⁻¹ en plantas de *J. curcas* de 10 meses de edad plantadas en el Estado de Selangor, Malasia, a distancias de 2 x 3 m y densidad de siembra de 1667 plantas.ha⁻¹. Esta producción es 17.4% mayor a las del presente trabajo considerando que la edad de las plantas es muy similar entre ambos reportes.

Por otra parte, Firdaus y Husni [60] reportaron, en plantas de un año de edad, una producción promedio de biomasa aérea de 1.64 t.ha^{-1} equivalente a $3.0 \text{ t.CO}_2\text{.ha}^{-1}$. El estudio se desarrolló en el Estado de Port Dickson, Malasia con una distancia de siembra de $3 \times 3 \text{ m}$ y densidad de siembra de $1100 \text{ plantas.ha}^{-1}$. La producción de biomasa de las accesiones evaluadas en el presente trabajo fue 27.7% mayor para a los de Firadus y Husni [60] el mismo periodo de tiempo.

Wani *et al.* [45] reportaron producción de biomasa de *J. curcas* similares a los del presente trabajo (6.1% inferior) ya que plantas de cuatro años de edad produjeron en promedio $2.13 \text{ t.ha}^{-1}\text{.año}^{-1}$, lo que equivale a $3.88 \text{ t.CO}_2\text{.ha}^{-1}\text{.año}^{-1}$ en el Estado de Andhra Pradesh al sur de India con una densidad de plantación de $1667 \text{ plantas.ha}^{-1}$ a distancias de $2 \times 3 \text{ m}$.

La discrepancia en la producción de biomasa reportada para *J. curcas* podría deberse tanto a las diferencias de genotipo de las accesiones como de las características ambientales de los sitios de estudio, tales como temperatura, humedad, características del suelo incluyendo la fertilidad y disponibilidad de agua así como a las prácticas agronómicas a las que fueron sujetas las plantaciones tales como poda, fertilización y control de enfermedades. Estas diferencias sugieren que la cuantificación de la producción de biomasa tiene que ser realizada para cada sitio específico [60].

El efecto del ambiente y la interacción de variables ambientales sobre la producción de biomasa están ampliamente documentados. Para el caso específico de *J. curcas*, Albuquerque *et al.* [61] reportaron que la acumulación de biomasa en tallos, hojas y raíces de esta especie fue dependiente de la interacción entre el agua y el nitrógeno, que el crecimiento de todas las partes de la planta fue favorecido por el tratamiento con nitrógeno y que bajo deficiencia de éste las plantas no incrementaron su crecimiento aunque hubiese disponibilidad de agua.

La distancia de siembra del presente estudio fue diferente a la de los trabajos citados y podría influir en la producción de biomasa por la competencia de recursos entre las plantas, sin embargo, Behera *et al.* [1] evaluaron el efecto de dos distancias de siembra ($2 \times 2 \text{ m}$ y $3 \times 3 \text{ m}$) sobre algunas variables de crecimiento de *J. curcas*, encontrando que la distancia de siembra no tuvo efecto significativo ($P > 0.05$) en el incremento anual de la

altura de las plantas, el diámetro de la base del tallo, el número total de ramas y el tamaño de la copa del árbol, en contraparte, sí encontraron efecto significativo de la irrigación, la fertilización y poda sobre estas mismas variables.

Considerando que el principal potencial de aprovechamiento de *J. curcas* es el aceite de sus semillas para la producción de biocombustibles, su cultivo, preferentemente en suelos marginales, también serviría desde el punto de vista de los servicios ambientales para un doble propósito tanto para la captura de carbono como para el incremento de carbono orgánico en el suelo debido a que es una planta caducifolia, lo cual jugaría un papel crucial en el mejoramiento de la calidad del suelo y de la disponibilidad de nutrientes para las plantas [62]. Además, si se incrementan las áreas de cultivo, estos créditos de carbono pueden ser objeto de comercio con otros países y servir como fuente de ingresos [63].

3.4. Distribución de biomasa de *J. curcas*

La mayor proporción de biomasa de *J. curcas* estuvo en las hojas, 135 días después de la siembra de las estacas, seguido de los tallos y por último las ramas con 40.1, 32.5 y 27.4% respectivamente. A los 200 días la proporción mayor fue de 41.9% para las ramas, seguido de los tallos con 33.7% y finalmente las hojas con 24.4%. A los 270 días de establecimiento esta última proporción se mantuvo pero en diferente magnitud, las ramas ocuparon el 58.9%, los tallos el 39.2% y las hojas el 1.8% (Figura 3.1).

Hubo tendencias claras en la distribución de la biomasa a medida que incrementó la edad de las plantas. El porcentaje de biomasa de los tallos incrementó con el tiempo de establecimiento pasando de 32.5% a los cuatro meses a 33.7% a los seis y 39.2% a los nueve. De la misma manera, las ramas también incrementaron su proporción con el tiempo pero en mayor magnitud que los tallos ocupando el 27.3, 41.9 y 58.9% a los cuatro, seis y nueve meses respectivamente. Por el contrario, la proporción de biomasa de las hojas fue disminuyendo drásticamente con el tiempo, pasando de 40.1% a los cuatro meses a 24.3 y 1.8% a los seis y ocho meses respectivamente (Figura 3.1).

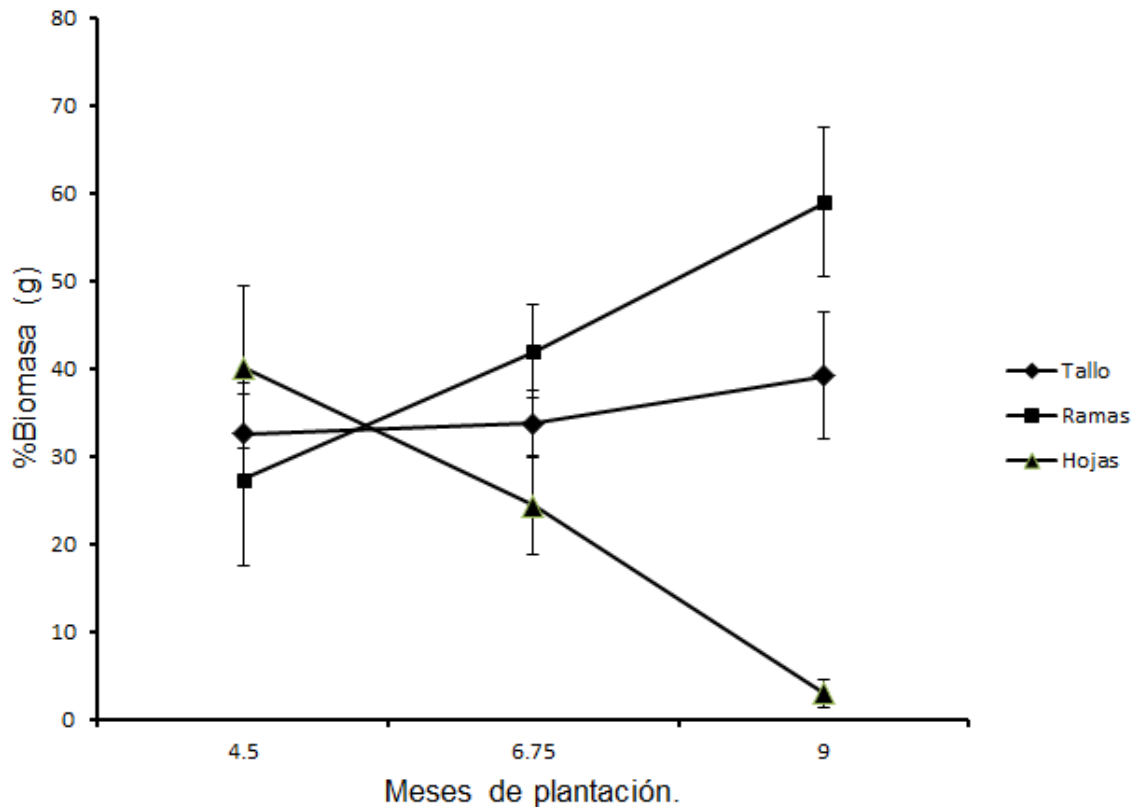


Figura 3.1. Distribución de la biomasa en los tallos, ramas y hojas de las accesiones B y D de *J. curcas* como representativas de todas las accesiones.

La mayor distribución de biomasa hacia las hojas respecto a los tallos y las ramas en los primeros meses de edad de las plantas, así como su disminución con el paso del tiempo, está estrechamente relacionada con la disponibilidad de agua, puesto que a inicios de octubre era temporada de lluvias en la región. Al respecto Albuquerque *et al.* [61] indican que con disponibilidad de agua *J. curcas* distribuye una mayor proporción de biomasa hacia las hojas que hacia los tallos y las ramas, mientras que bajo condiciones de estrés por sequía pierde las hojas e incrementa el crecimiento de sus tallos y ramas como estrategia de respuesta, ya que de esa manera evita la pérdida excesiva de agua por la transpiración de las hojas durante la fotosíntesis mientras conserva una parte importante de biomasa y agua en los tallos y las ramas.

Por lo tanto, *J. curcas* y en general las plantas caducifolias destinan una mayor proporción de biomasa hacia sus hojas en la temporada en que hay agua disponible para tener una mayor área foliar y poder satisfacer sus necesidades energéticas mediante los

fotosintatos ya que bajo condiciones de sequía la tasa fotosintética se reduce drásticamente debido a la falta de hojas [64].

Lo anterior se refuerza tomando en cuenta que la caída drástica de biomasa foliar, prácticamente a cero, se produjo entre inicios de diciembre y febrero; de acuerdo a Wani *et al.*, [45] la pérdida de las hojas de *J. curcas* inicia a partir de diciembre, cuando la humedad del suelo comienza a disminuir, y las pierde totalmente en enero.

3.5. Construcción de modelos alométricos para la estimación de biomasa de 10 accesiones de *J. curcas*

3.5.1. Características dasométricas de las accesiones de *J. curcas*

La edad de las plantas utilizadas para la cuantificación de biomasa aérea y la medición del diámetro de la base del tallo estuvo en el intervalo de 2 - 9 meses. Los valores promedio del diámetro de la base del tallo (cm) estuvieron en el rango de 3.56 - 5.2 cm, siendo la accesión J la que tuvo el menor valor y la accesión E la que presentó el mayor de éstos (Tabla 3.5).

Tabla 3.5. Dimensiones de las plantas (2 - 9 meses de edad) de 10 accesiones de *J. curcas* utilizadas para la construcción de ecuaciones alométricas.

Accesión	n	Diámetro de la Base del Tallo (cm)			Biomasa Aérea (g)		
		Mínimo	Máximo	Media	Mínimo	Máximo	Media
A	16	2.10	7.31	4.67	32.30	1688	550.64
B	16	1.88	6.32	4.15	25.60	1218	469.83
C	14	2.04	6.67	4.53	28.80	1486	558.86
D	15	2.32	6.83	4.44	30.90	1526	444.44
E	14	2.23	7.79	5.20	31.30	1742	749.64
F	16	2.07	5.43	3.73	26.30	596	223.33
G	13	1.81	6.29	3.58	18.00	1034	274.02
H	15	1.59	6.39	4.03	12.30	1240	402.83
I	16	1.75	6.14	3.77	14.00	1056	287.21
J	14	1.78	5.72	3.56	30.10	636	213.91

Del total de las muestras, el valor mínimo fue de 1.59 cm, mientras el máximo fue 7.79 cm. Los valores promedio de la biomasa aérea estuvieron en el intervalo de 213.9 – 749 g, siendo la accesión J la que tuvo el menor valor y la E el mayor. El mínimo valor de biomasa entre todas las accesiones fue de 12.3 g y el máximo de 1742 g (Tabla 3.5).

