



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

**POSTGRADO EN RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
PRODUCCIÓN DE SEMILLAS**

INDICADORES DE MADUREZ FISIOLÓGICA, CALIDAD FISIOLÓGICA Y
PERFIL QUÍMICO EN SEMILLA DE *Jatropha curcas* L.

JOSÉ TRINIDAD ZAVALA HERNÁNDEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUICITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2014

La presente tesis titulada: “Indicadores de madurez fisiológica, calidad fisiológica y perfil químico en semilla de *Jatropha curcas* L.”, realizada por el alumno: José Trinidad Zavala Hernández, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

POSTGRADO EN RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

PRODUCCIÓN DE SEMILLAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. LEOBIGILDO CÓRDOVA TÉLLEZ

ASESOR:



DR. JORGE MARTÍNEZ HERRERA

ASESOR:



M.C. JUAN CÉLESTINO MOLINA MORENO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Abril de 2014

RESUMEN GENERAL

INDICADORES DE MADUREZ FISIOLÓGICA, CALIDAD FISIOLÓGICA Y

PERFIL QUÍMICO EN SEMILLA DE *Jatropha curcas* L.

José Trinidad Zavala Hernández, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2014

Jatropha curcas L. ha adquirido gran importancia debido a su uso potencial en la elaboración de biodiesel; no obstante, no existe un paquete tecnológico para la producción de semilla. En este estudio se cuantificaron indicadores de madurez fisiológica, la calidad fisiológica y perfil químico durante el desarrollo de semilla de *J. curcas*. En una plantación de cuatro años de edad, se evaluaron dos periodos de fructificación y diferentes fechas de cosecha bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se marcaron flores femeninas en antesis para cosechar cada 7 días hasta que el exocarpo presentó dehiscencia. En fruto y semilla se midió el diámetro, longitud, peso fresco y relación diámetro/longitud. Además en semilla se cuantificó peso seco y contenido de humedad, así como lípidos totales, proteína cruda, cenizas y perfil de ácidos grasos, y en semillas desecadas a la sombra el peso volumétrico, el peso de mil semillas, viabilidad, germinación, índice de velocidad de emergencia; adicionalmente en el fruto se registró cambios en coloración. La madurez fisiológica o máximo peso seco (654.1 y 639.2 mg/semilla) ocurrió 75 y 78 días después de antesis (dda), con un contenido de humedad de 42.70 y 36.38 %, para el primer y segundo periodo de fructificación. En el fruto el diámetro aumentó hasta 68 y 57 dda, la longitud 75 y 64 dda y peso fresco 75 y 68 dda. En semilla el diámetro aumento hasta 75 y 64 dda, la longitud, peso fresco y peso de mil semillas hasta 75 y 68 dda, y peso volumétrico hasta 75 dda. La máxima calidad fisiológica se alcanzó a los 75 dda, con viabilidad de 95 y 97 %,

germinación de 92 y 97 % e índice de velocidad de emergencia de 3.08 y 2.80, para el primer y segundo periodo de fructificación, respectivamente. Estas variables mostraron una alta correlación con la madurez fisiológica de la semilla. A los 75 y 78 dda se alcanza el máximo contenido de lípidos totales (54.67 y 61.78 %) y proteína cruda (24.24 y 23.11 %) para el primer y segundo periodo de fructificación, respectivamente. Los ácidos grasos saturados de mayor concentración en esas fechas de cosecha son palmítico (14.89 y 13.36 %) y esteárico (8.91 y 13.28 %), y los insaturados oleico (34.59 y 36.21 %) y linoleico (39.37 y 35.07 %). El ácido palmítico tiende a disminuir, mientras el oleico y linoleico a incrementar conforme la semilla se cosecha en un estado de madurez más avanzado. Los caracteres de semilla mostraron una alta correlación con la madurez fisiológica (75 dda), que coinciden con el color amarillo del fruto, y en consecuencia pueden considerarse indicadores de dicho estado fisiológico. La máxima calidad fisiológica, contenido de lípidos totales y ácido oleico y linoleico de la semilla ocurre en madurez fisiológica.

Palabras clave: *Jatropha curcas* L., madurez fisiológica, calidad fisiológica, perfil químico.

GENERAL ABSTRACT

**INDICATORS OF PHYSIOLOGICAL MATURITY, PHYSIOLOGICAL QUALITY,
AND CHEMICAL PROFILE ON *Jatropha curcas* L. SEED**

José Trinidad Zavala Hernández M.Sc.

Colegio de Postgraduados, 2014

Jatropha curcas L. has become important due to its potential use in the elaboration of biodiesel; however, there is not a technological procedure for seed production. In this study, physiological maturity indicators, physiological quality, and seed chemical profile were quantified. In a four-year-old plantation were evaluated two flowering periods and several harvest stages under a complete block design, with three replications. Female flowers were labeled at anthesis and then harvested at different developmental stages (every 7 days) until the fruit became dehiscent. In fruit and seed, diameter, length, relationship diameter/length, and fresh weight were measured. In addition, in seed was quantified dry weight and moisture content, total lipids, crude protein, ashes, and fatty acid profile. Furthermore, changes in fruit color was recorded. In dry seed, volumetric weight, thousand seed weight, viability, germination, and emergence rate index were determined. Physiological maturity or maximum dry matter (654.1 and 639.2 mg/seed) occurred 75 and 78 days after anthesis (daa), with 42.70 and 36.38 % seed moisture content, for the first and second flowering period. In the fruit, the diameter increased up to 68 and 57 daa, the length 75 and 64 daa, and the fresh weight 75 and 68 daa. In seed, the diameter increased up to 75 and 64 daa, the diameter, length, fresh weight, and 1000 seed weight up to 75 and 68 daa, and the weight volume up to 75 daa. The maximum physiological quality was reached at 75 daa, with viability of 95 and 97 %,

germination 92 and 97 %, emergence rate index of 3.08 and 2.80, for the first and second fruiting period respectively; these variables showed a high correlation with seed physiological maturity. The maximum concentration of total lipids (54.67 y 61.78 %) and proteins (24.24 y 23.11 %) was achieved 75 and 78 daa, for the first and second fruiting period, respectively. The saturated fatty acid with highest concentration at these harvest date were palmitic (14.89 y 13.36 %) and stearic (8.91 y 13.28 %), while on unsaturated were oleic (34.59 y 36.21 %) and linoleic (39.37 y 35.07 %). The palmitic acid trend to decrease while oleic and linoleic to increase as the seed advanced in maturation. Seed characters had a high correlation with physiological maturity (75 daa), that coincide with the yellow color of the fruit, and therefore all of them can be regarded as an indicator of this physiological stage. Maximum seed physiological quality, total lipid content and oleic and linoleic acids are achieved at physiological maturity.

Keywords: *Jatropha curcas* L., physiological maturity, physiological quality, chemical profile.

DEDICATORIAS

A **mis padres:** Angelina Hernández Lemus y J. Trinidad Zavala Tenorio primeramente por darme la vida, en segundo lugar por enseñarme a nunca darme por vencido aunque las cosas cada vez parezcan más difíciles, ya llegará el momento en que todo sea recompensado y en tercer lugar por darme la oportunidad de tener todo lo que ellos no pudieron, como la educación, siendo para mí la mejor herencia que me pueden dejar.

A **mis hermanos (as):** Roberto, Rocío, Yeni y Jaime que siempre me han apoyado de una u otra forma en todo lo que han podido, dándome ese cariño y amor que solo ellos pueden expresar, animándome a ser cada día mejor y salir adelante siempre, por más difícil que parezca la situación. Nunca podré pagarles todo lo que han hecho por mí.

A **mis cuñados (a):** Leonel Corona, Argelia Moreno y Andrés González, pues de una u otra manera ya forman parte de la familia, el amor que les expresan a mis hermanas y hermano se los agradezco infinitamente.

A **mis sobrinas (o):** Andrea, Joselin, Brenda, Nancy, Valeria, Galia, José Luis, Andrés Emmanuel, pues son el motor que impulsa a sus padres para salir adelante de todos los problemas que se les presentan en el camino, además que han regresado la alegría a la casa de sus abuelos que ya hacía falta.

Una especial dedicatoria a mi abuelito; † José Hernández Hernández, que en paz descansa y sé que desde donde quiera que se encuentre siempre nos manda sus bendiciones. También a mi abuela † Ángela Tenorio Juárez que en paz descansa. Así como a los que aún se encuentran con vida; Aurora Lemus Castro, Miguel Zavala Zavala.

MUY SINCERAMENTE

JOSÉ TRINIDAD ZAVALA HERNÁNDEZ.

AGRADECIMIENTOS

Al **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**, por haberme dado la oportunidad de continuar formándome en sus instalaciones y lograr un objetivo más en mi vida.

Al **CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACYT)**, por el apoyo económico brindado para culminar satisfactoriamente este grado académico.

Al **DR. LEOBIGILDO CÓRDOVA TÉLLEZ**, por su confianza, paciencia, consejos, asesorías y acertadas observaciones para llevar el trabajo a buen término, pero ante todo por haberme dado la oportunidad de ser su amigo, darme ánimos y consejos cuando parecía que el camino se obscurecía durante mi estancia.

Al **DR. JORGE MARTINEZ HERRERA**, porque siempre estuvo atento a asesorarme en todos los momentos que fue necesario y por compartir conmigo la esencia de sus grandes conocimientos que seguramente me serán muy útiles en la práctica.

Al **M.C. JUAN C. MOLINA MORENO**, por su confianza, amistad y sus aportaciones durante el desarrollo del presente trabajo.

Al **M.C. JULIO ARTURO ESTRADA GÓMEZ**, por la confianza y amistad que depositó en mí y que hizo de mi estancia en el Colegio una etapa aún más placentera.

Al **DR. AMALIO SANTACRZ VARELA**, por su amistad y apoyo durante el desarrollo del presente trabajo.

A los **PROFESORES DEL PROGRAMA DE SEMILLAS**, que gracias a su conocimiento de diversos temas han contribuido a mi formación académica, profesional y humana, no tengo más que estar agradecido con ustedes durante toda mi vida.

A la **DRA. CRISTIAN JIMÉNEZ MARTÍNEZ** del Instituto Politécnico Nacional-Escuela Nacional de Ciencias Biológicas por el apoyo en el laboratorio de Química de Alimentos, para la determinación del análisis químico proximal.

A la **DRA. TERESITA MARTÍN DEL CAMPO** y **DRA. ANABERTA CARDADOR MARTÍNEZ** del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, campus Querétaro, por las facilidades otorgadas dentro del laboratorio de Investigación de Biotecnología de Lácteos, para la determinación del perfil de ácidos grasos y llevar a buen término el presente trabajo.

A **JUAN HERRERA**, por su amistad, apoyo y contribuir con su experiencia para llevar a buen término esta investigación y hacer más amena mi estancia en el Colegio.

A la **SRA. ALICIA**, por su apoyo en la realización de múltiples tramites durante mi estancia en el Colegio.

Al **ING. EVARISTO GENIS CAMPOS**, quien nos facilitó su parcela para la realización del presente estudio.

A **mis amigos**; todas aquellas personas que siempre han estado al pendiente de lo que sucede a mí alrededor y siempre estarán en la mejor disposición para ayudarme: **Vir Mor, Lucy, Jazzz, Cristian, Bárbara, Edith, Miguel, Fide**, Erick, Braulio, Edgardo, Yolis, Roca, Don Robert, Joel, Gaby, Sr. Vicente, Sra. Elvia, **M.C. Pedro Ponce, Ing. Ascencio** y a todos los amigos que no puse sus nombres por falta de espacio.

A todos ustedes las más sinceras **GRACIAS!!!**

CONTENIDO

RESUMEN GENERAL	ii
GENERAL ABSTRACT	iv
LISTA DE CUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	x
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1. Planteamiento del problema	1
2. Objetivos específicos	6
3. Hipótesis	6
4. Revisión de literatura	
4.1.Descripción general	6
4.2.Aspectos generales de producción	11
4.3. Desarrollo y maduración de la semilla	14
5. Literatura citada	18
CAPÍTULO I. INDICADORES DE MADUREZ FISIOLÓGICA EN SEMILLAS DE <i>Jatropha curcas</i> L.	29
1. RESUMEN	29
2. ABSTRACT	30
3. INTRODUCCIÓN	31
4. MATERIALES Y MÉTODOS	33
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
6. CONCLUSIONES	45
7. LITERATURA CITADA	46
CAPÍTULO II. CALIDAD FISIOLÓGICA Y PERFIL QUÍMICO DURANTE EL DESARROLLO DE SEMILLAS DE <i>Jatropha curcas</i> L.	50
1. RESUMEN	50
2. ABSTRACT	51
3. INTRODUCCIÓN	52
4. MATERIALES Y MÉTODOS	54
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
6. CONCLUSIONES	68
7. LITERATURA CITADA	69
CONCLUSIONES GENERALES	73

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Correlación de Pearson para peso seco de semilla con el resto de las variables.....	44
Cuadro 2. Composición del perfil de ácidos grasos durante el desarrollo de semillas de <i>Jatropha curcas</i> L.....	66
Cuadro 3. Correlación de Pearson para peso seco de semilla con el resto de las variables fisiológicas y perfil químico.....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Partes importantes de la planta de <i>J. curcas</i> : a) rama florecida; b) corteza; c) venas de la hoja; d) flor con pistilo; e) flor con estambres; f) corte transversal de un fruto inmaduro; g) frutos; h) corte longitudinal de un fruto; i) semilla.....	9
Figura 2. Condiciones de temperatura máxima, mínima, media y precipitación durante el periodo de estudio. Datos de la estación agrometeorológica el Hospital, Cuautla, Morelos. Año 2012.....	33
Figura 3. Cinética del contenido de humedad y peso seco durante el desarrollo de semilla de <i>J. curcas</i> : Primer (A) y segundo (B) periodo de floración y fructificación.....	37
Figura 4. Cambios durante el desarrollo del fruto de <i>J. curcas</i> en diámetro (A), longitud (B), relación diámetro/longitud (C) y peso fresco (D).....	39
Figura 5. Cambios durante el desarrollo de semilla de <i>J. curcas</i> en diámetro (A), longitud (B), relación diámetro /longitud (C) y peso fresco (D).....	41

Figura 6. Cambio en peso volumétrico (A) y peso de mil semillas (B) durante el desarrollo de semillas de <i>J. curcas</i>	42
Figura 7. Cambio en color de fruto y semilla de <i>Jatropha curcas</i> L. durante su desarrollo.....	43
Figura 8. Cinética de peso seco y contenido de agua durante el desarrollo de semilla de <i>J. curcas</i> L.: Primer (A) y segundo (B) periodo de floración y fructificación.....	60
Figura 9. Cambios fisiológicos durante el desarrollo de semillas de <i>J. curcas</i> L. en viabilidad (A), germinación (B), índice de velocidad de emergencia (C) y peso seco de parte aérea de plántula (D).....	63
Figura 10. Cinética de acumulación de lípidos, proteínas y cenizas durante el desarrollo de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L.: Primer (A) y segundo (B) periodo de floración y fructificación.....	65

INTRODUCCIÓN GENERAL

1. Planteamiento del problema

El sector de la energía constituye un área de prioridad para todas las naciones, pues es un hecho que su consumo ha estado unido al progreso económico de la humanidad. Sin embargo, el rápido incremento de su costo y el reconocimiento de la condición finita de las reservas de los combustibles fósiles, ha provocado un aumento gradual en el interés mundial en los recursos de energía renovable (Toral *et al.*, 2008).

México es un país megadiverso y reconocido como uno de los centros de origen y domesticación de varias especies cultivadas en la actualidad; no obstante, el estudio de los recursos fitogenéticos ha sido muy limitado (Hernández, 1971). Ante la problemática actual del cambio climático, escases de combustibles fósiles, mayor demanda de alimentos, entre otros, resulta indispensable explorar la diversidad vegetal para identificar especies que puedan contribuir a solucionar las necesidades actuales de la humanidad. Los combustibles fósiles han sido el centro de discusión en los últimos años, no solo por su escases, sino también por la contaminación que estos generan; razón por la cual a nivel mundial se están buscando fuentes alternas de energía (De La Vega, 2008).

Muchas especies vegetales producen aceites aptos para la combustión, con residuos biodegradables (Stumpf *et al.*, 2003). Un ejemplo de éstas es el piñón (*Jatropha curcas* L.), que almacena un alto contenido de aceite en su semilla (Arruda *et al.*, 2004), y partes de la planta se usan popularmente con fines medicinales (Adolf *et al.*, 1984), así como su semilla para consumo humano de manera tradicional (Bautista, 2010). Pertenece a la familia

Euphorbiaceae, con distribución en los trópicos y subtropical en nuestro país (Martínez *et al.*, 2006). Además de *Jatropha curcas* L., existen otras 44 especies reportadas para México, de las cuales 77 % son endémicas (Martínez, *et al.*, 2002), y se encuentran en diferentes condiciones climáticas y edáficas del territorio mexicano, indicativo de la riqueza genética del género.