3.5.2. Relación entre la biomasa aérea y el diámetro de la base del tallo de 10 accesiones de *J. curcas*

Los gráficos de dispersión de la biomasa aérea (g) contra el diámetro de la base del tallo para las 10 accesiones de *J. curcas* así como para el modelo reducido (todas las accesiones como si fueran una sola) mostraron que la relación entre ambas variables es de tipo potencial (Figura 3.2). Esto es un indicativo de que el modelo alométrico general $B = \beta_0 D^{\beta_1}$ que relaciona la biomasa con el diámetro del tallo, puede ser aplicado para la construcción de modelos para la estimación de biomasa de *J. curcas*.

La transformación con logaritmos de ambas variables linealizó esa relación originalmente de tipo potencial (Figura 3.3). De esta manera es posible aplicar el análisis de regresión lineal simple para el cálculo de los parámetros de las ecuaciones de regresión por el método estándar de mínimos cuadrados.

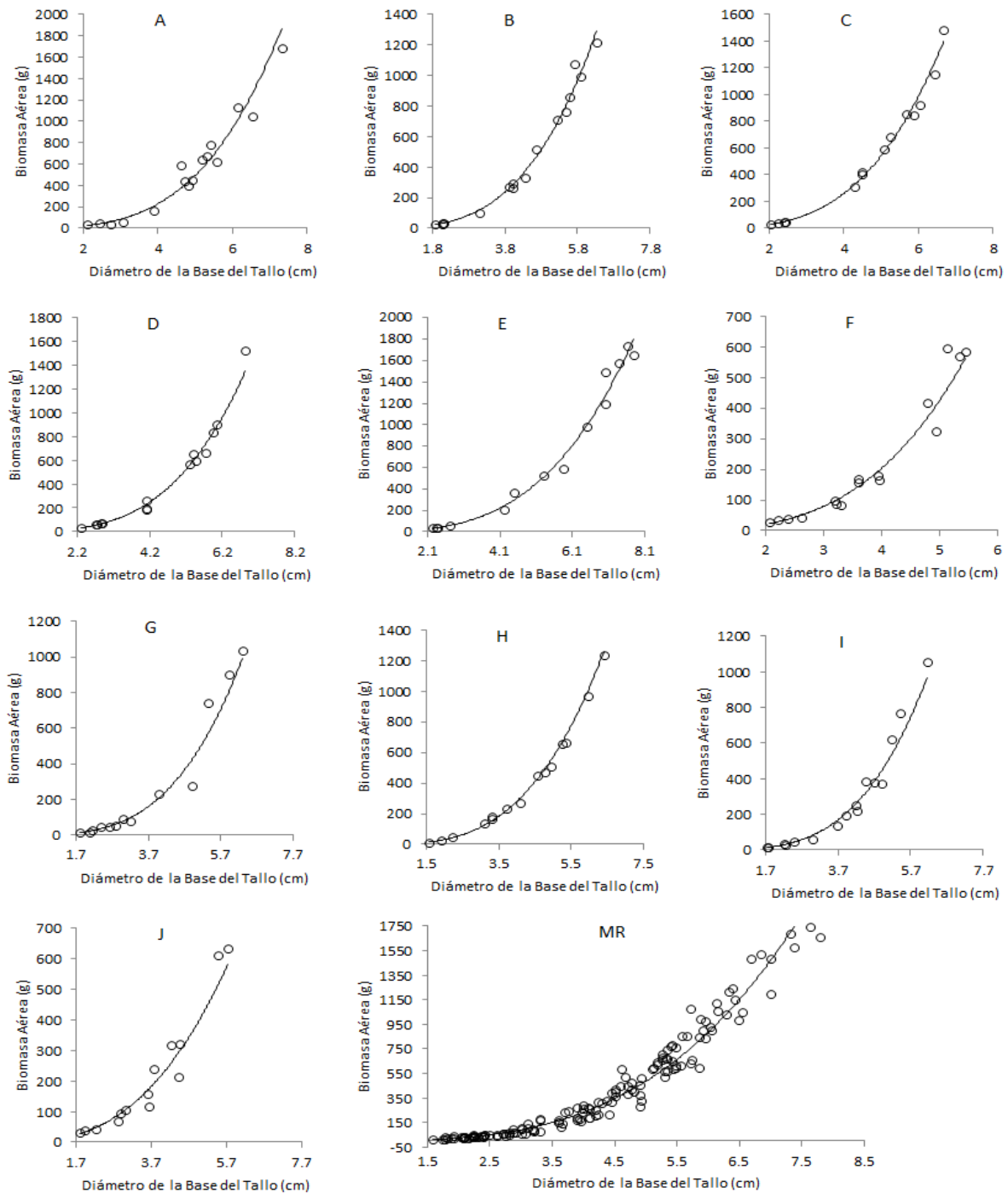


Figura 3.2. Relación entre la Biomasa Aérea (g) y el Diámetro de la Base del Tallo (cm) de 10 accesiones de *J. curcas* y el modelo reducido (MR), en plantas de 2-9 meses de edad. n = 16, 16, 14, 15, 14, 16, 13, 15, 16, 14 y 149, para A, B, C, D, E, F, G, H, I, J y MR, respectivamente.

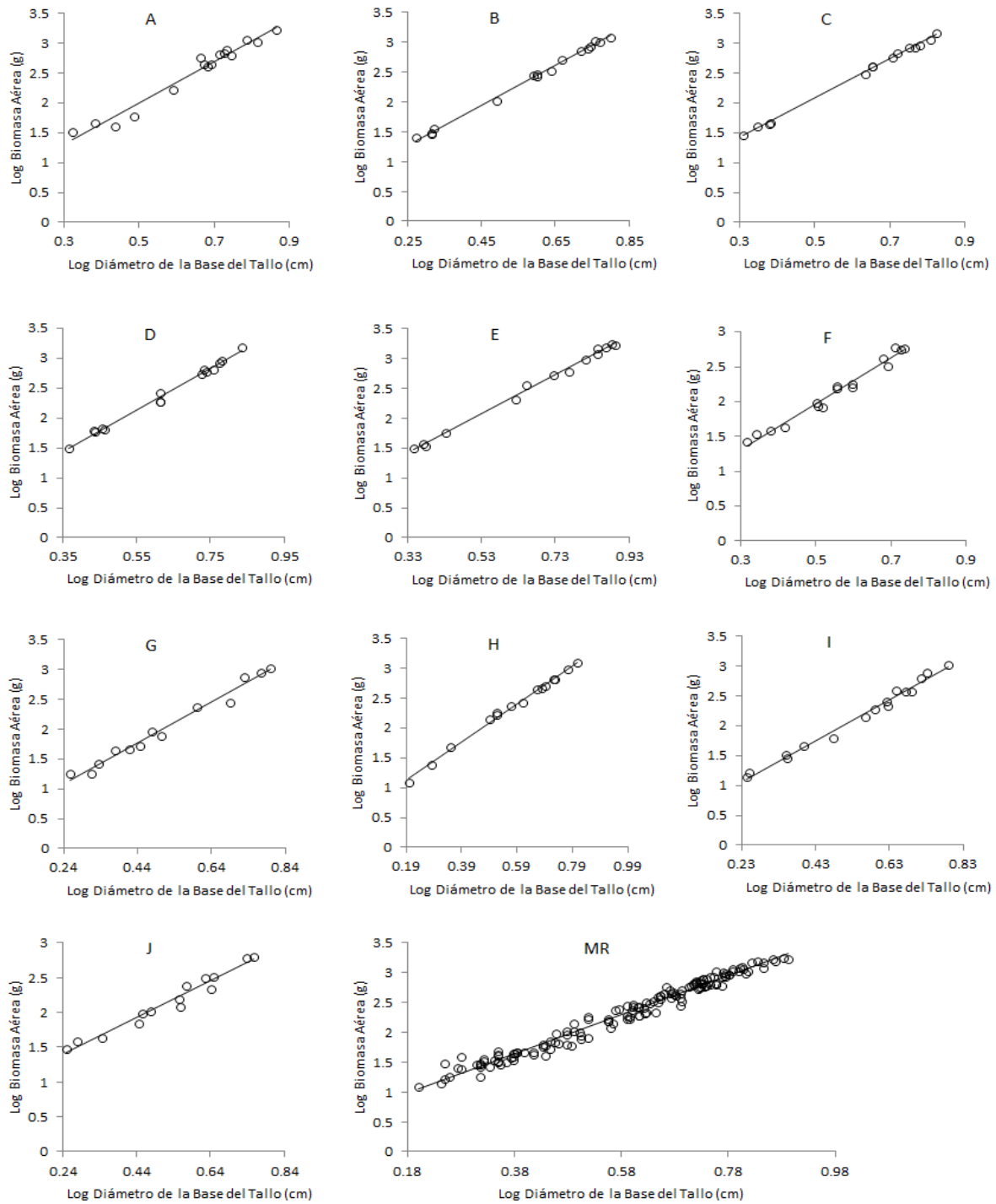


Figura 3.3. Relación entre la Biomasa Aérea (g) y el Diámetro de la Base del Tallo (cm) de *J. curcas*, transformados con logaritmos, de 10 accesiones y el modelo reducido (MR), en plantas de 2-9 meses de edad. $n = 16, 16, 14, 15, 14, 16, 13, 15, 16, 14$ y 149, para A, B, C, D, E, F, G, H, I, J y MR, respectivamente.

3.5.3. Parámetros de las ecuaciones de regresión de 10 accesiones de *J. curcas*

Los parámetros β_1 de las 10 ecuaciones de regresión estuvieron en el intervalo de 2.65 a 3.49. Nueve de ellos tuvieron valores superiores a 3 mientras que el restante, correspondiente a la accesión J, tuvo un valor de 2.65 (Tabla 3.6). Las relaciones de regresión fueron estadísticamente significativas ($P < 0.05$) para las 10 accesiones y el coeficiente de determinación R^2 fue mayor a 0.96 para todos los casos.

Tabla 3.6. Parámetros calculados del análisis de regresión entre la Biomasa Aérea (g) y el Diámetro de la Base del Tallo (cm) mediante el modelo $\text{Log } B = \beta_1 \text{ Log } D + \text{Log } \beta_0$ para 10 accesiones de *J. curcas*, significancia ($\alpha = 0.05$) y ajuste.

Accesión	n	Parámetros		P	R^2	β_0	Ecuación corregida
		Log β_0	β_1				
A	16	0.2538	3.4926	< 0.001	0.967	1.7939	$B = 1.7939D^{3.4926}$
B	16	0.4389	3.3360	< 0.001	0.996	2.7472	$B = 2.7472D^{3.336}$
C	14	0.4302	3.2951	< 0.001	0.997	2.6929	$B = 2.6929D^{3.2951}$
D	15	0.2319	3.4722	< 0.001	0.993	1.7056	$B = 1.7056D^{3.4722}$
E	14	0.3364	3.2748	< 0.001	0.996	2.1699	$B = 2.1699D^{3.2748}$
F	16	0.3251	3.2993	< 0.001	0.977	2.1140	$B = 2.114D^{3.2993}$
G	13	0.2701	3.4131	< 0.001	0.979	1.8623	$B = 1.8623D^{3.4131}$
H	15	0.521	3.2020	< 0.001	0.995	3.3186	$B = 3.3186D^{3.202}$
I	16	0.2802	3.4293	< 0.001	0.988	1.9063	$B = 1.9063D^{3.4293}$
J	14	0.7557	2.6513	< 0.001	0.960	5.6972	$B = 5.6972D^{2.6513}$
MR	149	0.3868	3.2905	< 0.001	0.976	2.4365	$B = 2.4365D^{3.2905}$

3.5.4. Comparación de los parámetros de regresión

La prueba de homogeneidad de los parámetros de regresión entre los 10 modelos arrojó que el valor calculado de F fue mayor al de la tabla de distribución F (Tabla 3.7). Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula de igualdad de parámetros ($P < 0.05$) lo que significa que los parámetros de las 10 accesiones no son todos iguales y que no es posible ajustarlas a un solo modelo de regresión como si fueran una sola accesión.

Este resultado se debe a que aunque los parámetros β_1 de 9 de las 10 ecuaciones de regresión fueron muy similares entre sí, a excepción de la J, la varianza resultante de unir las 10 accesiones como si fueran una, es mayor a la varianza resultante de la suma de cada una de las 10 rectas de regresión. Si la varianza hubiera sido la misma, un solo modelo habría sido suficiente para las 10 accesiones. Esto significa que la relación existente entre la biomasa aérea y el diámetro de la base del tallo no es la misma para las 10 accesiones.

Tabla 3.7. Resultado de la prueba de homogeneidad de parámetros entre el Modelo Reducido (MR) y el Modelo Completo (MC). H_0 : β_0 y β_1 son los mismos para todas las accesiones.

	SCE	gl	F_0		F_T
MR	1.20824691	147	7.278	>	1.691
MC	0.59945844	129			

F_0 = Valor calculado de F; F_T = Valor de F en la Tabla de distribución F con glMR - glMC en el numerador y glMC en el denominador. $\alpha = 0.05$.

3.5.5. Agrupamiento de accesiones con tendencias similares en su relación entre la biomasa aérea y el diámetro de la base del tallo

Mediante el gráfico de tendencias entre la biomasa aérea y el diámetro de la base del tallo en su forma lineal se pudo observar la formación de dos grupos de accesiones con tendencias similares, uno conformado por las accesiones A, D, E, F, G e I y otro por las accesiones B, C y H; mientras que la accesión J se encontraba en ambos grupos, en el segundo cuando los diámetros del tallo eran pequeños y en el primero a medida que estos aumentaban (Figura 3.4).

Como se observa en el gráfico, las accesiones que conforman cada grupo, tienen pendientes e intersecciones muy similares, por lo tanto, las accesiones A, D, E, F, G e I podrían ajustarse a un mismo modelo como si fueran una sola, lo mismo ocurre con las accesiones B, C y H, mientras que la accesión J debe ajustarse al modelo específico con los parámetros calculados para ella (Tabla 3.6).

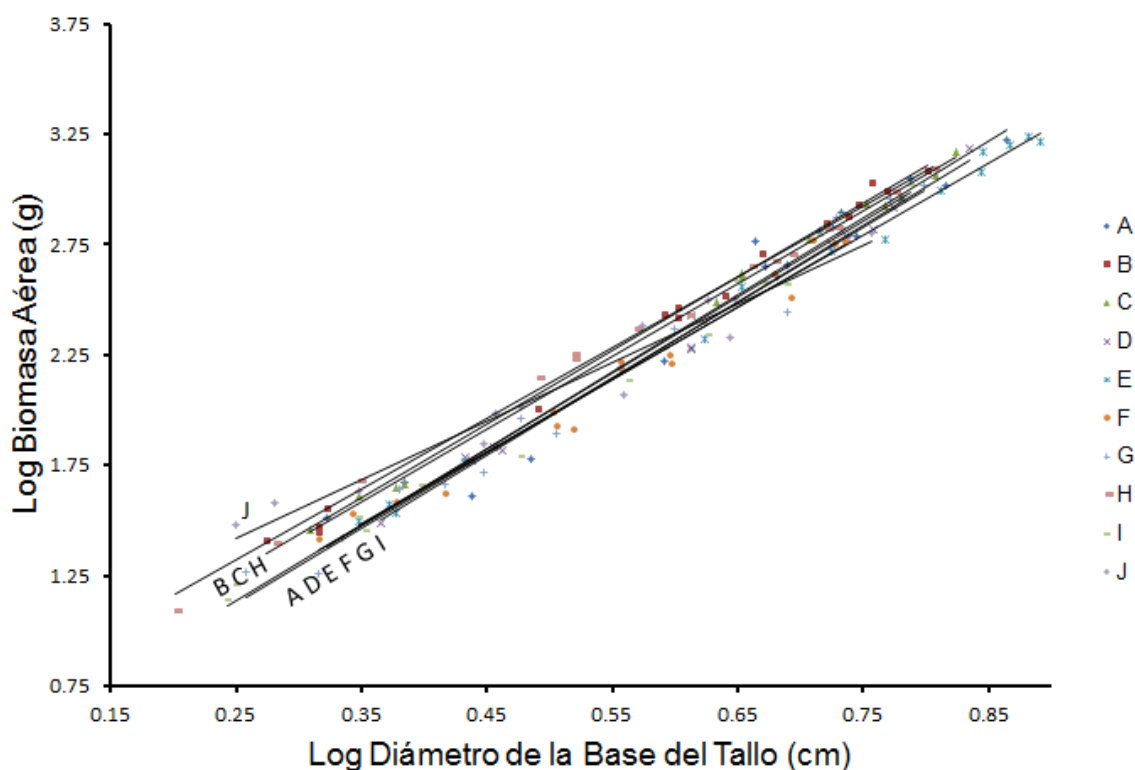


Figura 3.4. Relación entre el Logaritmo de la Biomasa Aérea (g) y el del Diámetro de la Base del Tallo (cm) de 10 accesiones de *J. curcas*. n = 16, 16, 14, 15, 14, 16, 13, 15, 16 y 14, para A, B, C, D, E, F, G, H, I y J, respectivamente.

3.5.6. Parámetros de regresión de accesiones agrupadas

En la Tabla 3.8 se pueden apreciar los parámetros de regresión calculados para los grupos de accesiones (ADEFGI) y (BCH), como si las accesiones que conforman cada grupo tuvieran un solo modelo. Las relaciones de regresión entre la variable dependiente biomasa aérea (g) y el diámetro de la base del tallo (cm) en su forma lineal, fueron estadísticamente significativas ($P < 0.05$) para ambos grupos y el ajuste de los datos a sus respectivas rectas de regresión fue alto en ambos casos, los coeficientes de determinación R^2 fueron de 0.98 y 0.99 para (ADEFGI) y (BCH) respectivamente (Tabla 3.8).

Tabla 3.8. Parámetros calculados del análisis de regresión entre la Biomasa Aérea (cm) y el Diámetro de la Base del Tallo (cm) mediante el modelo $\text{Log } B = \beta_1 \text{ Log } D + \text{Log } \beta_0$ para los grupos de accesiones (ADEFGI), (BCH) y la accesión J de *J. curcas*, significancia ($\alpha = 0.05$) y ajuste.

Modelo	n	Parámetros		P	R ²	β_0	Ecuación corregida
		Log β_0	β_1				
ADEFGI	90	0.2880	3.3893	< 0.001	0.9843	1.9407	$B = 1.9407D^{3.3893}$
BCH	45	0.4697	3.2691	< 0.001	0.9951	2.949	$B = 2.9490D^{3.2691}$
J	12	0.7557	2.6513	< 0.001	0.9602	5.6972	$B = 5.6972D^{2.6513}$

3.5.7. Comparación de parámetros de regresión entre y dentro de grupos de accesiones

La prueba de homogeneidad de parámetros entre los grupos (ADEFGI), (BCH) y J para verificar si eran diferentes entre sí, arrojó que los valores de F_0 fueron mayores a los de F_T en los tres casos (Tabla 3.9). Por lo tanto, se rechazó la hipótesis nula de igualdad de parámetros ($P < 0.05$); esto significa que los tres modelos son diferentes entre sí.

Tabla 3.9. Resultado de la prueba de homogeneidad de parámetros entre los modelos (ADEFGI), (BCH) y J así como dentro de los dos primeros grupos. H_0 : β_0 y β_1 son los mismos entre y dentro de los modelos ADEFGI, BCH y J.

Grupo	F_0		F_T
ADEFGI vs BCH vs J	29.01	>	2.46
J vs ADEFGI	18.79	>	3.09
J vs BCH	20.04	>	3.18
Dentro de ADEFGI	0.90	<	1.95
Dentro de BCH	2.60	<	2.70

F_0 = Valor calculado de F; F_T = Valor de F en la Tabla de distribución F con glMR - glMC en el numerador y glMC en el denominador. $\alpha = 0.05$.

Por otro lado, la prueba de homogeneidad de parámetros dentro del grupo (ADEFGI) arrojó un valor de F_0 (0.9) menor al de F_T (1.95), por lo tanto, no se rechazó la hipótesis nula de igualdad de parámetros ($P > 0.05$) dentro de este grupo. Esto significa que los parámetros de regresión de las accesiones A, D, E, F, G e I son iguales entre sí por lo que pueden ajustarse a un mismo modelo de regresión como si fueran una sola. De igual manera, F_0 fue menor a F_T dentro del grupo (BCH), por lo tanto, estas accesiones tienen parámetros de regresión iguales y pueden ajustarse las tres accesiones a un mismo

modelo de regresión, mientras que la accesión J no se agrupó con otras accesiones, por lo que debe ajustarse a su propio modelo.

3.5.8. Modelos finales de regresión para la estimación de biomasa aérea de 10 accesiones de *J. curcas*

Son tres los modelos de regresión necesarios para estimar la biomasa aérea de las 10 accesiones de *J. curcas*; el modelo (ADEFGI) para seis accesiones, el modelo (BCH) para tres y el modelo J para esta única accesión (Tabla 3.10).

Tabla 3.10. Modelos de regresión para la estimación de biomasa aérea (g) de 10 accesiones de *J. curcas* a partir del diámetro de la base del tallo (cm).

Modelo	Lineal	Potencial
ADEFEGI	$\text{Log } B = 3.3893 (\text{Log } D) + 0.288$	$B = 1.9407D^{3.3893}$
BCH	$\text{Log } B = 3.2691 (\text{Log } D) + 0.4697$	$B = 2.9490D^{3.2691}$
J	$\text{Log } B = 2.6513 (\text{Log } D) + 0.7557$	$B = 5.6972D^{2.6513}$

Los parámetros β_1 de los modelos (ADEFGI), (BCH) y (J) fueron 3.389, 3.269 y 2.651 respectivamente (Tabla 3.8). Estos valores se encuentran en el intervalo de lo reportado previamente en ecuaciones para estimación de biomasa de *J. curcas* a partir del diámetro de la base del tallo.

Achten *et al.* [36] publicaron un parámetro β_1 con valor de 2.328 para plántulas de *J. curcas* de 116 días de edad cultivadas bajo condiciones de invernadero en Leuven, Bélgica. Makunwa *et al.* [23] reportaron parámetros β_1 de 2.891 para plantas de *J. curcas* entre 12 y 33 meses de edad en una región con clima tropical cálido y 2.769 para otra región, con clima tropical fresco en Malawi.

Por otra parte Ghezehei *et al.*[12] reportaron una ecuación cuyo parámetro β_1 tuvo el valor de 3.529 la cual fue desarrollada a partir de plantas de 16 a 26 meses de edad cultivadas en KwaZulu-Natal, en el sureste de Sudáfrica. Hellings y Romijn [10] reportaron un parámetro β_1 con valor de 3.0248 para plantas de *J. curcas* colectadas en una región semiárida tropical del Norte de Tanzania.

El parámetro β_1 indica la magnitud del cambio en el valor de la variable dependiente cuando la variable independiente aumenta en una unidad [41]. En este caso β_1 indica cuantos gramos incrementa la biomasa aérea cuando el diámetro de la base del tallo incrementa un centímetro; las proporciones de las 10 accesiones evaluadas en este trabajo están en el rango de las reportadas para *J. curcas*.