La industria de *J. curcas* se encuentra en sus primeras etapas, con una superficie cultivada limitada. FAO/IPGRI (2010) reporta que en el ámbito mundial, en el año 2008 se cultivaron 900,000 ha, que estiman se incremente a 12.8 millones de hectáreas para 2015. En México, la planta se encuentra de manera silvestre en los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Yucatán, Quintana Roo, Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Sinaloa, Sonora, Puebla, Hidalgo y Morelos, y en Michoacán, Chiapas, Sinaloa, Oaxaca, Campeche, Yucatán, Sonora, Veracruz, Tabasco y Guerrero, se han desarrollado proyectos productivos desde el año 2006 (Zamarripa *et al.*, 2009; Martínez *et al.*, 2010).

A pesar del establecimiento de plantaciones de la especie a nivel comercial, no existe hasta el momento un paquete tecnológico de manejo agronómico para la producción de semilla con fines agroindustriales y mucho menos con fines de reproducción. La planta es perenne e inicia la producción de frutos después de un año de establecimiento y cada fruto contiene tres semillas (Basha y Sujatha, 2007). La semilla botánica es la forma principal de establecer plantaciones comerciales, que se recomienda sea de alta calidad fisiológica que permita asegurar la germinación y plantas vigorosas.

En el proceso reproductivo, después de la fertilización del óvulo, el ovario comienza a aumentar rápidamente de tamaño, acompañado de cambios de color, peso, contenido de humedad, olor, sabor, textura y consistencia, así como del incremento de carbohidratos, ácidos orgánicos, minerales y compuestos nitrogenados. La madurez del fruto y de la semilla constituye la última fase del proceso reproductivo, y se caracteriza por la presencia de profundos cambios físicos y químicos en ambas estructuras (Lutte *et al.*, 1993).

La semilla se considera madura fisiológicamente cuando el peso seco es máximo y el método más preciso para determinar ese estado fisiológico es mediante el seguimiento de la acumulación de materia seca después de anthesis (Egli, 1998). No obstante, esto resulta difícil y laborioso en el campo, pues requiere de mediciones consecutivas, por lo que es recomendable asociar éste estado fisiológico con otros cambios físicos de la semilla y/o fruto, que sean de rápida y fácil cuantificación.

Por lo anterior, se han propuesto indicadores de madurez fisiológica para varias especies cultivadas, la línea de leche (Afuakwa y Crookston, 1984) y capa negra (Daynar y Duncan, 1969) para maíz, contenido de humedad y peso seco en trigo (Calderini *et al.*, 2000); así como indicadores visuales, cambio de color de algunos órganos o frutos, entre estos, el cambio de color verde de la vaina en soya (Tekrony *et al.*, 1979); la aparición de color café en semilla de canola (Elías y Copeland, 2001); en semillas forestales se emplean como indicadores características físicas, el color del fruto, el tamaño y el olor (Sena y Gariglio, 1998).

Existe controversia en usar como sinonimia la madurez fisiológica y máxima calidad fisiológica de la semilla; Ellis y Pieta Filho (1992) consideran que la máxima acumulación de peso seco describe el final del periodo de llenado de las semillas y no necesariamente coincide con la máxima germinación y vigor. Tekrony y Egli (1997) reportan que en especies de fruto seco (colza, maíz, soya, trigo), la máxima calidad en cuanto a germinación y vigor se logra algún tiempo antes de, o al mismo tiempo de la máxima acumulación de peso seco, mientras que en especies de frutos carnosos (tomate, pimiento) se produce después de éste estado fisiológico.

La formación del embrión, el endospermo y la testa, así como la adquisición de otras características se dividen en tres fases durante el desarrollo de la semilla: histodiferenciación, acumulación de reservas y secado (Taiz y Zeiger, 2006). Los compuestos de reserva específicos acumulados por las semillas varían entre especies, pero se agrupan generalmente en carbohidratos, lípidos, proteínas y fitatos (Taiz y Zeiger, 2006).

Las grasas y aceites son reservas importantes de carbono en muchas semillas de oleaginosas, por ejemplo soya, girasol, algodón, etc. (Conn *et al.*, 2011). El almacenamiento de lípidos ocurre en forma de triglicéridos que se concentran en cuerpos lipídicos u oleosomas dentro de la célula. Un triglicérido se compone de tres ácidos grasos, comúnmente ácido palmítico (16:0); oleico (18:1); linoleico (18:2); esteárico (18:0) y linolénico (18:3), y una molécula de glicerol (Bradford, 2004).

En la etapa de acumulación de reservas se sintetizan grandes cantidades de proteínas bajo el mando de diversos genes y éstas se acumulan en organelos llamados cuerpos proteicos (Bewley y Black, 1994; Bradford, 2004). Su función fisiológica es la de proveer esqueletos carbonados y nitrogenados que serán hidrolizados durante la germinación y el crecimiento de la semilla (Casey y Domoney, 1984). De acuerdo a su solubilidad se clasifican en albúminas, globulinas, prolaminas y glutelinas (Osborne, 1924).

Después de la madurez fisiológica comienza el deterioro de la semilla, que reduce la calidad fisiológica de la misma (Harrington, 1972; Delouche y Baskin, 1973), reflejado por reducciones en peso seco, poder germinativo y vigor (Popinigis, 1985), así como una reducción de la sanidad (Aguirre y Peske, 1988). En este sentido, el conocimiento de indicadores de madurez fisiológica y su relación con la calidad de la semilla permiten cosechar en el momento óptimo (Carvalho y Nakagawa, 2000).

En *Jatropha curcas* L., la etapa de floración y fructificación puede llegar a siete meses durante el año, que en consecuencia conlleva a una maduración heterogénea, de manera que el crecimiento de los últimos frutos continúa después de la maduración de los primeros (Saturnino *et al.*, 2005). Esto ocasiona mayor número de cosechas para recoger la producción, que incrementa la mano de obra y los costos asociados. Por lo que resulta necesario conocer el proceso de maduración y buscar indicadores que permitan definir la madurez fisiológica de la semilla y su relación con la calidad fisiológica y compuestos de reserva de interés agroindustrial.

2. Objetivos específicos

Determinar la madurez fisiológica de semilla de *J. curcas* mediante la máxima acumulación de peso seco e identificar características como tamaño, peso y color de fruto y semilla que sirvan de indicadores de ésta etapa fisiológica.

Identificar la máxima calidad fisiológica en semillas de *J. curcas*, así como la máxima acumulación de compuesto de reserva y su relación con la madurez fisiológica.

3. Hipótesis

El tamaño, peso y color de fruto y semilla, correlacionan con la máxima acumulación de peso seco y representan alternativas de indicadores de la madurez fisiológica de la semilla de *J. curcas*.

Durante el desarrollo de la semilla de *J. curcas*, la máxima viabilidad, germinación y vigor, así como la máxima acumulación de lípidos y proteínas coincide con la madurez fisiológica de la misma.

4. Revisión de literatura

4.1. Descripción general

El género *Jatropha* (Gr. *jatros*: médico; *trophe*: alimento) pertenece a la familia *Euphorbiaceae*; comprende aproximadamente 175 especies de hábitos suculentos, arbustos y árboles, algunos de hojas caducas, como *J. curcas* (Jongschaap *et al.*, 2007). En México se reportan 45 especies, de las cuales 77 % son endémicas (Martínez *et al.*, 2002). A *J. curcas* le llaman “La planta mágica”, porque representa una de las mejores fuentes de combustible

natural debido al alto contenido de aceite en su semilla. El nombre varía entre países, idiomas y dialectos, por ejemplo: nuez purgante, piñón, piñoncillo (México), tempate (Costa Rica y Nicaragua), habel meluk (Portugal), piñón manso (Brasil), piñón de leche o piñón de botija (Cuba), piñón (Argentina) (Martínez, 2005).

Las plantas de este género crecen de forma nativa en África, Norteamérica, y el Caribe, pero existe controversia en cuanto al centro de origen. Desde el 2007 la Universidad de Wageningen desarrolla un proyecto a nivel del genoma de muestras de *J. curcas* de diversas procedencias del mundo para tratar de elucidar el centro de origen (Jongschaap, 2007). No obstante, es muy probable que el centro de origen sea México y otros países de América Central (Heller, 1996). Schmook *et al.*, (1997) señalan que la especie era conocida y utilizada por los Mayas y sugieren que, desde el Caribe, fue probablemente distribuida por los navegantes portugueses a países de África, a través de Cabo Verde y Guinea Bissau, y también a países del sureste de Asia, como Indonesia, Malasia y Filipinas.

J. curcas tiene usos múltiples, con muchos atributos y potencial considerable (Kumar y Sharma, 2008). Varias partes de la planta se han utilizado en la medicina tradicional y con fines veterinarios por un largo tiempo (Duke, 1985a, 1985b). El aceite se ha utilizado como purgante, tratamiento de enfermedades de la piel y para aliviar dolores como los causados por reumatismo. Sus hojas se han utilizado contra la tos y como antiséptico después del parto (Heller, 1996). De esta planta se ha aislado una sustancia responsable de la cicatrización de heridas y propiedades anti-inflamatorias (Nata y Dutta, 1991). Diversos extractos de semilla y hoja mostraron propiedades de insecticida y fungicida (Nwosu y Okafor, 1995 y Liu *et al.*, 1997).

Actualmente el aceite de *J. curcas* ha llamado la atención por su uso potencial en la elaboración de biodiesel. Aunque éste puede ser usado directamente o mezclado con diésel de origen fósil en los motores diésel convencionales o motores diésel con parámetros adaptados, la producción de biodiesel a partir de aceite de *J. curcas* es producto del proceso de transesterificación en ésteres de etilo o metil ésteres, (Acthen *et al.*, 2008).

La distribución de *J. curcas* se restringe a los trópicos y subtrópicos, a elevaciones inferiores a 1,200 m, en matorral de áreas secas o húmedas, en planicies o colinas, con precipitaciones de 300 a 1,800 mm y temperaturas de 18 a 28°C; aunque se planta también en sitios con temperaturas de hasta 34°C y no requiere de un tipo de suelo especial (Martínez, 2005). Tolerancia períodos largos de sequía (tres a seis meses), prefiere suelos livianos y bien drenados, y se desarrolla normalmente en suelos áridos y semiáridos. En suelos pesados la formación de raíces se ve limitada (UNI, 1997; Torres, 2007).

La planta de *J. curcas* es perenne, que no ha sido descrita completamente y el conocimiento de sus características fenotípicas y genotípicas es limitado, pero se han descrito algunas características botánicas (Figura 1). Es un arbusto de crecimiento rápido que alcanza en promedio seis metros de altura, su corteza es blanco-grisácea y exuda un látex translúcido color ámbar o rojizo viscoso. Los tallos crecen de manera simpodial con una discontinuidad morfológica en cada incremento. Normalmente se forman cinco raíces de cada arbusto, una central y cuatro periféricas (Toral *et al.*, 2008).

Las hojas son de color verde, amplias y brillantes, largas y alternas, se forman generalmente con cinco a siete lóbulos acuminados poco profundos y grandes, tienen pecíolos largos con una longitud de 10 a 15 cm; anchura de 9 a 15 cm, de forma ovada, con nervaduras blanquecinas y salientes en el envés, casi lisas pero más o menos pilosas debajo de las nervaduras, las cuales caen durante la época seca (Guerrero, 2010).

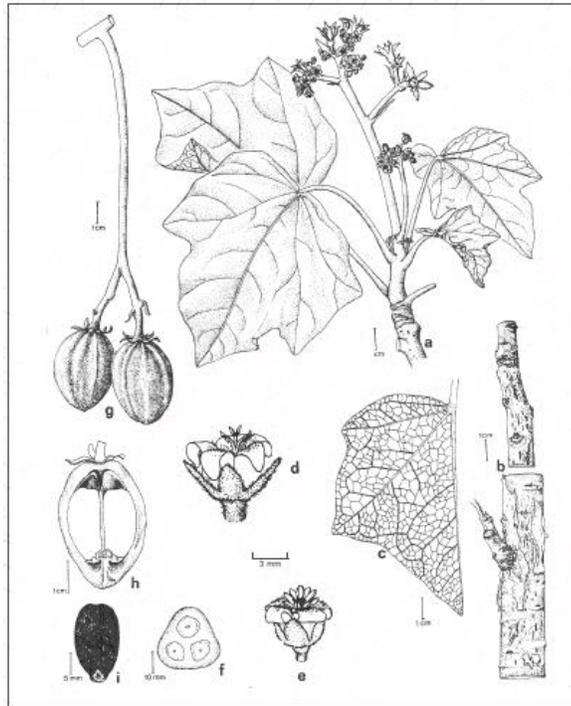


Figura 1: Partes importantes de la planta de *J. curcas*: a) rama florecida; b) corteza; c) venas de la hoja; d) flor con pistilo; e) flor con estambres; f) corte transversal de un fruto inmaduro; g) frutos; h) corte longitudinal de un fruto; i) semilla. Tomado de Heller (1996).

De acuerdo con Heller (1996) y Jongschaap *et al.*, (2007) la floración es monoica, con los órganos masculino y femenino en la misma planta; las inflorescencias se forman terminalmente en el axial de las hojas en las ramas, compuestas a manera de panícula, en la cual, el eje principal se ramifica una o más veces y puede sostener las umbelas. En flores hermafroditas se colocan diez estambres en dos espirales distintas de cinco cada uno en una

sola columna en el androceo. En el gineceo, tres estilos delgados son conatos en aproximadamente dos tercios de su longitud, dilatando al estigma bifurcado macizo.

La relación de flores masculinas y femeninas varía de 13.01 a 29.1 (Raju y Ezradanam, 2002a, 2002b), con 10 a 20 % y 80 a 90 % de flores femenina y masculinas, respectivamente; pero estas últimas disminuyen con la edad de la planta (Aker, 1997). El número de flores (masculinas más femeninas) por inflorescencia es entre 65.5 a 158.7, aunque estos valores pueden cambiar significativamente según el ecotipo (Santoso, 2008).

Ambas flores, son pequeñas (6 a 8 mm), verdoso-amarillas en su diámetro y pubescentes. Cada inflorescencia produce de 5 a 10 frutos. La longitud del pecíolo fluctúa entre 6 y 23 mm. Las flores femeninas presentan brácteas acuminadas y las masculinas, brácteas aovadas y pedicelos pubescentes (Torral *et al.*, 2008). Por otro lado, la flor femenina no necesariamente llega a convertirse en un fruto.

Los frutos son cápsulas drupáceas y ovoides. Después de la polinización se forma un fruto trilocular de forma elipsoidal. Los frutos son inicialmente verdes, que se tornan amarillo y posteriormente café oscuro o negro al final de la maduración. Las cápsulas de los frutos son de 2.5 a 4 cm de largo por 2 cm de ancho, elipsoidales y lisas, que al inicio son carnosas y dehiscentes al secarse (Mishra, 2009).

La semilla es relativamente grande; seca mide de 1.5 a 2.0 cm de largo y de 1.0 a 1.3 cm de diámetro; debajo de la envoltura de la semilla (tegumento) existe una película blanca cubriendo la almendra; el albumen es abundante, blanco, oleaginoso, con el embrión provisto

de dos largos cotiledones aplanados. El peso oscila entre 0.551 y 0.797 g, dependiendo de la variedad y del manejo agronómico, en proporción de 33.7 a 45 % de cascara y de 55 a 66 % de almendra. El volumen de aceite es de 35 a 40 % en la semilla con testa y 50 a 60 % en la almendra (Heller, 1996; Toral *et al.*, 2008).

4.2. Aspectos generales de producción

La industria de *Jatropha curcas* L. se encuentra en sus primeras etapas, FAO/IPGRI, (2010) reporta que en el año 2008 el cultivo cubría un área global de 900,000 ha aproximadamente; el 85 % (760,000 ha) en Asia, principalmente en India, China e Indonesia, seguido de África con 120,000 ha, mayormente en Madagascar, Zambia, Tanzania y Mozambique, y en Latinoamérica hay un estimado de 20,000 ha, donde sobresale Brasil. Se estima que la superficie plantada con *J. curcas* creció a 4.72 millones de hectáreas en el 2010 y se espera que alcance 12.8 millones de hectáreas en 2015. Para entonces, se estima que Indonesia será el productor más grande de Asia, con 5.2 millones de hectáreas, Ghana y Madagascar juntos con el área más grande de África (1.1 millones de ha), y Brasil como el productor más grande de Latinoamérica con 1.3 millones de hectáreas (Gexsi, 2008; FAO/IPGRI, 2010).

En México se estiman 2.6 millones de hectáreas con alto potencial para el cultivo de piñón, con altitud de 0 a 1,000 m, temperatura entre 18 y 28°C y precipitación pluvial entre 600 y 1,200 mm anuales (Zamarripa *et al.*, 2009). Los estados con mayor superficie óptima son Veracruz (377,491.0 ha), Guerrero (322,091.7 ha), Tamaulipas (311,148.0 ha), Sinaloa

(293,246.6 ha), Chiapas (182,411.3 ha), Oaxaca (181,634.6 ha), Jalisco (121,584.1 ha), Nuevo León (106,012.4 ha), Michoacán (94,440.4 ha), Nayarit (77,428.0 ha).

La producción de frutos y semillas en los árboles de *J. curcas* puede comenzar a partir del primer año en condiciones favorables, se estabiliza a partir del quinto año y puede durar en producción hasta 50 años (Nurcholis y Sumarsih, 2007; Priyanto, 2007). La floración inicia durante el período poco lluvioso y se observan dos picos, aunque en regiones permanentemente húmedas se presenta durante todo el año (Joker y Jepsen, 2003). Por lo tanto, la cosecha se realiza en varias ocasiones durante el año, debido a que no todos los frutos maduran al mismo tiempo (Jongschaap *et al.*, 2007).

Se han señalado varios factores que influyen en el amarre de fruto, Hartati *et al.*, (2009) señalan que la lluvia pesada reduce significativamente el amarre de frutos. Abdelgadir *et al.*, (2008) y Rianti *et al.*, (2010) reportaron que el amarre de frutos se incrementa significativamente con la introducción de insectos polinizadores (abejas, avispas, luciérnagas, hormigas y el escarabajo soldado) en la plantación de *Jatropha*. Saefudin y Pranowo (2006), señalan que la floración tiende a aumentar con un buen sistema de riego.

El desarrollo del fruto necesita aproximadamente 90 días de floración a madurez de la semilla. Cada inflorescencia rinde aproximadamente 10 frutos ovoides y cada uno de estos, por lo general, produce tres semillas negras de aproximadamente 2 cm de largo por 1 cm de diámetro (Heller, 1996); un kilogramo contiene entre 1,000 y 2,370 semillas.

Los rendimientos reportados en la literatura son variables, Mejía (2006) señala un rango entre 0.4 y 12.0 ton ha⁻¹ por año, mientras que Rijssenbeek (2006), reportan que el rendimiento varía entre 100 y 5,000 kg ha⁻¹, este último después del quinto año de producción (Jones y Miller, 1992; Hooda y Rawat, 2005). De 5 ton de semilla, 2 son de aceite y 1 de pasta residual rica en proteína (60 %) que puede ser utilizada en la alimentación animal como pollos, cerdos y conejos (Martínez, 2005; Parsons, 2005).

En algunos lugares las semillas no son comestibles ya que son consideradas tóxicas debido a la presencia de saponinas, lectinas, fitatos, inhibidores de tripsina, pero el principal compuesto tóxico es el éster de forbol, el cual confiere un efecto purgante a la semilla (Castillo *et al.*, 1991; Makkar *et al.*, 1997). Los ésteres de forbol, en algunas variedades de *J. curcas* nativas de México están casi ausentes, lo cual ofrece la posibilidad de incluir la semilla y pasta residual en productos destinados al consumo humano y animal directamente (Makkar y Becker, 1999).

Los frutos son recolectados cuando comienzan a abrir. Se ha reportado que la exposición directa al sol tiene efectos negativos en la viabilidad de las semillas y por ello se recomienda el secado a la sombra. Una vez que la semilla es separada de los frutos, se debe secar hasta que el contenido de humedad sea de 5 a 7 % y almacenadas en contenedores impermeables al aire (Ellis *et al.*, 1990; FAO/IPGRI, 1994). A temperatura ambiente pueden retener la viabilidad al menos un año, aunque por su alto contenido de aceite no deben almacenarse por un tiempo demasiado largo.

La mala cosecha ha sido el factor limitante y de gran importancia para la comercialización de este cultivo (ERIA, 2010; Biswas *et al.*, 2006; Heller, 1996). Los frutos de *J. curcas* maduran heterogéneamente, lo que conduce a una cosecha laboriosa y demandante de mano de obra y tiempo, pues se seleccionan solo los frutos adecuados para el procesamiento. Sivapragasam y Puteh (2008), señalan que una persona cosecha aproximadamente 6 kg h⁻¹, por lo que 80 % de los costos de producción corresponden a cosecha y manejo poscosecha de las semillas. La cosecha mecánica ha sido complicada debido a la maduración heterogénea y hábito de crecimiento de la planta.

Las plagas y enfermedades en la planta de *J. curcas* en estado silvestre, no se reflejan como un problema. Sin embargo, en condiciones extensivas de monocultivo podrían representar un problema severo. Actualmente, las más frecuentes son el insecto *Podagrica spp* y el hongo *Cercospera spp.* (Toral *et al.*, 2008). Francis *et al.*, (2013) mencionan que no existe diferencia en cuanto al ataque de plagas y enfermedades en una planta del ecotipo no tóxico y el tóxico.

4.3. Desarrollo y maduración de la semilla

La iniciación de la floración y el final de la antesis son los puntos de partida del desarrollo de la semilla. En general, después de la fecundación el ovulo aumenta de tamaño rápidamente a consecuencia del crecimiento y desarrollo tanto de los tegumentos como del endospermo y el embrión (Lutte *et al.*, 1993). Este aumento de tamaño va acompañado de cambios de color, peso, contenido de humedad, textura, olor y consistencia, así como del

incremento de carbohidratos, ácidos orgánicos, minerales y compuestos nitrogenados; lo cual ocurre también en los frutos y semilla de *J. curcas*.

Uno de los cambios durante el desarrollo y maduración en semilla de *J. curcas*. es la acumulación de aceite, cuyos resultados han sido diversos. Wanita y Hartono (2006) reportan que el contenido de aceite de *J. curcas* fue de 15.19, 17.32, 26.04, 26.91 y 26.28 % a los 35, 40, 45, 50 y 55 días después de la antesis, respectivamente. Que corresponde con los colores de fruto: verde, verde con amarillo, totalmente amarillo, amarillo con café y café, respectivamente. Santoso (2008) reporta 8, 20, 40, 50 y 43 % de contenido de aceite a los 25, 35, 45, 55 y 65 días después de antesis, respectivamente. Sowmya *et al.*, (2012) reportan 12.74% de aceite en frutos verdes y en café-negro 43.75 %, mientras que Annarao *et al.*, (2008) señalan 0.3 y 24.9 % a los 12 y 37 días después de floración.

Los principales ácidos grasos del aceite de *J. curcas* son: C16:0, ácido palmítico (14.54 %); C18:0, ácido esteárico (6.30 %); C18:1, ácido oleico (42.02 %) y C18:2, ácido linoleico (35.38 %). Otros ácidos presentes pero en menor cantidad son: ácido cúprico, ácido palmitoleico (C16:1), ácido linolénico (C18:3), ácido araquídico (C20:0), cis-11-ácido eicosenoico (C20:1) y cis-11,14-ácido eicosadienoico (C20:2) (Foidl *et al.*, 1996; Augusto *et al.*, 2002; Akintayo 2004; Azam *et al.*, 2005; Martínez *et al.*, 2006; Berchmans y Hirata 2008; Annarao *et al.*, 2008; y Achten *et al.*, 2008). Annarao *et al.*, (2008) señalan que en semillas de *J. curcas* la cantidad de triglicéridos fluctuó entre 33.9 y 24.8 %.

Debido a que el contenido de aceite es uno de los principales compuestos de interés, se ha recomendado cosechar los frutos considerando los días después de anthesis, lo cual no ha sido consistente. Heller (1996), Wiesenhutter (2003), Nurcholis y Sumarsih (2007), Priyanto (2007) y Hambali *et al.*, (2008) recomiendan cosechar a los 90 días, mientras que Santoso (2008) a los 55, Wanita y Hartono (2006) después de 45 días y (Annarao *et al.*, 2008) a los 37 días.

El contenido de proteína también varía con la madurez de la semilla, Sowmya *et al.*, (2012) reportan 20.53 % de proteína en frutos de color verde y 24.64 % en aquellos de color amarillo.

Otra serie de cambios de interés en semilla con fines reproductivos son los relacionados con la calidad fisiológica, entre otros. Una semilla es capaz de germinar solo cuándo el embrión ha alcanzado su máximo tamaño, la deposición de reservas ha cesado y la maduración y la deshidratación de la semilla están en su punto óptimo (Bryant, 1985). Durante el desarrollo de la semilla, el ácido abscísico (ABA) previene la germinación prematura (Bryant, 1985). Existe una relación inversa entre los niveles de ABA y los niveles de citocininas y giberelinas (AG_3) durante el proceso de rompimiento de la latencia (Copeland, 1976). Otros inhibidores son los taninos, localizados en la testa, de alto peso molecular (500 a 3,000 Daltons), que contienen grupos de hidroxilos-fenólicos con la capacidad de formar enlaces transversales entre proteínas y otras macromoléculas que inhiben su actividad enzimática (Copeland, 1976).

La madurez fisiológica (MF) se define como la máxima acumulación de peso seco, que representa el fin de la fase de acumulación de reservas en la semilla (Campton, 1990). En algunas especies existe coincidencia entre la MF y la máxima viabilidad y vigor (Popinigis, 1985; Carvalho y Nakagawa, 2000); por lo que existe controversia en usarlos como sinonimia. Cuando existe coincidencia de estos dos componentes Harrington (1972) lo refiere como MF. En cambio cuando ocurre primero el máximo peso seco, a éste se denomina madurez de masa (Pieta Filho y Ellis, 1991). En general, en la MF el contenido de humedad oscila entre 30 y 50 % (Campton, 1990). Después de la madurez fisiológica, inician los procesos de deterioro de la semilla (Pieta Filho y Ellis, 1991), que se ven reflejados por reducción de la viabilidad, capacidad germinativa, vigor, entre otros. Por lo tanto, la determinación de la etapa de máxima calidad de semilla durante el desarrollo del fruto es esencial, especialmente en especies de plantas tales como *J. curcas* que tienen períodos de fructificación indefinidos (Silip, 2010).

La semilla de *J. curcas* adquiere el máximo potencial fisiológico, con 89 % de germinación, cuando los frutos están de color amarillo (Kaushik, 2003). Dagar *et al.*, (2004), encontraron una correlación positiva entre el aumento de la germinación de las semillas y el peso fresco, con un máximo cuando la semillas alcanzó una masa inferior o igual a 300 mg. No obstante, el peso fresco varía considerablemente, Annarao *et al.*, (2008) señalan que el peso fresco de la semilla durante el desarrollo varió de 32.4 mg a 1,061 mg. Germaque *et al.*, (2002) reportaron que la mayor germinación y vigor de las semillas se obtuvo al cosechar los frutos al principio de la dehiscencia, de color amarillo con manchas púrpura, semillas de color

verde-amarillo y con contenido de humedad de 69.02 % y 50.98 % en los frutos y semillas, respectivamente.

Un componente importante de la calidad fisiológica que ayuda a estimar el comportamiento de las semillas en el campo es el vigor; la ISTA (2005) lo define como la suma total de aquellas propiedades de la semilla que determinan el potencial de su actividad y comportamiento durante la germinación y emergencia. Para estimar este componente se han desarrollado varias pruebas, entre ellas la tinción con tetrazolio, conductividad eléctrica, envejecimiento acelerado, velocidad de emergencia, germinación en frío (ISTA, 2005; Moreno, 1996).

Por todo lo anterior, resulta de interés conocer los cambios físicos de la semilla y fruto, que sean de rápida y fácil cuantificación y que permitan definir el momento oportuno de cosecha, donde se tenga la máxima calidad fisiológica y contenido de aceite.

5. Literatura citada

Abdelgadir H A, Johnson S D, Van Staden J (2008). Approches to improve seed production of *Jatropha curcas* L. South African J Botany. 74: 359.

Achten W M J, Vercot L, Franken Y J, Mathijs E, Singh V P, Aerts A, Muys B (2008). *Jatropha* bio-diesel production and use. Biomass & Bioenergy 32:1063-1084.

Adolf W, Opferkuch HJ, Hecker E (1984). Irritant phorbol derivatives from 4 *Jatropha* species. Phytochemistry; 23 (1): 129 - 132.

Afuakwa J J, Crookston R K (1984) Using the kernel milk line to visually monitor grain maturity in maize. Crop Sci. 24:687-691.

- Aguirre R, Peske S (1988).** Manual para el beneficio de semillas. Cali, Colombia: CIAT, 356
- Aker C L (1997).** Growth performance of *J. curcas*. In: Biofuels and industrial production from *Jatropha curcas*. Gurbitz GM, Mittelbach M, Trabi M. (Eds). Pp.2-18, DBV Graz.
- Akintayo E T (2004).** Characteristics and composition of *Parkia biglobbosa* and *Jatropha curcas* oils and cakes. Bioresour. Technol. 92:307-310.
- Annarao S, Sidhu O P, Roy R, Tuli R, Khetrupal C L (2008).** Lipid profiling of developing *Jatropha curcas* L. seeds using 1H NMR spectroscopy. Bioresource Technol. 99:9032-9035. www.elsevier.com/locate/biotech.
- Arruda F P, Beltão N E M, Andrade A P, Pereira W E, Severino L S (2004).** Cultivo de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) como alternativa para o semi-árido nordestino. Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas, v.8, n.1, p.789-799.
- Augustus G D P S, Jayabalan M, Seiler G J (2002).** Evaluation and bioinduction of energy components of *Jatropha curcas*. Biomass & Bioenergy 23:161-164.
- Azam M M, Waris A, Nahar N M (2005).** Prospect and potential of fatty acid methyl esters of some non-traditional seed oil for use as biodiesel in India. Biomass & Bioenergy 29.
- Basha S D, Sujatha (2007).** Inter and intra population variability of *Jatropha curcas* L. characterized by RAPD and ISSR markers and development of population –specific SCAR markers. Euphytica 375-386.
- Bautista R E (2010).** Tolerancia a la desecación y caracterización química de semillas de piñón (*Jatropha curcas* L.) colectadas en el Totonacapan. Tesis de Maestría. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

- Berchmans H J, Hirata S (2008).** Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids. *Bioresources Technol* 99:1716-1721.
- Bewley J D, Black M (1994).** Seeds: physiology of development and germination. 2ed. New York: Plenum Press, 445p.
- Biswas S, Kaushik N, Srikanth G (2006).** Biodiesel: technology and business opportunities - an insight. In: Singh B, Sawaminthan R, Ponraj V. editors. Proceedings of the biodiesel conference towards energy independence – focus on *Jatropha*. Hyderabad, India, Jun 9 - 10, 2006. New Delhi: Rashtrapati Bahwan. 303-330 p.
- Bradford K J (2004).** Seed Production and Quality. Department of Vegetable Crops. University of California. Davis, California, U.S.A. 134 p.
- Bryant, J. A. (1985).** Seed physiology. Edward Arnold. Ltd, London, 76p.
- Calderini D F, Abeledo L G, Slafer G A (2000).** Physiological maturity in wheat based on kernel water and dry mater. *Agronomy Journal* 92, 895–901.
- Campton, D. E. (1990).** Application of biochemical and molecular markers to analysis of hybridization. Electrophoretic and isoelectric focusing techniques in fisheries management. CRC Press, Boca Raton, Florida. D. H. Whitmore, editor. 240–264p.
- Casey R, Domoney C (1984).** The genetic of legume storage proteins *Phil. Trans. R. Soc. London B* 304:349-358.
- Castilo H L, Arenas O M, Jiménez A (1991).** Composición química y aspectos nutricionales de la harina desgrasada del piñón mexicano *Jatropha curcas*. *Acta de ciencia y tecnología* 73-74.
- Carvalho N M, Nakagawa J (2000).** Sementes: ciência, tecnologia e produção. 4. Ed. Funep, Jaboticabal, 588 p.

- Conn E E, Stumpf K P, Bruening G, Doil H R (2011).** Bioquímica Fundamental. 4 ed. Limusa Ed. México. 285p.
- Copeland O L (1976).** Principles of seed science and technology. Burgess Publishing Company. Minnesota, USA 343 p.
- Dagar J C, Bhagwan H, Kumar Y (2004).** Seed germination studies of *Salvadora persica* and *Jatropha curcas*. Indian Journal of Forestry, v.27, n.3, p.283-289.
- Daynard T B, Duncan W G (1969).** The black layer and grain maturity in corn. Crop Sci.9.
- De La Vega J (2008).** *Jatropha curcas* L. Agro – Energía. Grupo Editorial 3W México SA de CV. www.3wmexico.com/images/JatrophaResumen.pdf
- Delouche J C, Baskin C C (1973).** Accelerated aging techniques for predicting the relative storability of seeds lots. Seed Science and Technology, 1:427-452.
- Duke J A (1985A).** CRC handbook of medicinal herbs. CRC Press. Inc. Boca Raton, FL.
- Duke J A (1985B).** Medicinal plants. Sci 229:1036.
- Egli D B (1998).** Seed biology and the yield of grain crops. New York: CAB_International. p.178.
- Elias S G, Copeland L O (2001).** Physiological and harvest maturity of canola in relation to seed quality. Agronomy Journal, 93:1054-1058.
- Ellis R H, Pieta Filho C (1992).** The development of seed quality in spring and winter cultivars of barley and wheat. Seed Science Research, 2 Ed, 9-15.
- Ellis R H, D T Hong, Roberts H E (1990).** Effect of moisture content and method of rehydration on the susceptibility of pea seeds to imbibitional damage. Seed Science and Technology 18: 131–137.