La diferencia encontrada en los valores del parámetro β_1 entre las accesiones evaluadas de *J. curcas* indica que son diferentes genotípicamente puesto que la plantación se estableció por propagación vegetativa mediante clonas de cada una de las accesiones, es decir, hubo homogeneidad del material genético dentro de cada accesión y todas estuvieron sometidas a las mismas condiciones ambientales.

Chave *et al.* [35] reportaron que características de las plantas tales como la densidad de la madera, la forma y la arquitectura del árbol varían entre especies, lo cual en alometría, puede afectar las relaciones modeladas entre la variable predictiva y la dependiente, si bien no se trabajó a nivel de especies, las plantas del presente estudio fueron clasificadas como accesiones por tener características morfológicas diferentes y por proceder de puntos geográficos diferentes.

3.5.9. Significancia y ajuste de los modelos finales de regresión

Las relaciones de regresión fueron significativas ($P < 0.05$) para todas las accesiones tanto individuales (Tabla 3.6) como agrupadas (Tabla 3.8). Por lo tanto, la relación entre la biomasa aérea como variable dependiente y el diámetro de la base del tallo como variable independiente es significativa en *J. curcas*, esto se reafirma con los valores obtenidos del coeficiente de determinación R^2 de 0.96, 0.98 y 0.99 para los modelos (ADEFGI), (BCH) y (J), respectivamente (Tabla 3.8). Esto significa que para las correspondientes accesiones de *J. curcas* el 96, 98 y 99% de la variabilidad de la biomasa aérea está explicada por la variabilidad del diámetro de la base del tallo [23].

El diámetro del tallo es la variable independiente más comúnmente utilizada como predictor en el análisis de regresión para la estimación de biomasa, debido a que el crecimiento de las partes aéreas (tallos y ramas) de los árboles está biomecánicamente

soportado por el tallo, el cual debe crecer proporcionalmente, además de que es una variable de fácil medición [65, 66].

Aunque se han reportado trabajos en los que se utiliza una variable independiente diferente al diámetro del tallo o bien a éste en conjunto con otra, los resultados obtenidos no han sido satisfactorios [67].

Ker *et al.* [68] encontraron inconsistencia en el desempeño predictivo de ecuaciones alométricas usando dimensiones de la copa de árbol como variable independiente; Mankuwa *et al.* [23] reportaron una relación significativa entre el diámetro del tallo y la biomasa aérea mientras que la relación con la inclusión de la altura de la planta como variable independiente no fue significativa ($P > 0.05$).

Mejores resultados fueron publicados por Ghezehei *et al.* [12] quienes utilizaron la profundidad de la copa del árbol como variable predictora de la biomasa aérea de *J. curcas* encontrando una relación significativa entre ambas variables ($P < 0.05$) con un coeficiente de correlación de 0.98.

Sin embargo, las dificultades en el grado de certeza por la subjetividad asociada en la medición del área de la copa y la susceptibilidad de su geometría a la competencia entre plantas son con frecuencia las razones de la no inclusión de este parámetro en las ecuaciones de regresión ya que la facilidad de medición de la variable independiente es un factor que ahorra tiempo y dinero [34, 69].

Clough y Scott [69] indican que las regresiones de potencia representan la alometría de los árboles satisfactoriamente. Este trabajo confirma que *J. curcas* es una especie en la cual también puede emplearse este tipo de regresiones ya que la relación entre la biomasa aérea (g) como variable dependiente y el diámetro de la base del tallo (cm) como variable independiente de las 10 accesiones fue de tipo potencial (Figura 3.2).

Los resultados de este trabajo coinciden con los reportados por Ghezehei *et al.* [12]; Achten *et al.* [36]; Hellings y Romijn [10] y Mankuwa *et al.* [23] quienes construyeron modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de *J. curcas* a partir del

diámetro de la base del tallo como variable independiente, reportando que ambas variables se ajustaron satisfactoriamente al modelo general de potencia.

3.5.10. Estabilidad de los parámetros de los modelos finales de regresión

El parámetro β_1 del modelo (BCH) fue el que presentó mayor estabilidad ya que su intervalo de confianza de 95% fue de 0.07 el cual representa el 2.14% del valor de β_1 . En segundo lugar estuvo el parámetro β_1 del modelo (ADEFGI) cuyo intervalo de confianza fue de 0.09, equivalente a 2.65% del valor del parámetro, mientras que el modelo J tuvo el mayor intervalo de confianza, con un valor de 0.34, equivalente al 12.83% del valor del parámetro en cuestión (Tabla 3.11).

Tabla 3.11. Intervalos de confianza (IC) de 95% del parámetro β_1 de los modelos de regresión finales, como una medida de la estabilidad.

Modelo	β_1	IC 95%
ADEFGI	3.39	0.09
BCH	3.27	0.07
J	2.65	0.34

La estabilidad de los parámetros β_1 de los modelos (BCH) y (ADEFGI) encontrados en el presente trabajo es mayor a otros reportados para *J. curcas*. Achten *et al.* [36] reportaron parámetros β_1 cuyo intervalo de confianza de (IC) 95% fue de 0.132 lo cual representaba el 5.7% del parámetro mientras que Mankuwa *et al.* [23] publicaron dos ecuaciones con IC95% para β_1 de 0.136 y 0.157 representando el 4.7% y 4.2% de los parámetros respectivamente. Así mismo, la estabilidad del parámetro β_1 del modelo (J) es menor respecto a los reportados.

3.5.11. Desempeño predictivo de los modelos finales de regresión

Los modelos (ADEFGI) y (BCH) tuvieron el mismo error medio relativo con -0.07% mientras que el del modelo (J) fue ligeramente menor con -0.08% (Tabla 3.12). Valores negativos del promedio del error relativo indican sobreestimación de la predicción de biomasa por parte de los modelos mientras que valores positivos indican subestimación

de las predicciones [41]. Sin embargo, ninguno de los tres modelos de este estudio estuvo sesgado, debido a que el intervalo de confianza (95%) de los tres promedios incluyen el cero, por lo tanto, ninguno de ellos sobreestima ni subestima la biomasa [23].

El error estándar relativo de estimación fue más variable entre los modelos. El modelo J fue el que tuvo el valor mayor con 4.26%, seguido de (ADEFGI) con 3.67% y (BCH) con 2.04% (Tabla 3.12). El error estándar de estimación provee una medida de la imprecisión de los modelos.

Tabla 3.12. Desempeño predictivo de los tres modelos finales para la estimación de biomasa de 10 accesiones de *J. curcas*.

Modelo	Sesgo (%)*	IC 95%	Imprecisión (%) **	IC 95%
ADEFGI B = 1.9407D ^{3.3893}	-0.07	-1.64 a 1.51	3.67	3.20 a 4.31
BCH B = 2.949D ^{3.2691}	-0.07	-1.32 a 1.19	2.04	1.68 a 2.58
J B = 5.6972D ^{2.6513}	-0.08	-5.23 a 5.08	4.26	3.06 a 7.04

*Error medio relativo; **Error estándar relativo.

Las estimaciones insesgadas de la biomasa son un indicativo de robustez de los modelos alométricos ya que del sesgo depende la calidad de las estimaciones a nivel de campo, cuando se realizan varias mediciones en un rango amplio de valores de la variable independiente [32].

Sin embargo, cuando se considera la estimación de biomasa de árboles individuales, el error estándar de estimación, como una medida de la desviación de la media de las estimaciones de árboles individuales, es más importante que el sesgo debido a que cero sesgo puede resultar cuando las subestimaciones y sobreestimaciones se cancelan entre sí en la predicción de biomasa de muchos árboles pero la predicción de un árbol individual puede ser imprecisa. El error estándar relativo porcentual provee una medida de la imprecisión de los modelos para la estimación de biomasa en el caso de árboles individuales [11].

3.6. Análisis residual de los modelos finales de regresión: confirmación de los supuestos de la regresión lineal

3.6.1. Prueba de linealidad

El criterio de linealidad consiste en que la distribución de los residuos debe ser lineal a lo largo del eje horizontal [40]. En la Figura 3.5 se muestran los gráficos de los residuos de los modelos (ADEFGI), (BCH) y (J) contra la variable independiente, Diámetro de la Base del Tallo, en su forma logarítmica y se puede apreciar que los tres modelos cumplen con el criterio de linealidad.

La transformación logarítmica en relaciones no lineales cuyos parámetros β tienen exponentes diferentes a 1 hace posible la aplicación del análisis de regresión lineal para el cálculo de los parámetros mediante el método de mínimos, debido a que son intrínsecamente lineales y adoptan esta forma cuando se aplican logaritmos a la variable dependiente e independiente [41]. Además, la transformación logarítmica del diámetro de los tallos y la biomasa aérea colocó a las dos variables en una escala multiplicativa, lo cual es apropiado para la interpretación de variables de dimensiones de las plantas debido a que el crecimiento biológico es un proceso multiplicativo [70].

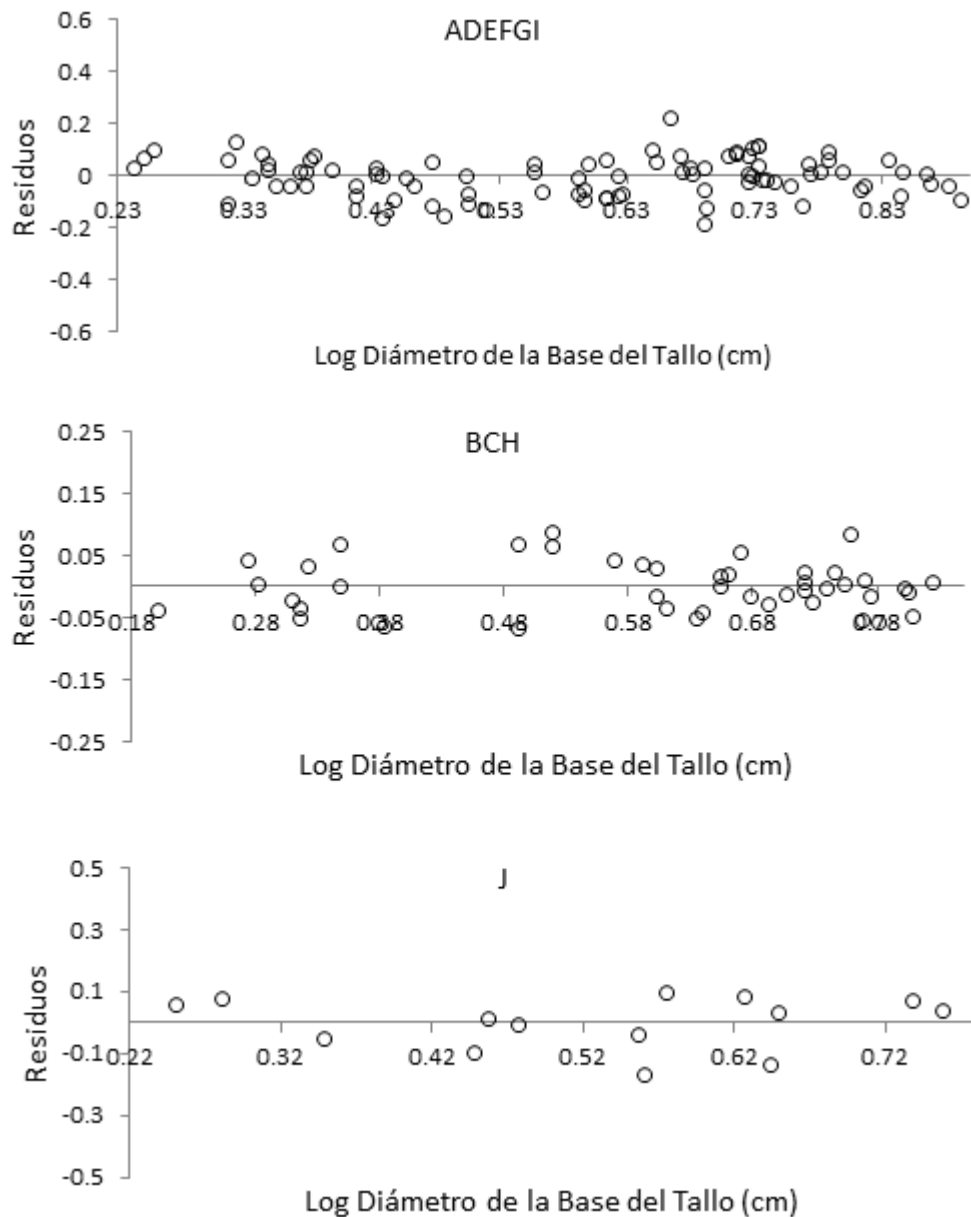


Figura 3.5. Prueba de linealidad de los modelos (ADEFGI), (BCH) y (J) para la estimación de biomasa aérea de 10 accesiones de *J. curcas*. n = 90, 45 y 14 para (ADEFGI), (BCH) y (J) respectivamente.