- [ERIA] **Economic Research Institute For Asean (2010)**. Biodiesel Fuel Trade Handbook 2010. Economic Research Institute for ASEAN and East Asia. 63-66p.
- FAO/IPGRI (1994)** Genebank Standards. FAO/IPGRI. Rome, Italy. 13 p.
- FAO/IPGRI (2010)** Jatropha: A smallholder bioenergy crop, the potential for pro-poor development. *Intetrated Crop Management*, vol 8. Rome. doi: <http://www.fao.org/docrep/012/i1219e/i1219e.pdf> Diversity and distribution of genus *Jatropha* in Mexico (2012).
- Foidl N, Foidl G, Sanchez M, Mittelbach M, Hackel S (1996)**. *Jatropha curcas* L. as a source for the production of biofuel in Nicaragua. *Bioresources Technol* 58:77-82.
- Francis G, Oliver J, Sujatha M (2013)**. Non-toxic jatropha plants as a potential multipurpose multi-use oilseed crop. *Industrial Crops and Products* 42:397-401.
- Gexsi (2008)**. Global Market Study on *Jatropha*. Final Report. Prepared for the World Wide Fund for Nature (WWF). London/Berlin: Global Exchange for Social Investment.
- Germaque R C R, Davide A C, Faria J M C (2002)**. Indicadores de maturidade fisiologica de sementes de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.). *Cerne*, v.8, n.2.
- Guerrero J A (2010)**. Tesis “Caracterización Morfológica y Agronómica de la Colección Nacional de Germoplasma de Piñón (*Jatropha curcas* L.), de Corpoica-La Libertad. Universidad de los Llanos (Unillanos). Villavicencio, Colombia. 150 p
- Hambali E, Suryani A, Dandang, Haryadi, Hanafie H, Reksowardojo I K, Rivai M, Ishanur M, Suryadarma P, Tjitrosemito T H, Prawitasari T, Prakoso T, Purnama W (2008)**. *Jatropha curcas* as biodiesel feedstock. Surfactant and Bioenergy Research Centre LPPM IPB.
- Harrington J F (1972)**. Seed storage longevity. In. *Seed Biology*, (ed. T.T. Koslowsky), vol. 3, pp. 145-245, Academic Press, New York.

- Hartati R S, Setiawan A, Heliyanto B, Pranowo D, Sudarsono (2009).** Keragaan morfologi dan hasil 60 individu jarak pagar (*Jatropha curcas* L.) terpilih di Kebun Percobaan Pakuwon, Sukabumi. *J Littri* 15: 152 – 161.
- Heller J (1996).** Physic nut; *Jatropha curcas* L. IPGRI IPK Italy Germany © International Plant Genetic Resources Institute, p. 24-29.
- Hernández Xolocotzi E (1971).** Exploración etnobotánica y su metodología. Colegio de Postgraduados –Escuela Nacional de Agricultura- SAG, Chapingo, México
- Hooda N, Rawat V R S (2005).** Role of bio-energy plantations for carbon dioxide mitigation with special reference to India. Disponible en: <http://www.acstrategy.org/simiti/HoodaRawat.pdf>.
- ISTA, 2005.** International Rules for Seed Testing. Edit (2005)
- Joker D, Jepsen J (2003).** Seed leaflet. *Jatropha curcas* L. Disponible en: http://www.dfsc.dk/pdf/Seedleaflets/jatropha_curcas_83.pdf.
- Jones N, Miller J H (1992).** *Jatropha curcas*. A multipurpose species for problematic sites. World Bank, Washington DC, USA. ASTAG Technical papers – Land resources 1, 12 pp.
- Jongschaap R E E, Corre W J, Bindraban P S, Brandenburg W A (2007).** Claims and facts of *Jatropha curcas* L. Plant Research International, Wageningen. www.pri.wur.nl.
- Kaushik N (2003).** Effect of capsule maturity on germination and seedling vigour in *Jatropha curcas*. *Seed Science and Technology*, 31, 449-454.
- Kumar A, Sharma S (2008).** An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review. *Industrial Crops & Products* 28:1-10.

- Liu S Y, Sporer F, Wink M, Jourdane J, Hernning R, Li Y L, Ruppel A (1997).** Anthraquinones in *Rheum palmatum* and *Rumex dentatus* (Polygonaceae), and phorbol ester in *Jatropha curcas* (Euphorbiaceae) with molluscicidal activity against the schistosome vector snails *Oncomelania*, *Biomphalaria* and *Bulinus*. *Trop Med Int Health* 2:179-188.
- Lutte U, Kluge M, Bauer G (1993).** Botánica. Madrid: McGrawHill, 572 p.
- Makkar H P S, Becker K, Sporer F, Wink M (1997).** Studies on nutritive potential and toxic constituents of different provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. *Food Chem.*
- Makkar H P S, Becker K (1999).** Nutritional studies on rats and fish (carp *Cyprinus carpio*) fed diets containing unheated and heated *Jatropha curcas* meal of a nontoxic provenance. *Plant foods for human nutrition* 52:31-36.
- Martínez G, Jiménez R, Cruz R, Juárez A, García R, Cervantes A, Mejía R (2002).** Los géneros de la familia Euphorbiaceae en México. *Anales del Instituto de Biología, UNAM, Ser. Bot.* 73(2):155-281
- Martínez J (2005).** El Piñón, una planta nativa de México con potencial alimentario y agroindustrial. Disponible en: <http://hypatia.morelos.gob.mx/No12/pinon.html>.
- Martínez H J, Siddhuraju P, Francis G, Davila O G, Becker K (2006).** Chemical composition, toxic/antimetabolic constituents, and effect of different treatments on their levels, in four provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. *Food Chem* 96:80-89.
- Martínez H J, Martínez A A L, Makkar H, Francis G, Becker K (2010).** Agroclimatic Conditions, Chemical and Nutritional Characterization of Different Provenances of *Jatropha Curcas* L. from Mexico. *European Journal of Scientific Research* 39:396-407

- Mejía F (2006).** Cultivo de *Jatropha curcas* y construcción de una planta de biodiesel en San Esteban, Olancho, Honduras.
- Mishra D (2009).** Selection of candidate plus phenotypes of *Jatropha curcas* L. using method of paired comparisons. *Biomass and Bioenergy*. 33: 542-545.
- Moreno E (1996).** Análisis físico y biológico de semillas agrícolas. 3ed. Instituto de Biología. UNAM. México. 222 p.
- Nata L K, Dutta S K (1991).** Extraction and purification of curcain, a protease from latex of *Jatropha curcas* L. *Ind J Pharm Sci* 50:125-127.
- Nurcholis M, Sumarsih S R I (2007).** Jarak pagar dan pembuatan biodisel (*Jatropha* and making of biodiesel) “(in Indonesian)”. Kanisius Publication. Yogyakarta.
- Nwosu M O, Okafor J I (1995).** Preliminary studies of the antifungal activities of some medicinal plants against *Basidiobolus* and some other pathogenic fungi. *Myocoses* 38:191-195.
- Osborne, T.B. 1924.** The vegetable proteins ed. Longmans, Green New York pp. 452.
- Parsons K (2005).** *Jatropha* in Africa: fighting the desert & creating wealth. EcoWorld. Disponible en: <http://www.ecoworld.org/Home/Articles2.cfm?TID=367>.
- Pieta Filho C, Ellis R H (1991).** The development of seed quality in spring barley in four environments. Germination and longevity. *Seed Science Research*, 1, 163-177.
- Popinigis F (1985).** Fisiologia da semente. 2ª ed. Brasilia. 289 p.
- Priyanto U (2007).** Menghasilkan biodiesel jarak pagar berkualitas (Making of biodiesel from high *Jatropha* quality) “(In Indonesia)”. PT AgroMedia Pustaka Publication.

- Raju JSA, and Ezradanam V. 2002a.** Flowering phenology and sexual system in *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae). Proc. AP Akademi Sci 6:203-206.
- Raju AJS, Ezradanam V. 2002b.** Pollination ecology and fruiting behaviour in a monoecious species, *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae). Cur Sci 83:1395-1398.
- Rianti P, Suryobroto B, Triatmowidi (2010).** Diversity and effectiveness of insect pollinators of *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae). HAYATI J Biosci 17(1):38-42.
- Rijssenbeek W, De Jongh J (2006).** General data on *Jatropha*. In *Jatropha handbook* first draft. FACT Foundation. www.fact-fuels.org.
- Santoso B B (2008).** Karakterisasi morfologi dan agronomi serta kandungan minyak jarak pagar (*Jatropha curcas* L.). PhD dissertation. Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Sabah.
- Saturnino H M, Pacheco D D, Kakida J, Tominaga N, Gonçalves N P (2005).** Cultura do pinhão-mansô (*Jatropha curcas* L.). Informe Agropecuario, v.26, n.229.
- Schmook B, Serralta P L, Ku Vera J (1997).** *Jatropha curcas*: distribution and uses in the Yucatan Peninsula. Proceedings of First International Symposium on Biofuel and Industrial Products from *Jatropha curcas* and other Tropical Oil Seed Plants. Managua. Nicaragua
- Saefudin Pranowo D (2006).** Pengaruh interval penyiraman dan pemberian mulsa terhadap pertumbuhan dan pembungaan tanaman jarak pagar (*Jatropha curcas* L.). Prosiding Lokakarya II Status Teknologi Tanaman Jarak Pagar (*Jatropha curcas* L.). Pusat Penelitian dan Pengembangan Perkebunan.
- Sena C M, Gariglio M A (1998).** Sementes florestais: colheita, beneficiamento e armazenamento. Brasília, DF: IBAMA, 27p.
- Silip J J (2010).** Duración del ciclo de vida y madurez heterogeneidad de *Jatropha curcas* L. Journal of Desarrollo Sostenible, Toronto, v.3, p.291 -295.

- Sivapragasam A, Puteh M (2008).** Agronomic and management practices of jatropha cultivation in Malaysia. The first national workshop on renewable energy from *Jatropha curcas* the way forward. 7 – 8 August 2008, Eastwood Valley Golf and Country Club, Miri, Sarawak, Malaysia.
- Stumpf R P, Holderied K, Sinclair M (2003).** Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom depths. *Limnology and Oceanography* 48, 547–556
- Sowmya K J 1, Rame G, Balakrishna P, Gururaja Rao M R (2012).** Effect of fruit maturity stages on seed quality parameters in jatropha (*Jatropha curcas* L.). *Indian Journal of Plant Sciences*. Vol. 1 (1) April-June, 85-90 pp.
- Taiz L y Zeiger E (2006).** *Fisiología Vegetal*. 3th Ed. Sinauer Associates, Inc., Publishers. Sunderland, Massachusetts. 764 p.
- Tekrony D M y Egli D B (1997).** Accumulation of seed vigour during development and maturation. In: *Basic and Applied Aspects of Seed Biology*, Kluwer Academic Publishers, Boston 369-384 p.
- Tekrony D M, Egli D B, Balles J, Pfeiffer T, Fellows R J (1979).** Physiological maturity in soybean. *Agronomy Journal*, Madison, v.71, n.5, p.771-775
- Toral O C, Iglesias J M, Montes de Oca S, Sotolongo J A, García S, Torsti M (2008).** *Jatropha curcas* L., una especie arbórea con potencial energético en Cuba. *Pastos y Forrajes*. 31: 191-207.
- Torres C (2007).** *Jatropha curcas*: desarrollo fisiológico y técnico. En: Boletín CUBAENERGÍA. Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía. La Habana, Cuba. 7 p. Disponible en: www.cubanergia.cu.

- UNI (1997).** Producción de Ester Metílico del Tempate (EMAT) como sustituto del combustible Diésel. Boletín PETRONIC. Universidad Nacional de Ingeniería. Gobierno de Austria.
- Wanita Y P, Hartono J (2006).** Pengaruh tingkat kematangan buah terhadap kadar minyak Jarak Pagar (*Jatropha curcas* L.) (The effect of fruit maturity degree on oil content of *Jatropha curcas* L.) Paper presented at Lokakarya II: Status Teknologi Tanaman Jarak Pagar. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perkebunan, Department Pertanian.
- Wiesenhutter J (2003).** Use of the physic nut (*Jatropha curcas* L.) to combat desertification and reduce poverty. CCD Project Document. Bonn, GTZ.
- Zamarripa C A, Martínez H J, De La Piedra C R, Olivera De Los S A (2009).** Biocombustibles: perspectivas de producción de biodiesel a partir de *Jatropha curcas* L., en el trópico de México. Folleto Técnico. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Rosario Izapa. Tuxtla Chico, Chiapas, México. 30 p.

CAPÍTULO I. INDICADORES DE MADUREZ FISIOLÓGICA EN SEMILLAS DE *Jatropha curcas* L.

RESUMEN

La madurez fisiológica de la semilla ocurre cuando la acumulación de materia seca es máxima y se relaciona con rendimiento y calidad fisiológica, lo que resalta la importancia de conocer ese estado fenológico. En este trabajo se determinó la madurez fisiológica de semillas de *Jatropha curcas* L. en función de la máxima acumulación de materia seca, así como su relación con indicadores potenciales de caracteres físicos de fruto y semilla. En una plantación de cuatro años de edad se evaluaron dos periodos de fructificación en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se marcaron flores femeninas en antesis para posteriormente cosechar cada 7 días hasta que el exocarpo presentó dehiscencia. En fruto y semilla se midió el diámetro, longitud, peso fresco y relación diámetro/longitud. Además en semilla se cuantificó peso seco y contenido de humedad, y en semillas secadas a la sombra el peso volumétrico y el peso de mil semillas; adicionalmente en el fruto se registró cambios en coloración. La madurez fisiológica o máximo peso seco (654.1 y 639.2 mg/semilla) ocurrió 75 y 78 días después de antesis (dda), con un contenido de humedad de 42.70 y 36.38 %, para el primer y segundo periodo de fructificación. En el fruto el diámetro aumentó hasta 68 y 57 dda, la longitud 75 y 64 dda y peso fresco 75 y 68 dda. En semilla el diámetro aumento hasta 75 y 64 dda, la longitud, peso fresco y peso de mil semillas hasta 75 y 68 dda, y peso volumétrico hasta 75 dda. Los caracteres de semilla mostraron una alta correlación con la madurez fisiológica (75 dda), que coinciden con el color amarillo del fruto, y en consecuencia pueden considerarse indicadores de dicho estado fisiológico.

Palabras clave: *Jatropha curcas* L., acumulación de peso seco, contenido de humedad, indicadores de madurez, madurez fisiológica.

PHYSIOLOGICAL MATURITY INDICATORS IN SEEDS OF *Jatropha curcas* L.

ABSTRACT

The Physiological maturity of seed is attained at the maximum dry matter and it is related with yield and physiological quality of the seed; this highlights the importance of knowing this phenological stage. In this study, the phase of physiological maturity was determined in *Jatropha curcas* L. seeds base on maximum dry matter, as well as the potential relationship of this stage with physical characteristics of fruit and seed. In a plantation of four year old, two fruiting periods were evaluated under a complete block design, with three replications. Female flowers were labeled at anthesis, which then were harvested at different developmental stages (every 7 days) until the fruit becomes dehiscent. In fruit and seed, diameter, length, relation diameter/length, and fresh weight, were quantified. In additions, in seed dried matter and moisture content, as well as volumetric weight and thousand seed weight in seed dried under shaded conditions, were measured; moreover, the changes in color of the fruit were recorded. Physiological maturity or maximum dry matter (654.1 and 639.2 mg/seed) occurred 75 and 78 days after anthesis (daa), with 42.70 and 36.38 % seed moisture content, for the first and second fruiting period. In the fruit, the diameter increased up to 68 and 57 daa, the length 75 and 64 daa, and the fresh weight 75 and 68 daa. In seed, the diameter increased up to 75 and 64 daa, the diameter, length, fresh weight, and 1000 seed weight and up to 75 and 68 daa, and the weight volume up to 75 daa. The physical characteristics of the seed had a high correlation with physiological maturity (75 daa), that coincide with the yellow color of the fruit, and therefore be regarded as indicators of this physiological stage.

Keywords: *Jatropha curcas* L., accumulation of dry matter, moisture content, maturity indicators, physiological maturity.

INTRODUCCIÓN

Jatropha curcas L. es una especie perenne y monoica de la familia Euphorbiaceae (Heller, 1996; Beltrão, 2005). La semilla tiene un gran potencial para la producción de biodiesel, debido al alto contenido de aceite (Arruda *et al.*, 2004). La planta inicia a producir frutos después de un año de establecimiento, cada fruto contiene tres semillas, comúnmente conocidas como “Piñon” (Basha y Sujatha, 2007). En 2008 en el ámbito mundial se cultivaron 900 mil hectáreas, principalmente en Asia, con un incremento estimado a 12.8 millones de hectáreas para 2015 (FAO/IPGRI, 2010). En México este cultivo no se reporta en las estadísticas de producción, pero en Michoacán, Chiapas, Sinaloa, Oaxaca, Campeche, Yucatán, Sonora, Veracruz, Tabasco y Guerrero se han desarrollado proyectos productivos desde el año 2006 (Zamarripa *et al.*, 2009; Martínez *et al.*, 2010). La forma principal de establecer plantaciones comerciales es mediante semilla botánica, la cual debe ser de alta calidad fisiológica que permita asegurar la germinación y plantas vigorosas.

La semilla se considera fisiológicamente madura cuando el peso seco es máximo, etapa que puede coincidir con la más alta germinación y vigor (Harrington, 1972). A partir de entonces, comienza el deterioro, que reduce la calidad fisiológica de la semilla (Harrington, 1972; Delouche y Baskin, 1973). Ellis y Pieta Filho (1992) consideran que la máxima acumulación de peso seco describe el final del periodo de llenado de las semillas y no necesariamente coincide con la máxima germinación y vigor. Tekrony y Egli (1997) reportan que en especies de fruto seco (colza, maíz, soya, trigo), la máxima calidad en cuanto a germinación y vigor se logra antes de, o al mismo tiempo de la máxima acumulación de peso

seco, mientras que en aquellas de frutos carnosos (tomate, pimiento) se produce después de esta etapa.

La acumulación de peso seco como indicador de la madurez fisiológica, resulta difícil de medir en el campo, por lo que es recomendable asociarlo a otros cambios físicos de la semilla y/o fruto. En la recolección de semillas forestales se emplean como indicadores características físicas como el color del fruto, el tamaño y el olor (Sena y Gariglio, 1998). El conocimiento de la relación de color con la calidad de la semilla permite cosechar en el momento óptimo (Carvalho y Nakagawa, 2000).

En *J. curcas* la etapa de floración y fructificación puede durar siete meses durante el año, que en consecuencia conlleva a una maduración heterogénea, donde el crecimiento de los últimos frutos continúa después de la maduración de los primeros (Saturnino *et al.*, 2005). Esto ocasiona mayor número de cosechas, que incrementa la mano de obra y los costos asociados. En este contexto, conocer la formación de la semilla y determinar la mejor oportunidad de cosecha es fundamental en la producción de semilla de *J. curcas*.

En el presente trabajo se registró la cinética de acumulación de peso seco para determinar la madurez fisiológica de la semilla de *J. curcas*, así como cambios físicos en fruto y semilla, que permitan identificar algún indicador asociado a dicho estado fisiológico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar del experimento

Se utilizó una plantación de *J. curcas* de cuatro hectáreas, ubicada en la localidad de Anenecuilco, municipio de Ayala, Morelos, México, a 1,270 msnm. El clima de la región se clasifica según Koppen, modificado por Enriqueta García (1964), como cálido subhúmedo, con veranos calurosos, temperatura media de 24°C y precipitación anual promedio de 800 mm. La Figura 1 muestra el comportamiento de algunas variables ambientales mensualmente.

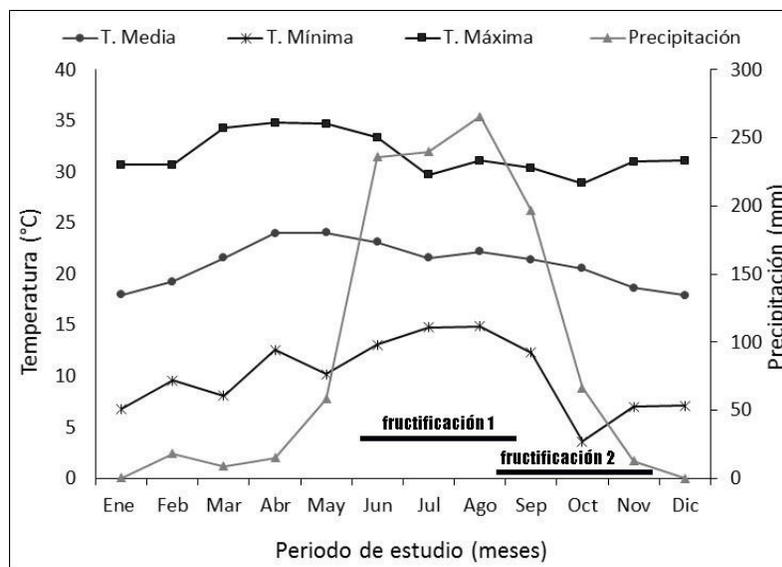


Figura 2. Condiciones de temperatura máxima, mínima, media y precipitación durante el periodo de estudio. Datos de la estación agrometeorológica el Hospital, Cuautla, Morelos. Año 2012. (http://galileo.imta.mx/FUPROMOR/rep_men_adm.php).

Tratamientos y diseño experimental

La plantación es del ecotipo no tóxico, de semilla proveniente de Pueblillo, Veracruz, que en el año de estudio (2012) se encontraba en el cuarto año de producción, con arreglo en hileras a 3 m de separación y 3 m entre plantas, con una densidad de población de 1108

plantas por hectárea. Se eligieron al azar tres bloques (116 plantas por bloque), de forma perpendicular a la pendiente del terreno, considerado un factor importante de variación.

Aun cuando la planta florea y forma frutos de mayo a noviembre de cada año, en observaciones previas se detectaron dos periodos de floración y fructificación bien definidos, el primero de Junio a Septiembre y el segundo de Agosto a Noviembre, por lo que se consideró pertinente realizar las mediciones en ambos periodos, ya que las condiciones de precipitación y temperatura en que ocurre el desarrollo y maduración de fruto y semilla son diferentes (Figura 2).

En cada periodo se marcaron flores femeninas abiertas, y posteriormente se colectaron los frutos cada dos días hasta que estos alcanzaron 1.0 cm de diámetro. Las colectas posteriores a dicho estadio de maduración fueron de 600 frutos por bloque y se efectuaron cada siete días hasta que el fruto alcanzó una coloración marrón (90 días).

En el segundo periodo de floración se realizó un mayor número de muestreos, en consecuencia, se consideraron experimentos independientes, es decir uno por periodo. El diseño experimental corresponde a Bloques Completos al Azar con tres repeticiones, con las fechas de muestreo como tratamientos.

Variables respuesta

Los frutos cosechados se transportaron al laboratorio en una hielera para evitar deshidratación y medir las siguientes variables: Contenido de humedad (%) y peso seco (mg),

para lo cual se extrajeron 10 semillas de los frutos por bloque y se secaron a 103°C hasta peso constante (peso seco), con el peso fresco y peso seco se calculó el contenido de humedad en base húmeda con la ecuación propuesta por Bewley y Black (1994); diámetro (mm), longitud (mm), relación diámetro/longitud de fruto, se midió en 15 frutos y 10 semillas por bloque con un Vernier digital marca Mitutoyo con precisión de 0.01 mm; peso fresco de fruto y semilla, se evaluaron en 15 frutos y 10 semillas por bloque en una balanza analítica marca Ohaus, con precisión de 1 mg; color de fruto, se observó en 15 frutos por muestreo utilizando la tabla MUNCELL.

Una muestra de frutos por tratamiento y bloque fue secada a la sombra y se extrajo la semilla para cuantificar de acuerdo a la ISTA (2005), con ligeras modificaciones: peso volumétrico, tres repeticiones de 250 semillas, que se pesaron en una balanza analítica marca Ohaus, para posteriormente determinar el volumen en una probeta graduada de 500 ml, el resultado se expresa en kg HL⁻¹; peso de 1000 semillas, se pesaron ocho repeticiones de 100 semillas en una balanza analítica, que se extrapoló a 1000 semillas.

Análisis estadístico

Los datos se analizaron con el paquete SAS V.9.0. (SAS Institute, 2002), mediante el modelo de Bloques Completamente al Azar y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey ($\alpha= 0.05$), también se realizó un análisis de correlación de Pearson del peso seco contra el resto de las variables cuantitativas. Los promedios se presentan de manera gráfica que ilustran de manera clara los resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La acumulación de peso seco en la semilla sigue una tendencia similar en los dos periodos de fructificación (Figura 3, A y B). Las observaciones realizadas antes de 45 y 35 dda no muestran cambios significativos para el primer y segundo periodo de fructificación, posiblemente por coincidir con la fase de histodiferenciación (Bradford, 2004; Taiz y Zaiger, 2006); en seguida inicia la fase de acumulación de reservas, donde se observa un rápido incremento en peso seco, con una tasa absoluta de crecimiento (TAC) de 21.52 y 14.59 mg/día hasta los 75 y 78 dda, momento en que ocurrió el máximo peso seco (654.1 y 639.2 mg/semilla) y por ende la madurez fisiológica, para el primer y segundo periodo de fructificación, respectivamente, tal como lo señala Bradford (2004). La misma tendencia en la acumulación de peso seco fue observada por Xu *et al.*, (2011), pero el máximo peso seco, similar al del presente estudio, se alcanzó a los 55 dda, que difiere de lo reportado (75 y 78 dda) en esta investigación, debido posiblemente al genotipo y condiciones climáticas. Posteriormente inicia la desecación, donde se aprecia una ligera reducción (no significativa) del peso seco hasta los 90 dda. Esta reducción ha sido observada en otros cultivos (TeKrony y Egli, 1997; Dias *et al.*, 2006), en *J. curcas* (Silva *et al.*, 2011), quienes lo asocian a una respiración elevada por el alto contenido de humedad de la semilla. Heller (1996) señala que el desarrollo del fruto necesita aproximadamente 90 días de floración a madurez de la semilla, mayor al reportado en el presente trabajo.

El contenido de humedad en la semilla mostró cambios similares en los dos periodos de fructificación, cuya tendencia también se relaciona con las fases de desarrollo de la semilla (Figura 3, A y B). Durante la histodiferenciación (antes de 40 dda) no se detectaron cambios

significativos, con alrededor de 92 % de humedad en ambos periodos de fructificación. Durante la acumulación de reservas el contenido de humedad disminuye a una tasa de 1.68 y 1.30 % por día hasta 75 y 78 dda, con 42.70 y 36.38 %, que coincide con la madurez fisiológica, para el primer y segundo periodo de fructificación, respectivamente. En la fase de desecado, después de madurez fisiológica, la pérdida de humedad ocurre a tasas de 2.32 y 1.89 % por día para el primer y segundo periodo de fructificación, respectivamente.

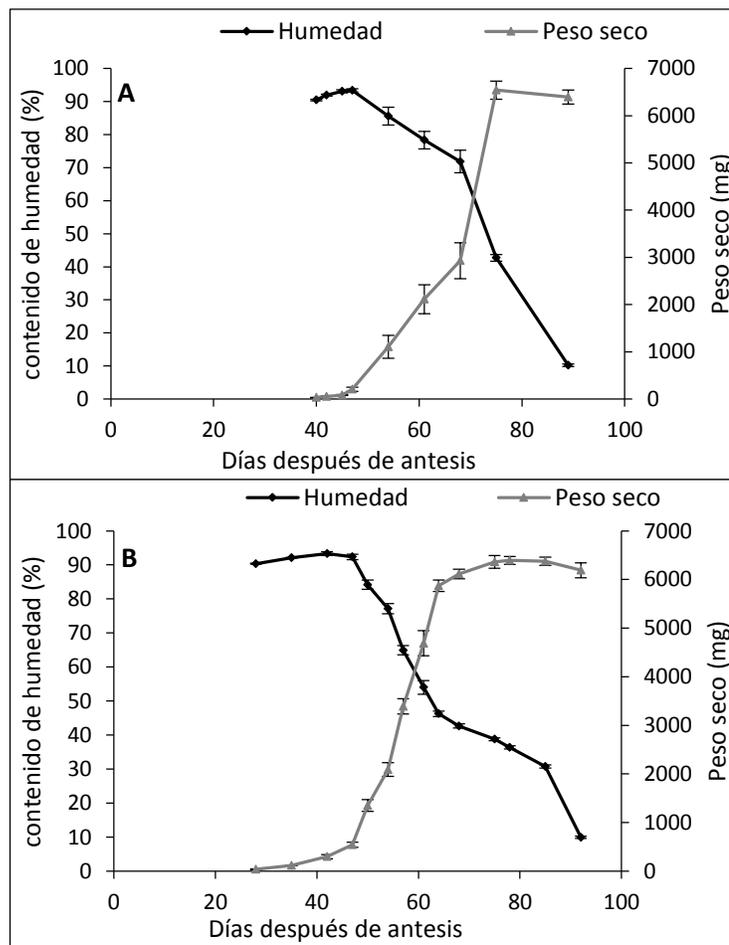


Figura 3. Cinética del contenido de humedad y peso seco durante el desarrollo de semilla de *J. curcas*: Primer (A) y segundo (B) periodo de floración y fructificación.

La tendencia observada ha sido señalada por Zanakis *et al.*, (1994). La rápida reducción observada es proporcional al depósito de los compuestos de reserva, que en gran medida, sustituyen los espacios ocupados por agua (Bradford, 2004). Después de este punto, la reducción de agua se da por la búsqueda de equilibrio higroscópico entre el contenido de agua de la semilla con la humedad relativa del medio ambiente (Ahrens y Peske, 1994). En semillas ortodoxas, el contenido de humedad en MF oscila entre 30 y 50 % (Campton, 1990), en el que se encuentran los valores obtenidos en el presente estudio.

En las variables correspondientes a fruto (Figura 4) no fue posible su medición en los primeros 30 a 40 dda, que coincide con la histodiferenciación donde el crecimiento es mínimo. Posteriormente, en la acumulación de reservas, el diámetro aumenta a una TAC de 0.78 y 0.71 mm/día, de 38 a 68 dda y 21 a 57 dda. Durante la fase de desecación ocurre una reducción de 0.32 y 0.27 mm/día hasta la última medición (90 dda), para el primer y segundo periodo de fructificación, respetivamente. La longitud se incrementa a una TAC de 0.70 y 0.71 mm/día, entre 40 y 75 dda y 28 y 64 dda, seguido de una reducción en la fase de secado de 0.44 mm y 0.29 mm/día hasta la última medición, para el primer y segundo periodo de fructificación, respetivamente. La relación diámetro/longitud también aumentó 0.0050 y 0.0044 por día, en el primer y segundo periodo de floración, pero con una alta variación que dificulta definir con claridad el punto máximo, sobretodo en el segundo periodo de fructificación (Figura 4 A, B y C).

El peso fresco del fruto, durante la fase de acumulación de reservas, aumenta a una TAC de 0.35 y 0.39 g/día, con un máximo de 13.02 y 16.45 g a los 75 y 68 dda, seguido de un

descenso durante la fase de secado hasta 2.85 y 3.25 g, para el primer y segundo periodo de fructificación, respectivamente (Figura 4 D). El peso fresco de fruto máximo registrado ocurre cerca de la madurez fisiológica en ambos periodos de fructificación. No se encontraron reportes de cambios en estas variables en la literatura que permitan discutir al respecto.