3.6.2 Prueba de homocedasticidad

Los gráficos de residuos contra la biomasa estimada de cada uno de los modelos (ADEFGI), (BCH) y (J), muestran que la distribución de los residuos es constante y lineal a lo largo del eje X (Figura 3.6). Por lo tanto, se concluye que los tres modelos de estimación de biomasa cumplen con el criterio de homocedasticidad, es decir, que la varianza permanece constante independientemente de si el valor de los diámetros de la base de los tallos incrementa o disminuye [41].

Esto muestra la estabilidad de los modelos en la predicción de biomasa a través de los diferentes tamaños de plantas, es decir, la varianza de los residuos permanece constante independientemente del diámetro de los árboles. De acuerdo a Warton *et al.* [70] este es otro de los beneficios de la transformación logarítmica de ambas variables debido a que proporciona uniformidad de varianzas en todo el rango de valores de la variable independiente.

3.6.3 Prueba de normalidad

Los tres modelos construidos en el presente trabajo cumplieron con el supuesto de normalidad de la regresión lineal, cuyo criterio consiste en que al menos el 95% de los residuos estandarizados de la regresión sean mayores a -2 e inferiores a +2 [41].

Para el modelo (ADEFGI) uno de los residuos fue mayor a +2 y tres de ellos inferiores a -2 (Figura 3.7). Sin embargo, el número total de residuos es 90 y el porcentaje de residuos de este modelo que sale de los límites es de 4.4%, por lo tanto, el modelo cumple con el criterio de normalidad. Para el modelo (BCH), 2 de los 45 residuos fueron mayores a +2 (Figura 3.7), es decir, el 4.4% mientras que para el modelo (J) ninguno de sus residuos estandarizados fue mayor a +2 o menor a -2 (Figura 3.7); por lo tanto, ambos modelos cumplen con el criterio de normalidad.

El criterio de normalidad indica que los residuos se distribuyen normalmente. El cumplimiento de este supuesto es vital para la validez de un modelo de regresión debido a que las inferencias que se realizaron en las pruebas de significancia de las relaciones, la estabilidad de los parámetros y la comparación de modelos fueron en base a probabilidades de la distribución normal [23].

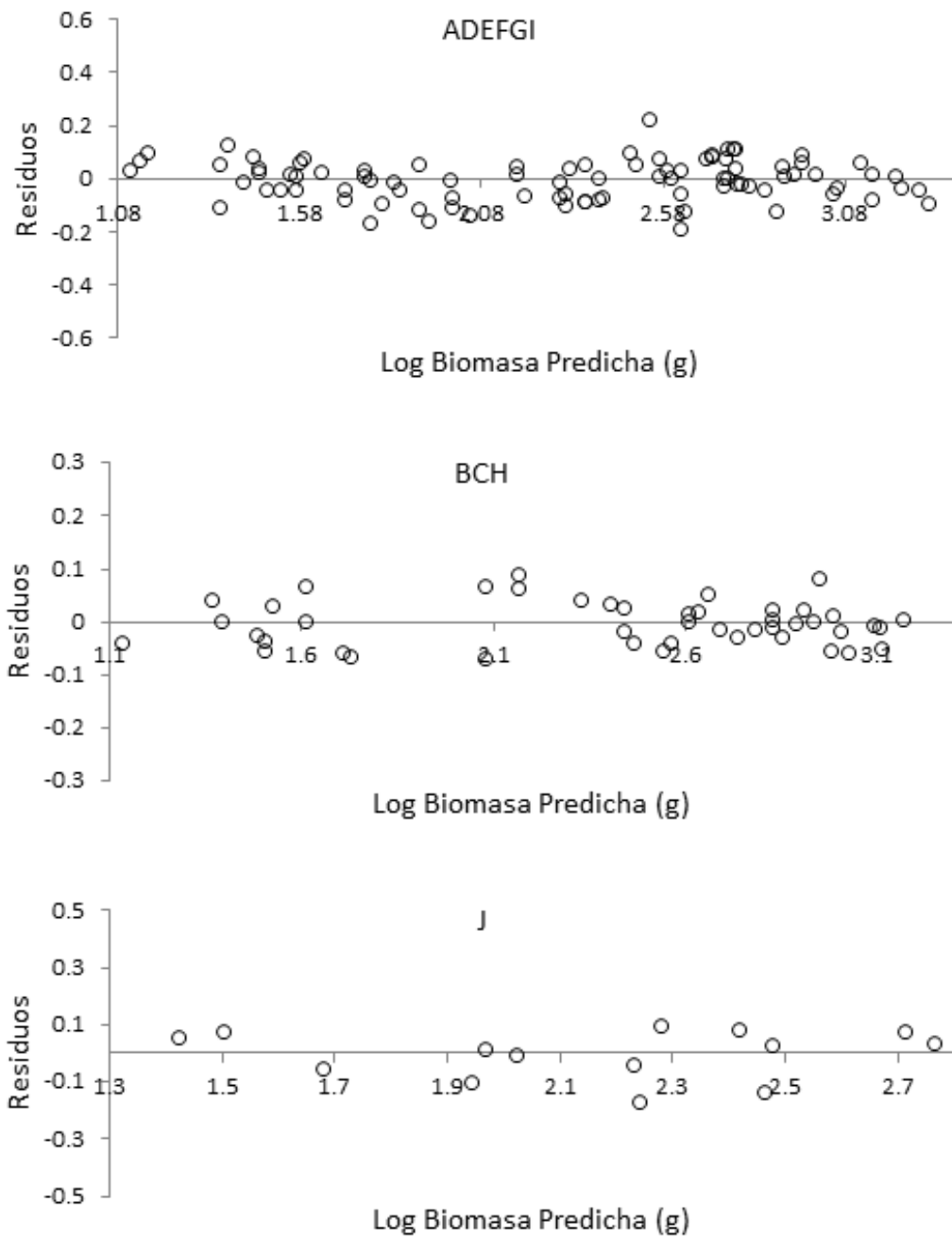


Figura 3.6. Prueba de homocedasticidad de los modelos (ADEFGI), (BCH) y (J) para la estimación de biomasa aérea de 10 accesiones de *J. curcas*. n = 90, 45 y 14 para (ADEFGI), (BCH) y (J) respectivamente.

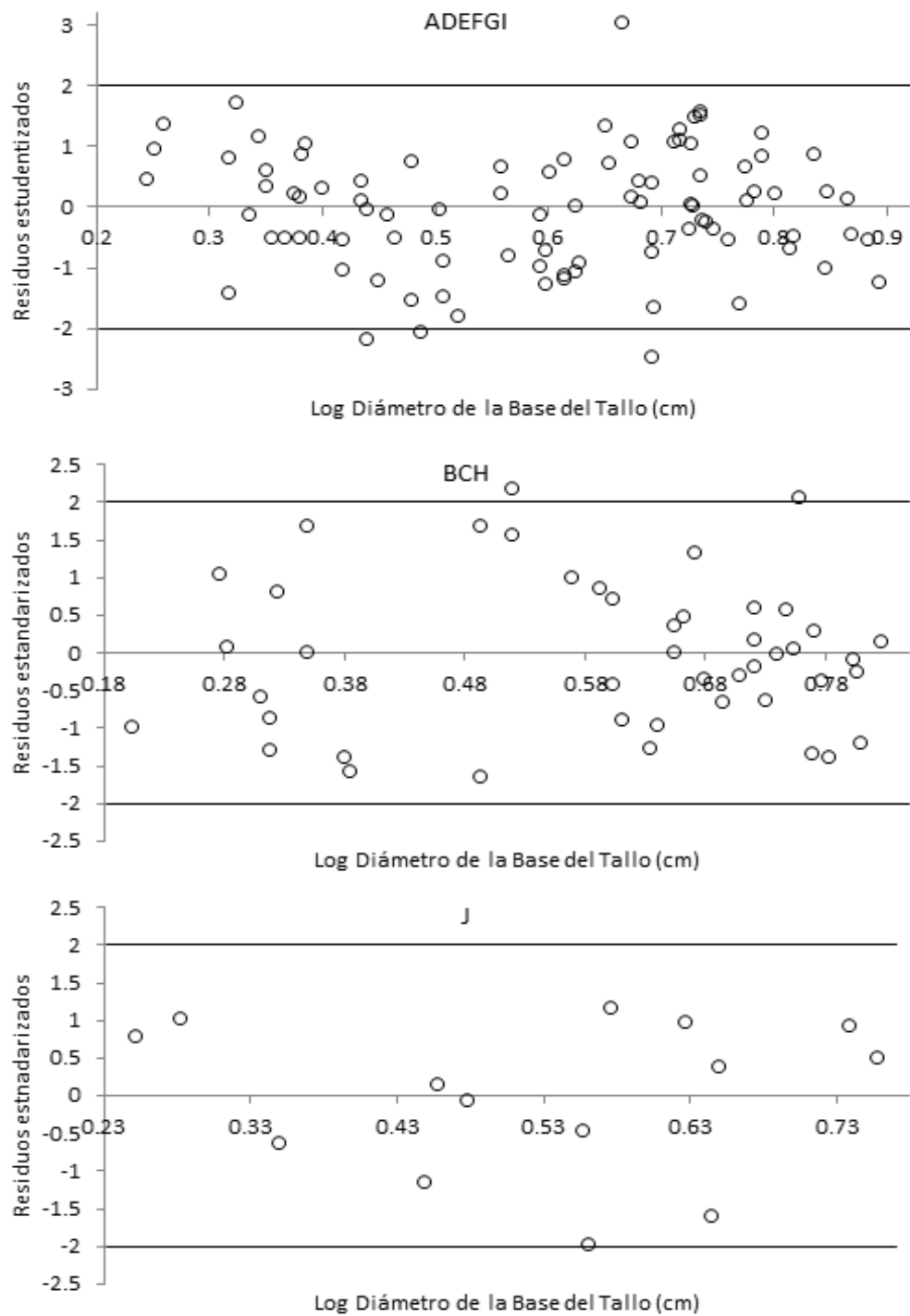


Figura 3.7. Prueba de normalidad de los modelos (ADEFGI), (BCH) y (J) para la estimación de biomasa aérea de 10 accesiones de *J. curcas*. n = 90, 45 y 14 para (ADEFGI), (BCH) y (J) respectivamente.

3.7. Caracterización fenotípica de las 10 accesiones de *J. curcas*

El análisis de componentes principales realizado a partir de 15 variables morfológicas y cuatro agronómicas de las 10 accesiones de *J. curcas*, reveló que la varianza total del germoplasma de *J. curcas* fue explicada por los tres primeros componentes en un 74 % (Tabla 3.13).

Tabla 3.13. Autovalores y autovectores de los dos primeros componentes principales para 19 caracteres agromorfológicos de 10 accesiones de *J. curcas*.