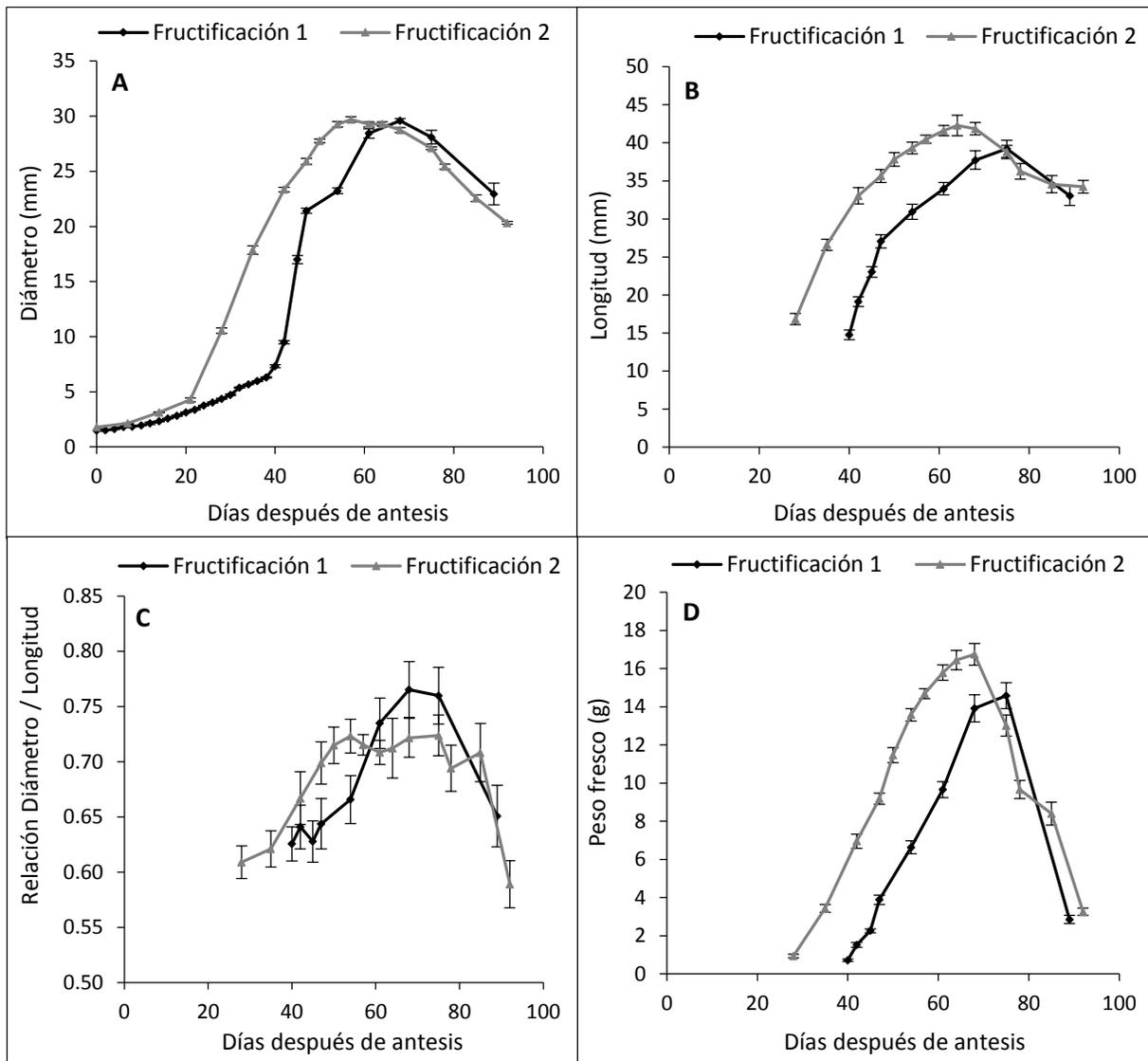


Figura 4: Cambios durante el desarrollo del fruto de *J. curcas* en diámetro (A), longitud (B), relación diámetro/longitud (C) y peso fresco (D).

Las variables de semilla manifestaron cambios diferenciales a medida que trascurrió el tiempo de desarrollo y maduración (Figura 5). Durante la acumulación de reservas el diámetro aumenta a una TAC de 0.18 y 0.19 mm/día hasta 75 y 64 dda, con valores máximos de 9.46 y 9.35 mm; que posteriormente tienden a disminuir sin efecto significativo en la fase de desecación, para el primer y segundo periodo de fructificación, respectivamente (Figura 5 A). La misma tendencia se manifiesta en longitud, que incrementa a una TAC de 0.37 y 0.36 mm/día hasta 75 y 64 dda, donde alcanzó los máximos valores (20.84 y 20.70 mm), con una reducción posterior a 18.25 y 18.33 mm, para el primer y segundo periodo de fructificación (Figura 5 B). La relación diámetro/longitud manifiesta una alta variación, con una tendencia de incremento a medida que las semillas fueron cosechadas en un estado más avanzado de madurez (Figura 5 C). Saturnino *et al.*, (2005) informaron que las medidas físicas de semillas maduras de *J. curcas* L. fueron de 15 a 20 mm de largo y 8 a 13 mm de diámetro, similares a las obtenidas en este estudio.

El peso fresco de semilla aumenta a una TAC de 31.58 y 29.11 mg/día hasta 75 y 64 dda, con un peso máximo de 1,144.13 y 1,081.87 mg por semilla; que posteriormente disminuye a 691.23 y 677.43 mg, para el primer y segundo periodo de fructificación, respectivamente. Annarao *et al.*, (2008) señalan que el peso fresco de la semilla de *J. curcas* durante el desarrollo varió de 32.4 mg a 1,061 mg, que coincide con lo reportado en el presente estudio. Xu *et al.*, (2011) reportan un peso fresco para semilla de *J. curcas* similar al obtenido en este trabajo, pero difiere en el tiempo que se requiere para alcanzar ese valor máximo, que para estos autores fue a los 50 dda, mientras que lo encontrado en el actual

informe ocurrió 75 y 64 dda, diferencia debida posiblemente al efecto del genotipo y condiciones ambientales.

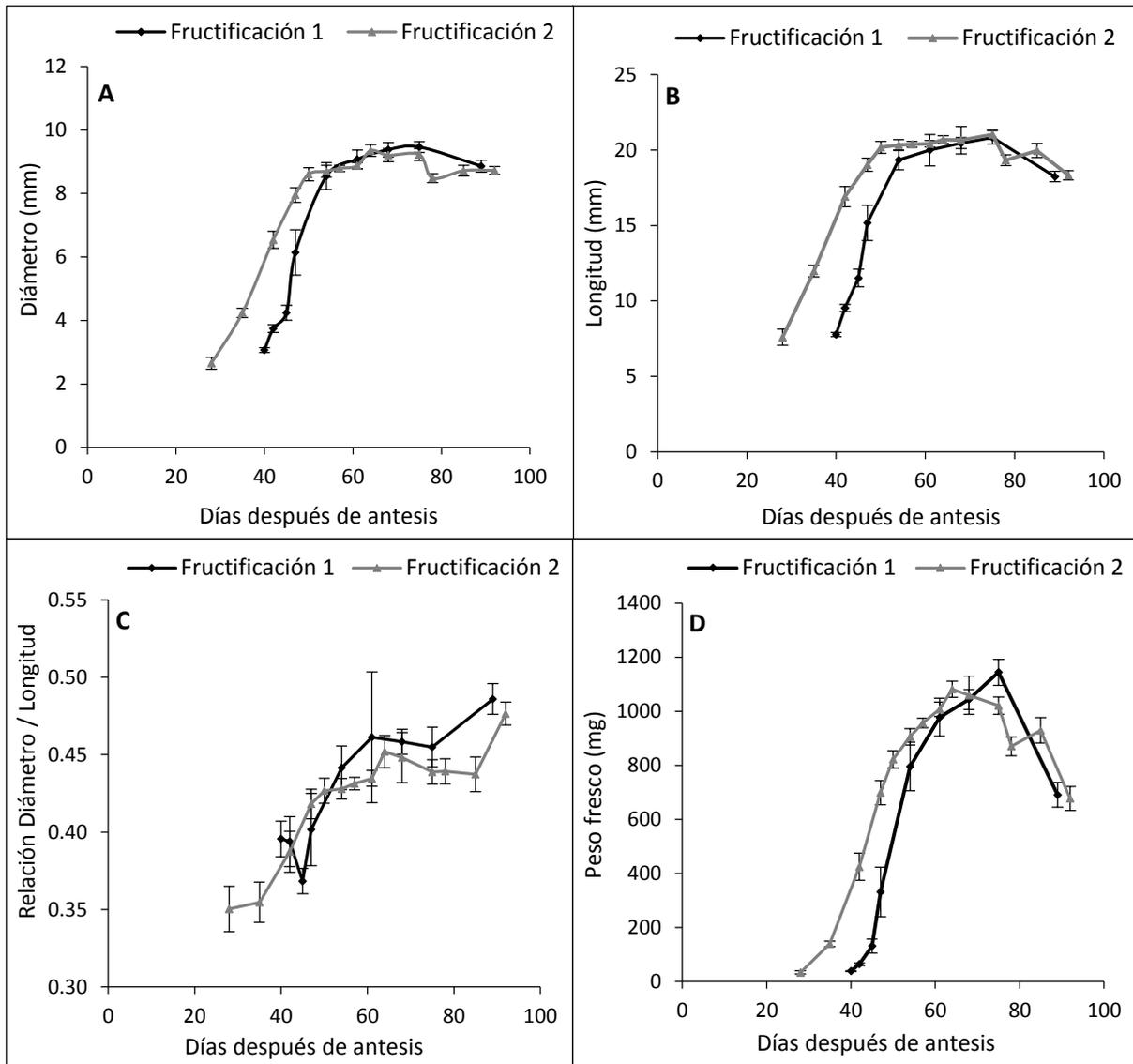


Figura 5: Cambios durante el desarrollo de semilla de *J. curcas* en diámetro (A), longitud (B), relación diámetro /longitud (C) y peso fresco (D).

El peso de 1000 semillas aumenta gradualmente mientras se avanza en la madurez, que alcanza 645.97 g (75 dda) y 609.51 g (68 dda) para el primer y segundo periodo de fructificación; la misma tendencia se manifiesta en el peso volumétrico, que alcanza 47.48 y

46.94 Kg HL⁻¹ 75 dda en ambos periodos de fructificación. Ambas variables manifiestan una pequeña reducción posterior a esas fechas (Figura 5).

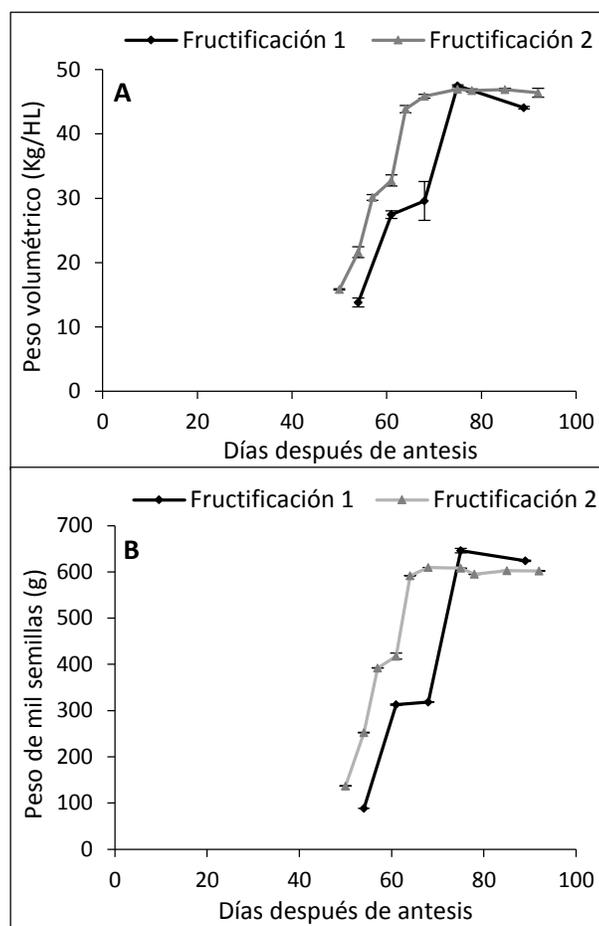


Figura 6. Cambio en peso volumétrico (A) y peso de mil semillas (B) durante el desarrollo de semillas de *J. curcas*.

El color de los frutos cambia a medida que avanza en su desarrollo y madurez (Figura 6), hasta 68 y 64 dda se presenta un color verde, con tonos de verde pasto a verde limón, en este último se manifiestan pigmentos amarillos que van cubriendo el fruto por completo (75 dda) y que coincide con el punto de madurez fisiológica; con el amarillo aparecen manchas marrón que cubren todo el fruto 89 y 92 dda; momento en que estaban secos y dehiscentes. Las semillas presentan testa de color blanco hasta 50 dda, que empieza con tonalidades de

color oscuro para alcanzar un negro intenso 60 y 64 dda, esto para el primer y segundo periodo de fructificación.

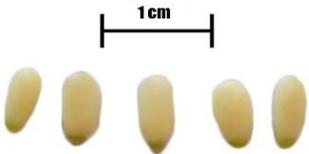
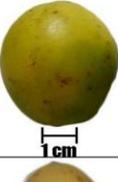
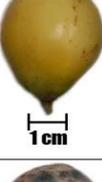
DDA	FRUTO	COLOR VISUAL	MUNSELL	Relación D/L	SEMILLA
28		Verde	5GY4/8	0.609	
54		Verde	5GY6/10	0.723	
64		Verde comenzando aparecer pigmentos en color amarillo	2.5GY7/10	0.712	
68		Verde limón con alguna pigmentación en color amarillo	5Y8/6	0.722	
75		Todo el fruto en color amarillo sin pigmentos verde	5Y8/10	0.724	
85		Cambio de color de amarillo a café en su mayor parte del fruto	2.5Y5/6	0.708	
92		El fruto estaba seco con una coloración café	7.5YR4/2	0.589	

Figura 7. Cambio en color de fruto y semilla de *Jatropa curcas* L. durante su desarrollo.

El color de fruto como indicador de la madurez fisiológica de la semilla se ha recomendado para *Ricinus communis* (Silva *et al.*, 2009), así como para *Koelreuteria paniculata*, *Mimosa caesalpiniaefolia*, *Peltophorum dubium* (Aquino *et al.*, 2006), en *Peltophorum dubium*, *Machaerium brasiliense* (Guimarães y Barbosa, 2007), *Caesalpinia echinata* (Aguiar *et al.*, 2007). En el presente estudio, el máximo peso seco de semilla o madurez fisiológica coincide con el color de fruto totalmente amarillo. Otros reportes en *J. curcas* han asociado el color de fruto con el contenido de aceite y germinación, lo que también fue cuantificado en el presente estudio y será reportado en otro documento.

Cuadro 1. Correlación de Pearson para peso seco de semilla con el resto de las variables

VARIABLES	PERIODOS DE FRUCTIFICACIÓN	
	PRIMERO	SEGUNDO
Peso seco de semilla (mg)	1.0	1.0
Características de fruto		
Longitud (mm)	0.7523*	0.5871ns
Diámetro (mm)	0.7278*	0.5413ns
Relación D/L	0.5631ns	0.3139ns
Peso (g)	0.5523ns	0.4484ns
Características de semilla		
Longitud (mm)	0.6758*	0.6124*
Diámetro (mm)	0.7379*	0.7070*
Relación D/L	0.8128**	0.8140**
Peso fresco (mg)	0.7152*	0.7365*
Peso de 1000 semillas	0.9799**	0.9873**
Peso volumétrico	0.9710**	0.9925**
Contenido de humedad (%)	-0.9456**	-0.9574**

**Altamente significativo $\alpha=0.05$; * Significativo con $\alpha=0.1$; ns, no significativo.

El análisis de correlación de peso seco de semilla con el resto de las variables no mostró diferencias significativas para las variables de fruto, excepto longitud y diámetro en la primera fecha de fructificación (Cuadro 1), mientras que para las variables de semilla resultó

significativo en aquellas que se midieron en fresco y altamente significativo en las cuantificadas después de secado, en ambos periodos de fructificación. El contenido de humedad con correlación negativa, se debe a que los valores disminuyen mientras el peso seco aumenta, pero resultó altamente significativo. Esto significa que las variables de semilla evaluadas en el presente estudio, pueden servir como indicador de la madurez fisiológica.

CONCLUSIONES

La máxima acumulación de materia seca en la semilla se alcanzó a los 75 y 78 dda, momento considerado como madurez fisiológica. Todas las variables cuantitativas de fruto se incrementaron a medida que avanzó la madurez, pero sus máximos valores ocurrieron generalmente antes de madurez fisiológica, por lo cual, no correlacionaron significativamente con ese estado fisiológico. En contraparte, los caracteres de semilla, alcanzaron valores máximos más cerca de madurez fisiológica, en consecuencia, correlacionaron significativamente con peso seco de semilla. Por lo que estos caracteres pueden ser considerados indicadores de madurez fisiológica. Para efectos prácticos, la variable que mayor asociación presentó con la máxima acumulación de peso seco fue el color de fruto, de manera particular el amarillo; es decir, en sustitución del peso seco, el color amarillo de fruto podría ser un indicador confiable de madurez fisiológica en *J. curcas*.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo financiero de Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) durante el periodo 2011-2013 y al Ing. Evaristo Genis Campos por facilitar su parcela para la realización del presente estudio.

LITERATURA CITADA

- Aguiar F A, Pinto M M, Tavares A R, Kanashiro S (2007).** Maturação de frutos de *Caesalpinia echinata* Lam. Pau-Brasil. Revista Árvore 31:1-6.
- Ahrens D C, Peske S T (1994).** Flutuações de umidade e qualidade em semente de soja após a maturação fisiológica. I. Avaliação do teor de água. Revista Brasileira de Sementes 16:107-110.
- Annarao S, Sidhu O P, Roy R, Tuli R, Khetrapal C L (2008).** Lipid profiling of developing *Jatropha curcas* L. seeds using ¹H NMR spectroscopy. Bioresource Technol. 99:9032-9035.
- Aquino N F, Bortolini M, Campagnolo M A, Ignácio V L, Kopper A C, Malavasi M M (2006).** Dormência de sementes de *Peltophorum dubium* (Sprengel.) Taubert colhidas em diferentes estádios de desenvolvimento. Scientia Agraria Paranaensis 5:31-37.
- Arruda F P, Beltrão N E M, Andrade A P, Pereira W E, Severino L S (2004).** Cultivo de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) como alternativa para o semi-árido nordestino. Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas 8:789-799.
- Basha S D, Sujatha M (2007).** Inter and intra population variability of *Jatropha curcas* L. characterized by RAPD and ISSR markers and development of population –specific SCAR markers. Euphytica 156:375-386.
- Beltrão N E M (2005).** Agronegócio das oleaginosas no Brasil. Informe Agropecuário, 26:44-78.
- Bewley J D, Black M (1994).** Seeds: physiology of development and germination. 2ed. New York: Plenum Press, 445p.

- Bradford K J (2004).** Seed Production and Quality. Department of Vegetable Crops. University of California. Davis, California, U.S.A. 134 p.
- Campton D E (1990).** Application of biochemical and molecular markers to analysis of hybridization. Electrophoretic and isoelectric focusing techniques in fisheries management. CRC Press, Boca Raton, Florida. D. H. Whitmore, editor. 240–264 p.
- Carvalho N M, Nakagawa J (2000).** Sementes: ciência, tecnologia e produção. 4. Ed. Funep, Jaboticabal, 588 p.
- Delouche J C, Baskin C C (1973).** Accelerated aging techniques for predicting the relative storability of seeds lots. *Seed Science and Technology* 1:427-452.
- Dias D C F S, Ribeiro F P, Dias L A S, Silva D J H, Vidigal D S (2006).** Tomato seed quality in relation to fruit maturation and post-harvest storage. *Seed Science and Technology* 34:691-699.
- Ellis R H, Pieta Filho C (1992).** The development of seed quality in spring and winter cultivars of barley and wheat. *Seed Science Research* 2:9-15.
- FAO/IPGRI (2010)** Jatropha: A smallholder bioenergy crop, the potential for pro-poor development. *Intetrated Crop Management*, vol 8. Rome. doi: <http://www.fao.org/docrep/012/i1219e/i1219e.pdf> Diversity and distribution of genus *Jatropha* in Mexico (2012).
- Guimarães D M, Barbosa J M (2007).** Coloração dos frutos como índice de maturação para sementes de *Machaerium brasiliense* Vogel (Leguminosae – Fabaceae). *Revista Brasileira de Biociências* 5:567-569.
- Harrington J F (1972).** Seed storage longevity. *In*. *Seed Biology* (ed. T.T. Koslowsky), Academic Press, New York. vol. 3, 145-245 p.

- Heller J (1996).** J. Physic nut (*Jatropha curcas* L.): Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. Roma, IBPGR, 66p.
- ISTA (2005).** International Rules for Seed Testing. Edit (2005).
- Martinez H J, Martinez A A L, Makkar H, Francis G, Becker K (2010).** Agroclimatic Conditions, Chemical and Nutritional Characterization of Different Provenances of *Jatropha Curcas* L. from Mexico. European Journal of Scientific Research 39:396-407
- Saturnino H M, Pacheco D D, Kakida J, Tominaga N, Gonçalves N P (2005).** Cultura do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.). Informe Agropecuário 26:44-78.
- Sena C M, Gariglio M A (1998).** Sementes florestais: colheita, beneficiamento e armazenamento. Brasília, DF: IBAMA, 27p.
- Silva L B, Martins C C, Machado C G, Nakagawa J (2009).** Estádios de colheita e repouso pós-colheita dos frutos na qualidade de sementes de mamoneira. Revista Brasileira de Sementes 31:50-59.
- Silva L J, Dias D C F S, Dias L A S, Hilst P C (2011).** Physiological quality of *Jatropha curcas* L. seeds harvested at different development stages. Seed Sci. & Technol 39:572-580
- Taiz L, Zeiger E (2006).** Fisiología Vegetal. 3th Ed. Sinauer Associates, Inc., Publishers. Sunderland, Massachusetts. 764 p.
- Tekrony D M, Egli D B (1997).** Accumulation of seed vigour during development and maturation. In: Basic and Applied Aspects of Seed Biology, Kluwer Academic Publishers, Boston. vol. 30, 369-384.

Xu R, Wang R, Liu A (2011). Expression profiles of genes involved in fatty acid and triacylglycerol synthesis in developing seeds of *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.). *Biomass Bioenerg.* 35: ,1683-1692.

Zamarripa C A, Martínez H J, De La Piedra C R, Olivera D L S A (2009). Biocombustibles: perspectivas de producción de biodiesel a partir de *Jatropha curcas* L., en el trópico de México. Folleto Técnico. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Rosario Izapa. Tuxtla Chico, Chiapas, México. 30 p.

Zanakis G N, Ellis R H, Summerfield R J (1994). Seed quality in relation to seed development and maturation in three genotypes of soybean (*Glycine max*). *Experimental Agriculture*, Oxford, 30:139-156.

CAPITULO II. CALIDAD FISIOLÓGICA Y PERFIL QUÍMICO DURANTE EL DESARROLLO DE SEMILLAS DE *Jatropha curcas* L.

RESUMEN

Jatropha curcas L. ha adquirido gran importancia debido a su potencial en la elaboración de biodiesel. En este estudio se cuantificó calidad fisiológica y perfil químico durante el desarrollo de semilla. En una plantación de cuatro años de edad, se evaluaron dos periodos de fructificación y diferentes fechas de cosecha, bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se marcaron flores femeninas en antesis para cosechar cada 7 días hasta que el exocarpo presentó dehiscencia. Se cuantificó peso seco y contenido de humedad, lípidos totales, proteína cruda, cenizas y perfil de ácidos grasos, y en semillas desecadas a la sombra viabilidad, germinación y peso seco de parte área de plántula e índice de velocidad de emergencia. La madurez fisiológica o máximo peso seco (654.1 y 639.2 mg/semilla) ocurrió 75 y 78 dda, con un contenido de humedad de 42.70 y 36.38 %. La máxima calidad fisiológica se alcanza a los 75 dda, con viabilidad de 95 y 97 %, germinación de 92 y 97 % e índice de velocidad de emergencia de 3.08 y 2.80, para el primer y segundo periodo de fructificación, respectivamente. A los 75 y 78 dda se alcanza el máximo contenido de lípidos totales (54.67 y 61.78 %) y proteína cruda (24.24 y 23.11 %) para el primer y segundo periodo de fructificación. Los ácidos grasos saturados de mayor concentración en esas fechas de cosecha son palmítico (14.89 y 13.36 %) y esteárico (8.91 y 13.28 %), y los insaturados oleico (34.59 y 36.21 %) y linoleico (39.37 y 35.07 %). Viabilidad y germinación mostraron una alta correlación con la madurez fisiológica (75 dda), que coinciden con el color amarillo del fruto. Se concluye que la máxima calidad fisiológica, contenido de lípidos totales y ácido oleico y linoleico de la semilla ocurre en madurez fisiológica de la semilla.

Palabras clave: *Jatropha curcas* L., madurez fisiológica, calidad fisiológica, perfil químico.

PHYSIOLOGICAL AND CHEMICAL PROFILE QUALITY DURING THE DEVELOPMENT OF SEED *Jatropha curcas* L.

ABSTRACT

Jatropha curcas L. has become important because of its potential in the elaboration of biodiesel. In this study the physiological quality and chemistry profile was quantified during seed development. In a four-year-old plantation were evaluated two flowering periods and several harvest stages under a complete block design, with three replications. Female flowers were labeled at anthesis and then harvested at different developmental stages (every 7 days) until the fruit became dehiscent. In fresh seed, dry weight, moisture content, total lipids, crude protein, ashes, and fatty acid profile were quantified. In dry seed, viability, germination, seedling shoot dry weight, and emergence index rate were measured. Physiological maturity or maximum dry matter (654.1 and 639.2 mg/seed) occurred 75 and 78 daa, with 42.70 and 36.38 % seed moisture content. The maximum physiological quality was reached 75 and 78 daa, with viability of 95 and 97 %, germination 92 and 97 %, seedling-shoot dry weight 0.33 y 0.34 g/seedling, and emergence index rate of 3.08 and 2.80. The maximum concentration of total lipids (54.67 y 61.78%) and crude proteins (24.24 y 23.11 %) was achieved 75 and 78 daa, for the first and second fruiting period. The saturated fatty acid with highest concentration at these harvest date were palmitic (14.89 y 13.36%) and stearic (8.91 y 13.28 %), while on unsaturated were oleic (34.59 y 36.21%) and linoleic (39.37 y 35.07%). Viability and germination, showed a high correlation with physiological maturity (75 daa), which coincide with the yellow color of the fruit. In conclusion the maximum physiological quality, total lipids, and oleic and linoleic acid in the seed occur at seed physiological maturity.

Keywords: *Jatropha curcas* L., physiological maturity and quality, chemical profile.

INTRODUCCIÓN

El piñón mexicano (*Jatropha curcas* L.) de la familia Euphorbiaceae presenta un alto potencial en la producción de biodiesel debido a su alto contenido de aceite, que cumple con los estándares de calidad requeridos. Aunque el aceite puede ser usado directamente en los motores diésel, mezclado con diésel de origen fósil y otros combustibles fósiles, puede ser transesterificado en ésteres de etilo utilizados en motores diésel convencionales o motores diésel con parámetros adaptados (Acthen *et al.*, 2008). El cultivo se propaga a través de semillas, que deben ser de alta calidad fisiológica para asegurar plántulas sanas y vigorosas.

La calidad de semilla comprende aspectos genéticos, fitosanitarios, físicos y fisiológicos; en estos últimos se incluyen la viabilidad, la capacidad germinativa y el vigor; que se ven afectados por las condiciones de crecimiento de la planta madre durante el desarrollo de la semilla, el grado de madurez de ésta al momento de la cosecha, el método de cosecha y las condiciones de beneficio (Doijode, 2001; Bradford, 2004). La cosecha en la maduración adecuada es uno de los factores que determina la calidad de la semilla. Por lo tanto, la determinación de la etapa de máxima calidad fisiológica de la semilla durante el desarrollo del fruto es esencial para definir la etapa de cosecha, especialmente en especies de plantas tales como *J. curacas* que tienen períodos de fructificación indeterminados (Silip, 2010).

El desarrollo de las semillas se puede dividir en tres fases: histodiferenciación, acumulación de reservas y adquisición de tolerancia a la desecación (Taiz y Zeiger, 2006). La madurez fisiológica es la etapa fenológica en que la semilla alcanza su máximo peso seco, que

representa el fin del periodo de acumulación de reservas y la máxima germinación y vigor (Harrington, 1972). A partir de esta etapa comienza el deterioro de las semillas (Copeland and McDonald, 2001). En algunas especies, la madurez de la semilla coincide con la madurez del fruto, de este modo, frutos cosechados tempranamente proporcionan semillas de baja calidad (Bradford, 2004). Tekrony y Egli (1997) reportan que en especies de fruto seco (colza, maíz, soya, trigo), la máxima calidad en cuanto a germinación y vigor se logra antes de, o al mismo tiempo de la máxima acumulación de peso seco, mientras que en aquellas de frutos carnosos (tomate, pimiento) se produce después de esta etapa.

La extracción de aceite en una fase de maduración adecuada es uno de los factores económicos importantes para la producción de biocombustibles. En especies de plantas tales como *J. curcas*, la cantidad y la calidad del aceite, está en función del volumen y la calidad de las semillas (Silip, 2010), por lo tanto, la determinación de la etapa de máximo rendimiento de aceite es esencial. Batin (2011) encontró que el mayor rendimiento de aceite en semillas de *J. curcas* se obtuvo cuando el fruto logró un color amarillo oscuro.

En el presente trabajo se cuantificó la calidad fisiológica y la cinética de acumulación de lípidos y proteínas, así como el perfil de ácidos grasos durante el desarrollo y maduración de la semilla de *J. curcas*, bajo el supuesto que la máxima calidad fisiológica en cuanto a germinación y viabilidad, así como la acumulación de lípidos totales, proteínas y ácidos grasos coincide con la madurez fisiológica de la semilla.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar del experimento

Se empleó una plantación de *J. curcas* de cuatro hectáreas, ubicada en Anenecuilco, municipio de Ayala, Morelos, México, a 1,270 msnm. El clima de la región se clasifica según Koppen, modificado por Enriqueta García (1964), como cálido subhúmedo, con veranos calurosos, temperatura media de 24°C y precipitación anual promedio de 800 mm.

Tratamientos y diseño experimental

La plantación es del ecotipo no toxico, por la nula presencia de esterres de forbol, proviene de semilla de Pueblillo, Veracruz, que en el año de estudio (2012) se encontraba en el cuarto año de producción, con arreglo de 3 x 3 m entre plantas e hileras, una densidad de población de 1108 plantas por hectárea. Se eligieron al azar tres bloques (116 plantas por bloque), de forma perpendicular a la pendiente del terreno, considerado un factor importante de variación.

En observaciones previas se detectaron dos periodos de floración y fructificación bien definidos, el primero de junio a septiembre y el segundo de agosto a noviembre, por lo que se realizaron las mediciones en ambos periodos, ya que las condiciones de precipitación y temperatura en que ocurre el desarrollo y maduración de fruto y semilla son diferentes. En cada periodo de floración y fructificación se marcaron flores femeninas abiertas, y posteriormente se cosecharon los frutos en desarrollo cada dos días hasta que estos alcanzaron 1.0 cm de diámetro. Las cosechas posteriores fueron cada siete días hasta que el fruto alcanzó una coloración marrón.

Los frutos cosechados se transportaron al Laboratorio en una hielera para evitar deshidratación y determinar el contenido de humedad y la madurez fisiológica. Una muestra de frutos por tratamiento y bloque fue desecada a la sombra y se extrajo la semilla para cuantificar la calidad fisiológica, y en frutos frescos se cuantificó la composición química y el perfil de ácidos grasos, que se describen con mayor detalle en el apartado de variables respuesta.

Dado que en el segundo periodo de floración se realizó un mayor número de muestreos, se consideraron dos experimentos independientes, es decir uno por periodo. El diseño experimental corresponde a Bloques Completos al Azar con tres repeticiones o bloques, con las fechas de muestreo como tratamientos.

Variables respuesta

Madurez fisiológica

Contenido de humedad (%) y peso seco (mg): se cuantificaron en una muestras de 10 semillas por bloque, que se colocaron a 103°C hasta peso constante (peso seco); con el peso fresco y el peso seco se calculó el contenido de humedad en base húmeda con la ecuación propuesta por Bewley y Black (1994) y el peso seco se representa por el valor obtenido después de secado.

Calidad fisiológica

Viabilidad: Debido a que no existe protocolo para *J. curcas*, se utilizaron las recomendaciones generales para *Ricinus communis* L. (ISTA, 2005), con modificaciones en

cuanto al tamaño de muestra. Se determinó en tres repeticiones de 25 semillas por bloque para cada una de las fechas de cosecha, las cuales se imbibieron por 18 h con agua destilada; en seguida se removió la testa, se hizo un corte transversal al embrión y se sumergieron en una solución de 2,3,5 trifenil cloruro de tetrazolio a 0.15 % por 24 h, a 25°C. Después de este periodo, se consideraron viables aquellas semillas con coloración de sus estructuras vitales para establecimiento de una plántula normal y el resultado se reporta en porcentaje.

Germinación estándar: Igual que viabilidad, se utilizaron las recomendaciones generales para *Ricinus communis* L. (ISTA, 2005). Se realizó en charolas de plástico tipo paneras, usando arena de río esterilizada como sustrato, en las que se sembraron 25 semillas por bloque de cada una de las fechas de cosecha a una profundidad de 2 cm y a una temperatura entre 26 y 28°C; se realizó un conteo después de 14 días.

Índice de velocidad de emergencia (IVE): Se contabilizó diariamente las plántulas emergidas en la prueba de germinación estándar; en el que se consideró emergidas aquellas plántulas con el gancho de los cotiledones visible sobre el sustrato; el cálculo se realizó de acuerdo a Maguire (1962).

Pesos seco de parte aérea de plántula: A las plántulas germinadas en la prueba de germinación estándar se separó la parte aérea y se sometieron a secado en una estufa marca ESEC-SPID644 a 70°C por 72 h y se les determinó el peso seco en una balanza analítica marca AHOS con precisión de 1mg.

Composición química

En cada cosecha se congeló una muestra de frutos, de los cuales se extrajo la semilla y se maceró con nitrógeno líquido para realizar los análisis químicos de acuerdo al método estándar de la AOAC (1995), descritos a continuación:

Humedad de harina: se determinó en 3 a 3.5 g de muestra por el método de la termobalanza (Ohaus, modelo MB45) programada a 100°C por 40 min con una variación de humedad de 0.01 % y una precisión de 1 mg.

Proteína: Se cuantificó por el Método de Kjendahl, que consiste en cuantificar el nitrógeno (N), ya que es el principal componente de las proteínas. La técnica involucra tres etapas: (1) digestión, se utilizó de 0.3 a 0.4 g de harina macerada, que se vertió en un matraz de micro-Kjendahl, con 1 g de tableta catalítica previamente pulverizada y se calentó en una parrilla y se adicionó 4 ml de H₂SO₄; (2) destilación, se realizó con la ayuda de la unidad de destilación Labconco; (3) titulación, se retiró el matraz receptor de nitrógeno del proceso de destilación y se tituló con una solución de HCl 0.1 N. Los resultados se expresan en porcentaje de proteína con base al contenido de nitrógeno.