Variables	Autovectores	
	CP 1	CP 2
Diámetro de la base del tallo (cm)	0.35	0.02
Altura de la planta (m)	0.33	-0.12
Número de ramas	0.05	0.3
Longitud de las ramas (m)	0.35	-0.07
Número de hojas	0.29	0.15
Biomasa aérea (g)	0.35	0.003
Volumen de la madera (cm ³)	0.35	0.04
Densidad de la madera (g/cm ³)	-0.01	-0.05
Longitud del fruto (cm)	0.06	-0.34
Diámetro del fruto (cm)	0.27	-0.15
Grosor del fruto (cm)	0.24	-0.3
Longitud de la semilla (cm)	-0.07	0.36
Ancho de la semilla (cm)	0.19	0.32
Número de semillas por planta	0.08	0.43
Peso de 100 semillas (g)	-0.01	0.13
Peso de semillas por planta (g)	0.12	0.43
Grosor de la semilla (cm)	0.14	-0.01
Volumen de la semilla (cm ³)	0.24	0.07
Contenido de aceite (%)	0.21	-0.11
	CP 1	CP 2
Autovalor	7.61	3.86
Proporción	0.4	0.203
Proporción acumulada (%)	40	60.3

CP: Componente principal.

La variabilidad del primer componente fue explicada por el diámetro de la base del tallo, la altura de la planta, la longitud de las ramas, la biomasa aérea, el volumen de la madera, el número de hojas y el diámetro de los frutos, mientras que la varianza del segundo componente principal fue explicada por el número y peso de semillas por planta, la longitud de las semillas y la longitud de los frutos.

El gráfico de los dos primeros componentes principales, que explicaron el 60.3 % de la variación total, aglomeró a las 10 accesiones de *J. curcas* en tres grupos (Figura 3.8).

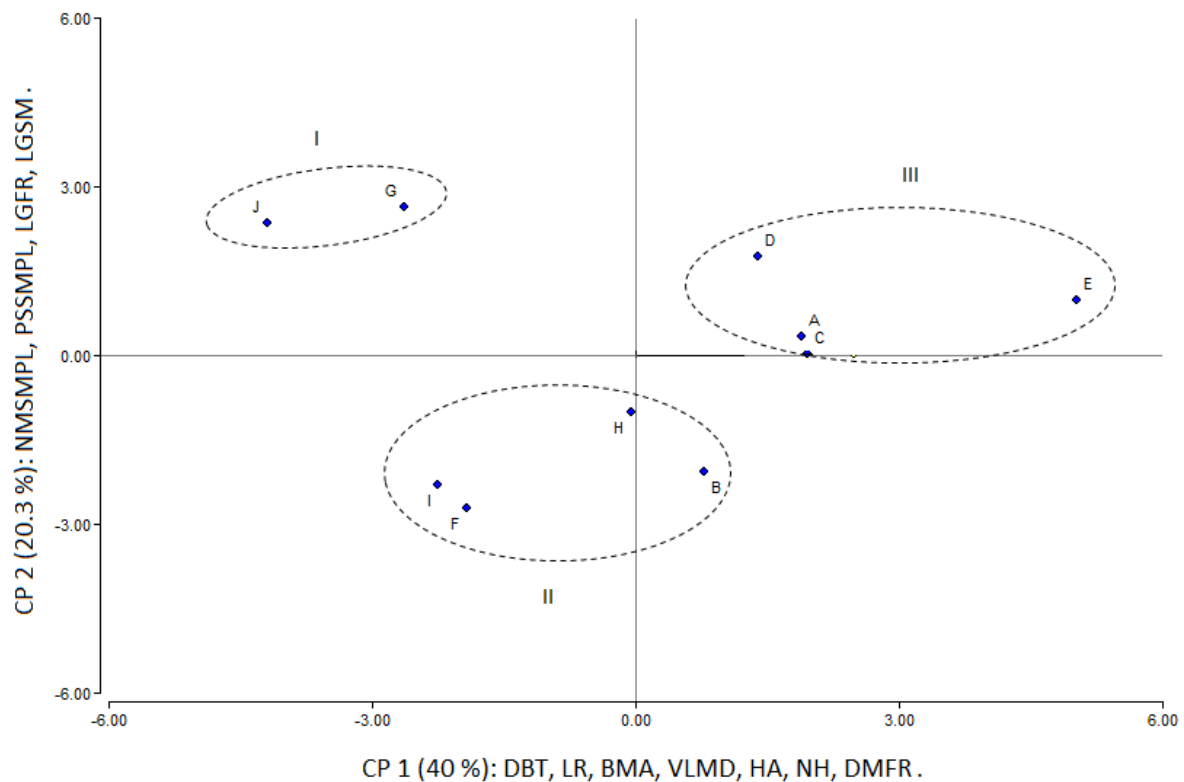


Figura 3.8. Dispersión de 10 accesiones de *J. curcas* con base en los dos primeros componentes principales. CP: componente principal; DBT: diámetro de la base del tallo; LR: longitud de las ramas; BMA: biomasa; VLMD: volumen de la madera; HA: altura de la planta; NH: número de hojas; DMFR: diámetro del fruto; NMSMPL: número de semillas por planta; PSSMPL: peso de semillas por planta; LGFR: longitud del fruto; LGSM: longitud de la semilla.

El grupo I estuvo compuesto por dos accesiones, G y J, las cuales presentaron los valores más bajos en las variables de tamaño de las plantas (diámetro del tallo, altura de la planta, longitud de las ramas, biomasa y volumen de la madera) pero los más altos en lo correspondiente a las características agronómicas, principalmente en el número y peso de semillas por planta (Figura 3.8).

En el grupo II se concentraron las accesiones B, H, I y F las cuales se caracterizaron por tener valores medios y bajos en variables de tamaño (diámetro del tallo, altura de la planta, longitud de las ramas, biomasa y volumen de la madera) y los valores más bajos para las variables agronómicas (número y peso de semillas por planta), sin embargo, se observó que las accesiones H y B presentaron valores intermedios de las variables de tamaño de las plantas pero bajos en las correspondientes a las características agronómicas (Figura 3.8).

El grupo III estuvo conformado por las accesiones A, E, C y D, las cuales se caracterizaron por tener valores altos en variables morfológicas de tamaño de las plantas principalmente (diámetro del tallo, altura de la planta, longitud de las ramas, biomasa, volumen de la madera), así como valores medio-altos de variables agronómicas (número y peso de semillas por planta), principalmente (Figura 3.8).

El dendograma construido con las mismas 19 variables agromorfológicas aglomeró a las 10 accesiones de *J. curcas*, a una distancia Euclidiana de 5.38, en los mismos tres grupos de accesiones que el análisis de componentes principales. El Grupo I estuvo conformado por las accesiones J y G, el Grupo II por las accesiones F, I, H y B mientras que el Grupo III lo conformaron las accesiones D, C, E y A (Figura 3.9).

Al igual que en el análisis de componentes principales, las accesiones se diferenciaron principalmente por las características morfológicas de tamaño (diámetro del tallo, altura de la planta, longitud de las ramas, volumen de la madera y biomasa) y por las agronómicas (número y peso de semillas por planta) ya que las accesiones del Grupo III fueron las que presentaron los mayores valores de las variables de porte, las del Grupo II presentaron valores intermedios, mientras que las del Grupo I presentaron los menores valores en estas variables pero los mayores valores en las variables agronómicas (Figura 3.9).

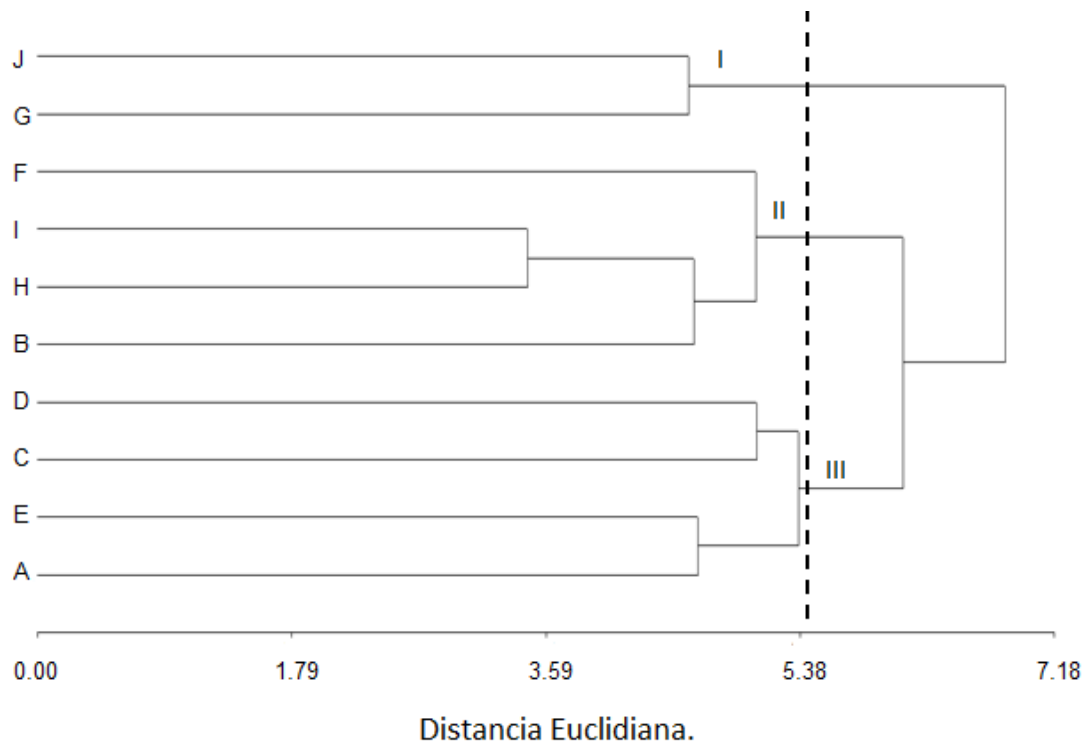


Figura 3.9. Agrupamiento de 10 accesiones de *J. curcas* a partir de 19 rasgos agromorfológicos, construido usando el método UPGMA.

El dendrograma de las 10 accesiones de *J. curcas* formó tres grupos que se diferencian principalmente por el tamaño de las plantas y por la producción de semillas, por lo tanto, las plantas de las accesiones D, C, E y A son las más grandes pero las de menor producción de semillas, seguidas de las accesiones F, I, H y B para esas mismas variables mientras que las plantas de las accesiones J y G son las plantas más pequeñas pero las de mayor producción (Figura 3.9).

La formación de tres grupos de accesiones de *J. curcas*, tanto por el análisis de componentes principales como por el dendrograma, a partir de 15 caracteres morfológicos y cuatro agronómicos ayudó a identificar las características más importantes que diferencian a las 10 accesiones de *J. curcas* estudiadas e indica un nivel intermedio de diversidad entre las accesiones [42].

La diversidad entre las accesiones del presente estudio así como las variables que explicaron la mayor variabilidad entre accesiones, coinciden con lo reportado en el

análisis de diversidad de *J. curcas* de otras latitudes, en los cuales han concluido que los caracteres relacionados con las semillas y con el tamaño de las plantas son los que explican la mayor variabilidad. Shabanimofrad *et al.* [42] determinaron la magnitud de la variación genética y la relación entre 48 accesiones de *J. curcas* de Malasia con base en 14 caracteres agromorfológicos y reportaron la formación de seis grupos a una distancia Euclidiana de 4.8. Reportaron también, con base en un análisis de componentes principales, que las variables que explicaron la mayor variación entre las accesiones estuvieron las relacionadas con la producción (número de semillas por planta y rendimiento de semilla y de aceite por hectárea).

Por su parte, Rao *et al.* [46] evaluaron la asociación genética y la variabilidad de 32 colectas silvestres de *J. curcas* de 11 localidades de la India utilizando 11 caracteres agromorfológicos; reportando la formación de cinco grupos de colectas y que las variables relacionadas con el tamaño de las plantas (altura) y con el rendimiento (peso de semillas por planta) fueron las que presentaron mayor variabilidad entre accesiones.

Resultados similares fueron reportados por Gohil y Pandia [44] quienes evaluaron la diversidad de nueve genotipos de *J. curcas* colectados en la región semiárida de India, mediante la Distancia de Mahalanobis, utilizando 14 variables agromorfológicas. Los genotipos formaron cinco grupos y los rasgos más importantes que contribuyeron a la mayor diversidad genética fueron variables de rendimiento, específicamente el contenido de aceite de las semillas.

Por otra parte, las accesiones J y G que conformaron el Grupo I tanto en el análisis de componentes principales como en el dendograma son accesiones con potencial para darles seguimiento como cultivo energético, ya que las plantas de ambas accesiones son las que presentaron el mayor número y peso de semillas por planta y además son las más pequeñas en altura y en volumen, lo cual podría facilitar el proceso de cosecha de sus frutos. Por lo tanto, las accesiones J y G podrían ser utilizados como parentales en procesos de hibridación ya que se ha reportado alta heredabilidad en *J. curcas* para el número de semillas por planta (83.6 %) y para la altura de la planta (87.7 %) [42, 46]

En ese mismo sentido Latif *et al.* [71] y Abdullah *et al.* [72] indican que para obtener mayor heterosis, los genotipos más divergentes deben cruzarse entre sí. Mientras Gohil y Pandia

[73] sugieren que, para la creación de variabilidad y para el desarrollo de un mejor genotipo, debe usarse un gran número de líneas divergentes en la hibridación en lugar de unos pocos. Por lo tanto, la cruce de las accesiones J y G con las accesiones del grupo A, E, C y D (las más distantes) podría ayudar a producir un amplio espectro de variación en la progenie segregante, lo cual podría ser útil en un programa de hibridación para el mejoramiento de *J. curcas* con fines energéticos.

En otro contexto, las accesiones A, E, C y D del Grupo III, donde estuvieron las plantas más grandes pero con menor producción de semillas, tienen potencial para usos diferentes a la producción de energía. Se ha propuesto que las plantas de *J. curcas* con esas características pueden ser consideradas para incorporarlas en un sistema agroforestal ya que la altura de la planta y la longitud de las ramas son caracteres importantes para ese objetivo con lo cual además del beneficio para el sotobosque, estas plantas contribuirían a una mayor captura de CO₂ que las pequeñas [46].

Finalmente, el análisis de la diversidad genética de germoplasma puede facilitar una clasificación fiable de las accesiones así como la identificación de subgrupos principales con fines de selección para propósitos de reproducir una característica deseable. Los dendrogramas indican el grado de divergencia entre las poblaciones [74].

Aunque el análisis de diversidad en este trabajo se realizó a partir de marcadores fenotípicos y no moleculares, Gullberg *et al.* [75] informaron de la complementariedad de los marcadores moleculares y los fenotípicos y resaltaron el uso de ambos marcadores para una descripción completa del nivel y patrón de la diversidad genética. Por lo tanto, el análisis de la diversidad utilizando caracteres agromorfológicos es adecuado para la evaluación de los recursos genéticos con objetivos de mejoramiento.

CONCLUSIONES

- Las 10 accesiones de *J. curcas* evaluadas en el presente trabajo, producen biomasa ($2.27 \text{ t.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$) y capturan CO_2 ($4.15 \text{ t.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$) en el rango de lo reportado para esta especie en trabajos previos en diferentes regiones del mundo donde se desarrolla ($1.64 - 2.46 \text{ t.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ de biomasa y $3 - 4.5 \text{ t.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ de CO_2).
- Además de la captura de CO_2 , los servicios ambientales de *J. curcas* incrementan tomando en cuenta que además de capturar y almacenar carbono en sus tejidos, contribuye en la adición de carbono orgánico al suelo debido a que es una especie caducifolia, este es un proceso vital para el incremento de calidad del suelo considerando que *J. curcas* debe ser cultivada en suelos marginales debido a su capacidad para desarrollarse en ellos.
- La producción de biomasa de *J. curcas* puede ser estimada con el modelo alométrico general de potencia $B = \beta_0 D^{\beta_1}$.
- El diámetro de la base del tallo es una variable independiente que puede ser utilizada de manera confiable como predictiva de la biomasa aérea de *J. curcas* ya que la relación entre ambas variables fue significativa para las 10 accesiones y el porcentaje de variabilidad de la biomasa explicada por el diámetro del tallo fue superior al 96% en todos los casos.
- Para la estimación de biomasa de las 10 accesiones de *J. curcas*, en Temozón Norte, Mérida, Yucatán, México, únicamente se requieren tres modelos alométricos ya que las accesiones formaron dos grupos, uno de seis (A, D, E, F, G e I) y otro de tres (B, C y H), mientras que la accesión J requiere de su propio modelo.
- Las accesiones que conforman los grupos (ADEFGI) y (BCH) tienen la misma relación entre el diámetro de la base del tallo y la biomasa aérea, por lo tanto, pueden considerarse iguales para efectos de alometría entre ambas variables.

- Los tres modelos alométricos construidos son robustos ya que todos son insesgados, es decir, no subestiman ni sobreestiman la biomasa, además, el porcentaje de error de estimación es inferior al 5% en todos los casos.
- Seis de las accesiones presentaron rendimiento de aceite de sus semillas superiores a 40%, lo que en primera instancia las hace candidatas como cultivos energéticos, sin embargo, es necesario realizar otros estudios para determinar la productividad y eficiencia productiva.
- Las 10 accesiones de *J. curcas* formaron tres grupos en la caracterización fenotípica.
- Existe un nivel intermedio de diversidad entre las 10 accesiones de *J. curcas*.
- Las accesiones difieren principalmente en el tamaño de las plantas y la producción de semillas.
- Las accesiones J y G presentan potencial como parentales para propagarlas como cultivo energético puesto que son las plantas más productoras de semillas y más pequeñas, lo cual facilitaría el proceso de cosecha.

RECOMENDACIONES

Los modelos alométricos para la estimación de biomasa de *J. curcas* construidos en el presente trabajo deben ser aplicados en el rango de diámetros de la base del tallo utilizados para su construcción, el salirse de esos límites disminuiría su desempeño predictivo por el incremento del error de estimación.

Estos modelos deben emplearse para la estimación de biomasa de plantas de *J. curcas* propagadas vegetativamente debido a que fue de esta manera en que se propagaron las plantas utilizadas para su construcción. El uso de los modelos en plantas reproducidas por otro método comprometería su desempeño predictivo puesto que la reproducción vegetativa garantiza la homogeneidad del material genético de las plantas contrario a la reproducción sexual en donde la variabilidad genética es alta y por lo tanto, la respuesta de las plantas a un mismo ambiente puede ser diferente para una misma accesión lo que puede alterar la relación entre el diámetro de la base del tallo y la biomasa aérea.

Las plantas utilizadas para la construcción de los modelos alométricos fueron cultivadas en una zona anteriormente Henequenera (suelos de escasa profundidad y fertilidad) del Estado de Yucatán, por lo tanto, estos modelos son válidos para la estimación de biomasa de plantas de *J. curcas* que sean cultivadas en esa zona debido a que los modelos alométricos son específicos del sitio donde se desarrollan.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. K. Behera; P. Srivastava; R. Tripathi; J. P. Singh; N. Singh, Evaluation of plant performance of *Jatropha curcas* L. under different agro-practices for optimizing biomass-A case study, *Biomass. Bioenerg.* 34, 30-41, 2010.
- [2] K. Kayguzus, Energy for sustainable development: A case of developing countries, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 16, 116-126, 2012.
- [3] G. Q. A. Anderson; M. J. Fergusson, Energy from biomass in the UK: sources, processes and biodiversity implications, *Ibis.* 148, 180–183, 2006.
- [4] C. Bohemel; I. Lewandowski; W. Claupein, Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities, *Agr. Syst.* 96, 224-236, 2008.
- [5] N. R. Boyle; J. A. Morgan, Computation of metabolic fluxes and efficiencies for biological carbon dioxide fixation, *Metab. Eng.* 13, 150–158, 2011.
- [6] V. N. Gunaseelan, Biomass estimates, characteristics, biochemical methane potential, kinetics and energy flow from *Jatropha curcas* on dry lands, *Biomass. Bioenerg.* 33, 589-596, 2009.
- [7] P. Castro; J. Coello; L. Castillo, Opciones para la producción y uso del biodiésel en el Perú, *Soluciones Prácticas – ITDG, Perú*, 2007, p 36.
- [8] N. Contran, L. Chessa; M. Lubinoa; D. Bellavite; P. P. Roggero; G. Enne, State-of-the-art of the *Jatropha curcas* productive chain: From sowing to biodiesel and by-products, *Ind. Crop. Prod.* 42, 202-215, 2013.
- [9] M. Balat, Potential alternatives to edible oils for biodiesel production-A review of current work, *Energ. Convers. Manage.* 52,1479-492, 2011.

- [10] B. F. Hellings; H. A. Romijn; W. J. Franken, Carbon storage in *Jatropha curcas* trees in Northern Tanzania, FACT, 2012.
- [11] Q. M. Ketterings; R. Coe; M. Van Noordwijk; Y. Ambagau; C. A. Palm, Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests, *Forest. Ecol. Manag.* 146, 199-209, 2001.
- [12] S. B. Ghezehei; J. G. Annandale; C. S. Everson, Shoot allometry of *Jatropha curcas*, *South. Forests.* 71, 279-286, 2009.
- [13] F. Bautista; E. Batllori-Sampedro; G. Palacio-Aponte; M. Ortíz-Pérez; M. Castillo-González en *Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales*, F.B. Zúñiga; A.G. Palacio, Ed.; Instituto Nacional de Ecología, México, 2005, p 51.
- [14] P. Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis-Practical Design and Theory*, Elsevier, USA, 2010, p. 27.
- [15] L. A. Lucia; D. S. Argyropoulos; L. Adamopoulos; A. R. Gaspar, Chemicals and energy from biomass, *Can. J. Chem.* 84, 960-970, 2006.
- [16] M. A. Paisley; A. Page, High Efficiency Renewable Energy From Residual Materials, In ASME Power Conference, UK, 2008, pp. 593-600.
- [17] M. Balat; G. Ayar, Biomass energy in the world, use of biomass and potential trends, *Energ. Source.* 27, 931-940, 2005.
- [18] A. T. Hendriks, Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass, *Bioresour. Technol.* 100, 10-18, 2009.
- [19] M. Balat; H. Balat; C. Öz, Progress in bioethanol processing, *Prog. Energ. Combust.* 34, 551-573, 2008.
- [20] Y. Surmen, The necessity of biomass energy for Turkish economy, *Energy. Edu. Sci. Technol.* 10, 19-26, 2002.

- [21] H. A. Romijn, Land clearing and greenhouse gas emissions from *Jatropha* biofuels on African Miombo Woodlands, *Energ. Policy*. 39, 5751- 62, 2011.
- [22] L. G. Yan; J. W. Chen, Key issues on energy sustainable development in China, Beijing Science Press. 354 - 378, 2001.
- [23] S. D. Makungwa; A. Chittock; D. L. Skole; G. Y. Kanyama-Phiri; I. H. Woodhouse, Allometry for Biomass Estimation in *Jatropha* Trees Planted as Boundary Hedge in Farmers' Fields, *Forests*. 4, 218-233, 2013.
- [24] V. C. Pandey; K. Singh; J. S. Singh; A. Kumar; B. Singh; R. P. Singh, *Jatropha curcas*: A potential biofuel plant for sustainable environmental Development, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 16, 2870- 2883, 2012.
- [25] W. Fonseca; F. Alice; J.M. Rey, Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica, *Bosque*. 30, 36-47, 2009.
- [26] C. C. Black, Photosynthetic carbon fixation in relation to net CO₂ uptake, *Annu. Rev. Plant. Phys.* 24, 253-86, 1973.
- [27] M. Y. Koh; T. I. M. Ghazi, A review of biodiesel production from *Jatropha curcas* L. oil, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 15, 2240–2251, 2011.
- [28] P. Sirisomboon; P. Kitchaiya; T. Pholpho; W. Mahuttanyavanitch, Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L. fruits, nuts and kernels, *Biosyst. Eng.* 97, 201–207, 2007.
- [29] A. Kumar; S. Sharma, An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review, *Ind. Crop. Prod.* (2008), doi: 0.1016/j.indcrop.2008.01.001
- [30] R. E. E. Jongschaap; R. A. R. Blesgraaf; T.A. Bogaard; E.N. Van Loo; H.H.G. Savenije, The water footprint of bioenergy from *Jatropha curcas* L, *PNAS*. 106, 92, 2009.

- [31] M. Segura; H.J. Andrade, ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?, *Agrofor. Am.* 46, 89-96, 2008.
- [32] S. Kuyaha; J. Dietz; C. Muthuria; R. Jamnadass; P. Mwangi; R. Coe; H. Neufeldt, Allometric equations for estimating biomass in agricultural landscapes: I. Aboveground biomass, *Agr. Ecosyst. Environ.* 158, 216–224, 2012.
- [33] J. O. Rawlings; S.G. Pantula; D.A. Dickey, *Applied Regression Analysis: A Research Tool*, 2nd ed.; Springer, USA, 1998, p 2.
- [34] S. Weisberg, *Applied Linear Regression*, 3rd ed.; Jhon Wiley & Sons, USA, 2005, p 19.
- [35] J. Chave; C. Andalo; S. Brow; M. A. Cairns; J. Q. Chambers; D. Eamus; H. Fölster; F. Fromard; N. Higuchi; T. Kira; J. P. Lescure; B. W. Nelson; H. Ogawa; H. Puig; B. Riéra; T. Yamakura, Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests, *Oecologia*.145, 87–99, 2005.
- [36] W. M. J. Achten; W. H. Maes; B. Reubens; E. Mathijs; V.P. Singh; L. Verchot; B. Muys, Biomass production and allocation in *Jatropha curcas* L seedlings under different levels of drought stress, *Biomass. Bioenerg.* 34, 667–676, 2010.
- [37] F. Kollmann, *Tecnología de la madera y sus aplicaciones*, IFIE, Madrid, 1959, 675 p.
- [38] P. W. West, *Tree and forest measurement*, Springer, Germany, 2004, 185 p.
- [39] M. Acosta-Mireles; J. Vargas-Hernández; A. Velázquez-Martínez; J. D. Etchevers-Barra, Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México, *Agrociencia.* 36, 725-736, 2002.
- [40] M. F. Pompelli; W. C. Antunes; D. T. R. G. Ferreira; P. G. S. Cavalcante; H. C. L. Wanderley-Filho; L. Endres, Allometric models for non-destructive leaf area estimation of *Jatropha curcas*, *Biomass. Bioenerg.* 36, 77-85, 2012.

- [41] D. R. Anderson; D. J. Sweeney, T. A. Williams, *Statistics for Business and Economics*, 10th ed.; CENGAGE, USA, 2008, p. 543.
- [42] M. Shabanimofrad; M. Y. Rafii; P. E. Megat Wahaba; A.R. Biabani; M.A. Latif, Phenotypic, genotypic and genetic divergence found in 48 newly collected Malaysian accessions of *Jatropha curcas* L., *Ind. Crop. Prod.* 42, 543– 551, 2013.
- [43] V. Pecina-Quintero; J. L. Anaya-López; A. Zamarripa-Colmenero; C. A. Núñez-Colín; N. Montes-García; J. L. Solís-Bonilla; M. F. Jiménez-Becerril, Genetic structure of *Jatropha curcas* L. in Mexico and probable centre of origin, *Biomass. Bioenerg.* 60, 147-155, 2014.
- [44] R. H. Gohil; J. B. Pandya, Genetic diversity assessment in physic nut (*Jatropha curcas* L.), *Int. J. Plant. Prod.* 4, 321-326, 2008.
- [45] T. A. Wani; S. Kitchlu; G. Ram, Genetic variability studies for morphological and qualitative attributes among *Jatropha curcas* L. accessions grown under subtropical conditions of North India, *S. Afr. J. Bot.* 79, 102–105, 2012.
- [46] G. R. Rao; G. R. Korwar; A. K. Shanker; Y. S. Ramakrishna, Genetic associations, variability and diversity in seed characters, growth, reproductive phenology and yield in *Jatropha curcas* (L.) accessions, *Trees.* 22, 697–709, 2008.
- [47] P. Srivastava; S. K. Behera; J. Gupta; S. Jamil; N. Singh; Y. K. Sharma, Growth performance, variability in yield traits and oil content of selected accessions of *Jatropha curcas* L. growing in a large scale plantation site, *Biomass. Bioenerg.* 35, 9936-9942, 2011.
- [48] C. R. Encino; F. M. Castillo, Propagación vegetativa de *Jatropha curcas* L. por estacas, *Investig. Agrar.*12, 69-73, 2010.
- [49] F. Moreno; A. Guerrero, Evaluación de la brotación de *Trichantera gigantea* (bonpl.) Nees, como estrategia para su propagación vegetativa, Tesis, Universidad Nacional Experimental del Táchira, Venezuela, 2006.

- [50] K. Pramanik, Properties and use of *Jatropha curcas* oil and diesel fuel blends in compression ignition engine, *Renew. Energ.* 28, 239-248, 2003.
- [51] B. N. Divakara; H. D. Upadhyaya; S.P. Wani; C.L. Laxmipathi Gowda, Biology and genetic improvement of *Jatropha curcas* L.: A review, *Appl. Energ.* 87, 732–742, 2010.
- [52] C. R. Chen; Y. J. Cheng; Y.C. Ching; D. Hsiang; C. M. J. Chang, Green production of energetic *Jatropha* oil from de-shelled *Jatropha curcas* L. seeds using supercritical carbon dioxide extraction, *J. Supercrit. Fluid.* 66, 137– 143, 2012.
- [53] J. Martínez-Herrera; A. L. Martínez-Ayala; H. Makkar; G. Francis; K. Becker, Agroclimatic Conditions, Chemical and Nutritional Characterization of Different Provenances of *Jatropha curcas* L. from México, *Eur. J. Sci. Res.* 39, 396-407, 2010.
- [54] H. P. S. Makkar; J. Martínez-Herrera; K. Becker, Variations in seed number per fruit, seed physical parameters and contents of oil, proteins and phorbol esters in toxic and non toxic genotypes of *Jatropha curcas*, *Int. J. Plant. Sci.* 3, 260-265, 2008.
- [55] I. Ovando-Medina; F. J. Espinoza-García; J. Núñez-Farfán; M. Salvador-Figueroa, Genetic Variation in Mexican *Jatropha curcas* L. Estimated With Seed Oil Fatty Acids, *J. Oleo. Sci.* 60, 301-311, 2011.
- [56] J. C. Escobar; E.S. Lora; O.J. Venturini; E.E. Yáñez; E.F. Castillo; O. Almazán, Biofuels: environment, technology and food security, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 13, 1275-1287, 2008.
- [57] D. K. Mishra, Selection of candidate plus phenotypes of *Jatropha curcas* L. using method of paired comparisons, *Biomass. Bioenerg.* 31, 497-502, 2007.
- [58] J. Heller, *Physic nut. Jatropha curcas* L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops, IPGRI, Rome, 1996, 66 p.
- [59] M. S. Firdaus; A. Husni; M. Hanif; A. S. Safiee; M. R. Ismail, Carbon sequestration potential in soil and biomass of *Jatropha curcas*, en 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Australia, 2010, p 62.65.

- [60] M. S. Firdaus; M. H. A. Husni, Planting *Jatropha curcas* on Constrained Land: Emission and Effects from Land Use Change, *ScientificWorldJournal*. 2012, 1-8, 2011.
- [61] W. G. Albuquerque; L. S. Severino; N. E. M. Beltrao; C. A. V. Azevedo; J. L. Da Silva, Growth and Biomass Allocation of *Jatropha curcas* Plants as Influenced by Nitrogen Under Different Soil Moisture Regimes, *Res. on Crops*. 14, 928-934, 2013.
- [62] C. Srinivasarao; K. P. R. Vittal; B. Venkateswarlu; S. P. Wani; K.L. Sahrawat; S. Marimuthu; S. Kundu, Carbon stocks in different soil types under diverse rainfed production systems in tropical India. *Commun. Soil Sci. Plant. Anal.* 40, 2338–2356, 2009.
- [63] C. A. Hunt, Carbon sinks and climate change: forests in the fight against global warming, Edward Elgar Publishing, USA, 2009, 223 p.
- [64] K. Openshaw, A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise, *Biomass. Bioenerg.* 19, 1-15, 2000.
- [65] D. A. King, Tree form, height growth, and susceptibility to wind damage in *Acer saccharum*. *Ecology*. 67, 980-990, 1986.
- [66] M. T. Ter-Mikaelian; M.D. Korzukhin, Biomass equations for sixty-five North American tree species, *Forest. Ecol. Manag.* 97, 1-24, 1997.
- [67] K. D. Montagu; K. Düttmer; C. V. M. Barton; A. L. Cowie, Developing general allometric relationships for regional estimates of carbon sequestration-an example using *Eucalyptus pilularis* from seven contrasting sites, *Forest. Ecol. Manag.* 204, 115-129, 2005.
- [68] M. F. Ker, Tree biomass equations for seven species in southwestern New Brunswick, CFS Information Report M-X-114, Maritimes Forest Research Centre, Canadian Forestry Service, 1980.
- [69] B. F. Clough, K. Scott, Allometric relationships for estimating above-ground biomass in six mangrove species. *Forest. Ecol. Manag.* 27, 117-127, 1989.

- [70] D. I. Warton; I.J. Wright; D.S. Falster; M. Westoby, Bivariate line-fitting methods for allometry, *Biol. Rev.* 81, 259–291, 2006.
- [71] M. Latif; M. Rafii Yusop, M. Motiur Rahman; M. Bashar Talukdar, Microsatellite and minisatellite markers based DNA fingerprinting and genetic diversity of blast and ufra resistant genotypes. *C. R. Biol.* 334, 282–289, 2011.
- [72] N. Abdullah; M. Rafii Yusop; M. Ithnin; G. Saleh; M. Latif, Genetic variability of oil palm parental genotypes and performance of its' progenies as revealed by molecular markers and quantitative traits. *C. R. Biol.* 334, 290–299, 2001.
- [73] R. Gohil; J. Pandya, Genetic evaluation of *Jatropha* (*Jatropha curcas* Linn.) genotypes, *J. Agric. Res.* 47, 221–228, 2009.
- [74] S. H. Tams; E. Bauer; G. Oettler; A. E. Melchinger; C. Schön, Prospects for hybrid breeding in winter triticale: II. Relationship between parental genetic distance and specific combining ability, *Plant. Breed.* 125,331–336, 2006.
- [75] U. Gullberg; B. E. Frankow-Lindberg; O. J. Gomez; M. W. Blair, Molecular and phenotypic diversity of common bean landraces from Nicaragua, *Crop. Sci.* 44,1412-1418, 2004.