Lípidos totales: Se determinó mediante el método soxhlet, se tomó una muestra de harina de 3 a 3.5 g después de medir la humedad, la cual se depositó en cartuchos soxhlet para colocarlos en el extractor de grasa. En un matraz balón desgrasado y con peso constante se colocó éter de petróleo (40 a 60°C) en una relación de 1:20 (w/v) para el arrastre de grasa de la muestra durante 8 h. Posteriormente se evaporó el exceso de éter con ayuda de un rotavapor

(Buchi, modelo B-481), se determinó el peso del matraz balón con la muestra. Los resultados son expresados en porcentaje.

Cenizas: Se pesaron con precisión 5 g de muestra en un crisol de porcelana, la muestra fue precalcínada con ayuda de un mechero y por último en la mufla (Lindberg modelo: 52848), cuidando que la temperatura no pasara de 550 °C, para evitar que los cloruros se volatilizaran; se suspendió el calentamiento cuando las cenizas se presentaron blancas o grises. El proceso de enfriamiento fue en un desecador por 1 h y se cuantificó el peso final. Los resultados se expresan en porcentaje de cenizas.

Perfil de ácidos grasos: El aceite de la semilla se extrajo mediante el método soxhlet. Después de centrifugar, el disolvente fue removido usando nitrógeno gaseoso. Los metil éster se obtuvieron por el método de la AOAC (1995). Los ácidos grasos se analizaron por cromatografía de gases (GC-14^a, Shimadzu, Japón), auto inyector (AOC-20i) y una columna Varian capilar carbowax (50 m * 0.25 mm ID) y un detector de ionización de flama (FID). Se usó una temperatura programada de 160 a 225°C, el gas acarreador fue nitrógeno, a un flujo de 1 ml min⁻¹. Se corrió una mezcla de metil ésteres y los tiempos de repetición fueron usados para la identificación de los picos de la muestra. El contenido de ácidos grasos se estima en términos de porcentaje de acuerdo al área total de cada uno de los picos.

Análisis estadístico

Los datos se analizaron con el paquete SAS V.9.0. (SAS Institute, 2002), mediante el modelo de bloques completos al azar y la comparación de medias se hizo con la prueba de

Tukey ($\alpha= 0.05$), también se realizó un análisis de correlación de Pearson del peso seco contra el resto de las variables cuantitativas. Los promedios se presentan de manera gráfica por las tendencias tan claras observadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Madurez fisiológica

La acumulación de materia seca ocurre a una tasa absoluta de crecimiento (TAC) de 21.52 y 14.59 mg/día después de 40 dda hasta los 75 y 78 dda, momento en que ocurrió el máximo peso seco (654.1 y 639.2 mg/semilla) y por ende la madurez fisiológica, tal como lo señala Bradford (2004). Posteriormente inicia el secado natural, donde se aprecia una ligera reducción (no significativa) del peso seco hasta los 90 dda que duró el experimento (Figura 8, A y B). Esta reducción ha sido observada en *J. curcas* L. (Silva *et al.*, 2011) y en otros cultivos (TeKrony y Egli, 1997; Dias *et al.*, 2006), quienes lo asocian a una respiración elevada por el alto contenido de humedad de la semilla.

El contenido de humedad en la semilla empieza a disminuir con la acumulación de materia seca a una TAC de 1.68 y 1.30 % por día hasta 75 y 78 dda, con 42.70 y 36.38 %, que coincide con la madurez fisiológica, para el primer y segundo periodo de fructificación, respectivamente. Después de madurez fisiológica, la pérdida de humedad ocurre a tasas de 2.32 y 1.89 % por día (Figura 8, A y B). La rápida reducción observada es proporcional al depósito de los compuestos de reserva, que sustituyen los espacios ocupados por el agua (Bradford, 2004). En el Capítulo I de la presente obra se discuten con más detalle estos datos de madurez fisiológica.

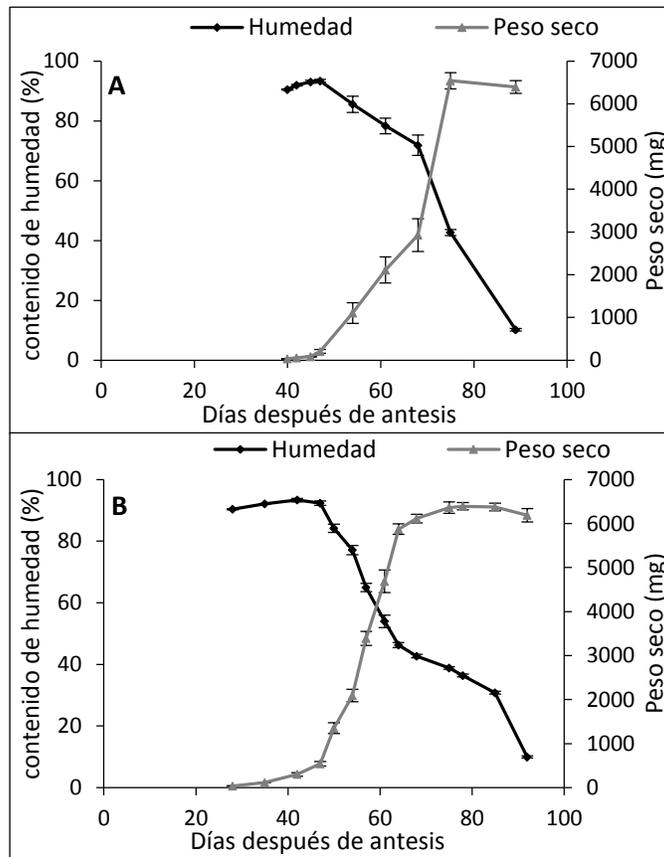


Figura 8. Cinética de peso seco y contenido de agua durante el desarrollo de semilla de *J. curcas* L.: Primer (A) y segundo (B) periodo de floración y fructificación.

Calidad fisiológica

Las variables fisiológicas presentaron un incremento, con tendencia similar en los dos periodos de fructificación. La viabilidad de la semillas incrementa después de 50 dda, con un máximo de 93 y 97 %, 75 y 78 dda, que coincide con la máxima acumulación de peso seco o madurez fisiológica (Figura 9, A), y que posteriormente disminuye a 91 y 94 % a los 89 y 92 dda. La reducida viabilidad previa a la madurez fisiológica podría estar asociada a daños por la deshidratación, debido a que la semilla no ha adquirido la tolerancia a la desecación (Demir y Ellis, 1992; Sanhewe y Ellis, 1996). Batín (2011) reporta que semilla inmadura de *J. curcas*

L., provenientes de frutos verdes, aún no alcanza el desarrollo morfológico y fisiológico y presentan una viabilidad reducida; que coincide con los resultados del presente estudio.

La germinación incrementa gradualmente después de 50 dda, con un máximo de 92 y 97 % a los 75 dda para el primer y segundo periodo de fructificación, respectivamente (Figura 9, B), que disminuye posteriormente a 90.0 y 95 %, a los 89 y 92 dda. La reducida germinación antes de madurez fisiológica se debe posiblemente a que no ha alcanzado el desarrollo morfológico y fisiológico (Kermode, 1995), asociado también a inhibidores de la germinación, como el ácido abscísico, que disminuyen conforme la semilla avanza en la madurez y secado (Bradford, 2004).

En el presente estudio, la máxima germinación coincide con la madurez fisiológica en términos de máxima acumulación de materia seca en la semilla, a los 75 y 78 dda (Figura 8, A y B) y con el color amarillo de fruto (Capítulo I de esta tesis). Kaushik (2003) en *Jatropha curcas* L., reporta máxima germinación a los 57 dda, con frutos de color amarillo. La diferencia en el tiempo para alcanzar esa máxima germinación con el presente estudio, podría atribuirse a diferencia en condiciones ambientales y/o genotipo. Adikadarsih y Hastono (2007) reportan 7 % de germinación en semillas de *J. curcas* L., provenientes de frutos de color verde, mientras que en frutos de color amarillo fue de 92 %; Silva *et al.*, (2011) encontraron la máxima germinación (72 %) en frutos de color marrón con 65 dda y nula en frutos verdes de 45 dda; asimismo, Santoso *et al.*, (2012) obtuvieron la máxima germinación en semillas de *J. curcas* en frutos de color amarillo, que coincide con lo reportado en el presente estudio.

El índice de velocidad de emergencia (IVE) incrementa conforme la semilla fue cosechada en etapas más avanzada de maduración, con un máximo de 3.1 y 2.8 a los 75 dda, seguido por una disminución de 2.9 y 2.6 a los 89 y 92 dda, para el primer y segundo periodo de fructificación, respectivamente (Figura 9, C). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Silva *et al.*, (2011), quienes reportan que a partir de 45 dda existe un incremento en el IVE a medida que va madurando la semilla hasta 65 dda donde se alcanzó el máximo valor 2.6 en frutos de color marrón y un descenso posterior hasta 1.7 en frutos secos de 80 dda. Este índice es considerado un indicador del vigor de la semilla, que se define como la suma total de las propiedades de la semilla que determinan el nivel potencial de actividad y desarrollo durante la germinación y emergencia de la plántula en condiciones adversas (Copeland y McDonald, 2001; ISTA, 2005), por lo que se considera que las semillas más vigorosas germinan más rápidamente (Maguirre, 1962; Moreno, 1996). En este sentido, los resultados del presente estudio revelan que el máximo vigor de la semilla de *J. curcas* L., también coincide con la madurez fisiológica, que concuerda con lo reportado con por Santoso *et al.* (2012), que reportan el máximo vigor en términos de velocidad de emergencia en frutos de color amarillo.

El peso seco presentó incrementos significativos a medida que avanzaba la maduración en ambos periodos de fructificación, con un máximo de 0.33 y 0.34 g/plántula a los 75 y 78 dda, seguido de una disminución de 0.31 y 0.32 g/plántula a los 89 y 92 dda (Figura 9, D). Silva *et al.*, (2011), reportan, en *J. curcas*, que el máximo peso seco se alcanzó en semillas de frutos de color marrón de 65 dda y una reducción a los 80 dda en frutos secos; asimismo, Sowmya *et al.*, (2012) obtuvieron que en frutos de 45 dda color verde, el peso seco fue de 186 mg/plántula y se incrementó hasta 363 mg/plántula en frutos amarillos de 60 dda, finalmente

una reducción hasta 319 mg/plántula en frutos secos de 70 dda, que coincide con lo reportado en este estudio. Estos datos muestran que la mayoría de las plántulas vigorosas se originaron a partir de semillas que se cosechan cuando su peso seco fue máximo.

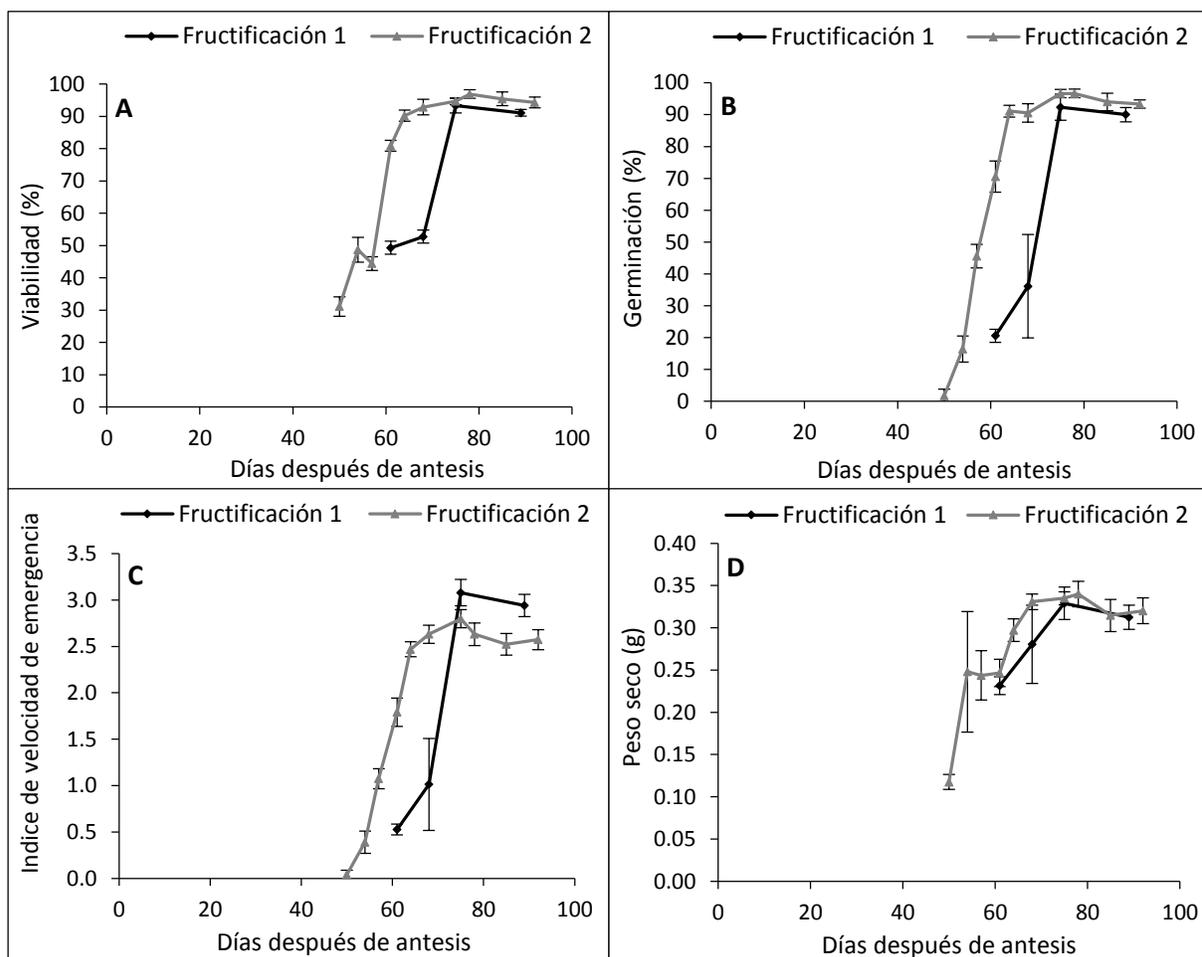


Figura 9: Cambios fisiológicos durante el desarrollo de semillas de *J. curcas* L. en viabilidad (A), germinación (B), índice de velocidad de emergencia (C) y peso seco de parte área de plántula (D).

Composición química

En ambos periodos de fructificación evaluados, el contenido total de proteína disminuye y la de lípidos incrementa conforme la semilla avanza en la maduración, mientras que las cenizas se mantienen sin cambios evidentes (Figura 10, A y B). El contenido de proteína total a los 40 y 28 dda es de 39.7 y 31.1 %, que permanece sin cambios significativos

hasta 61 y 50 dda, momento en que disminuye significativamente a 24.2 y 20.4 %, 75 y 61 dda, y que permanece constante por el resto del periodo de evaluación, para el primer y segundo periodo de fructificación, respectivamente. Sowmya *et al.*, (2012) reportan 20.5, 24.6, 23.4 y 22.6% de proteína total en frutos cosechados en color verde (45 dda), amarillo (60 dda), café (65 dda) y negro (70 dda), respectivamente, que aunque consideran que existe un máximo en color amarillo, la tendencia no parece ser contundente, como ocurre en el presente estudio.

El contenido de lípidos totales se incrementa de forma exponencial después de 40 y 28 dda, que alcanza un máximo de 54.7 y 60.6 % a los 75 y 78 dda, para el primer y segundo periodo de fructificación, respectivamente. Los reportes en la literatura han asociado el incremento de lípidos con dda y color de fruto. Estos indicadores de madurez han sido discutidos con detalle en el Capítulo I de esta tesis; del que se retoma que la madurez fisiológica ocurre en el momento en que el fruto es en su totalidad de color amarillo, a los 75 y 78 dda. Wanita y Hartono (2006) reportan que el contenido de aceite de *J. curcas* aumenta de 15.19 a 26.28 % de 35 a 55 dda, que corresponde con color verde y amarillo, respectivamente. Santoso (2008) reporta un incremento de 8 a 43 % de 25 a 65 dda, respectivamente. Sowmya *et al.*, (2012) reportan 12.74 % de aceite en frutos verdes (45 dda) y en café-negro (70 dda) 43.75 %, mientras que Annarao *et al.*, (2008) señalan 0.3 y 24.9 % a los 12 y 37 días después de floración. Resulta contundente que existe variación en contenido total de lípidos y con ello el tiempo requerido, pero el máximo valor coincide con el color amarillo de fruto, al igual que en el presente estudio.

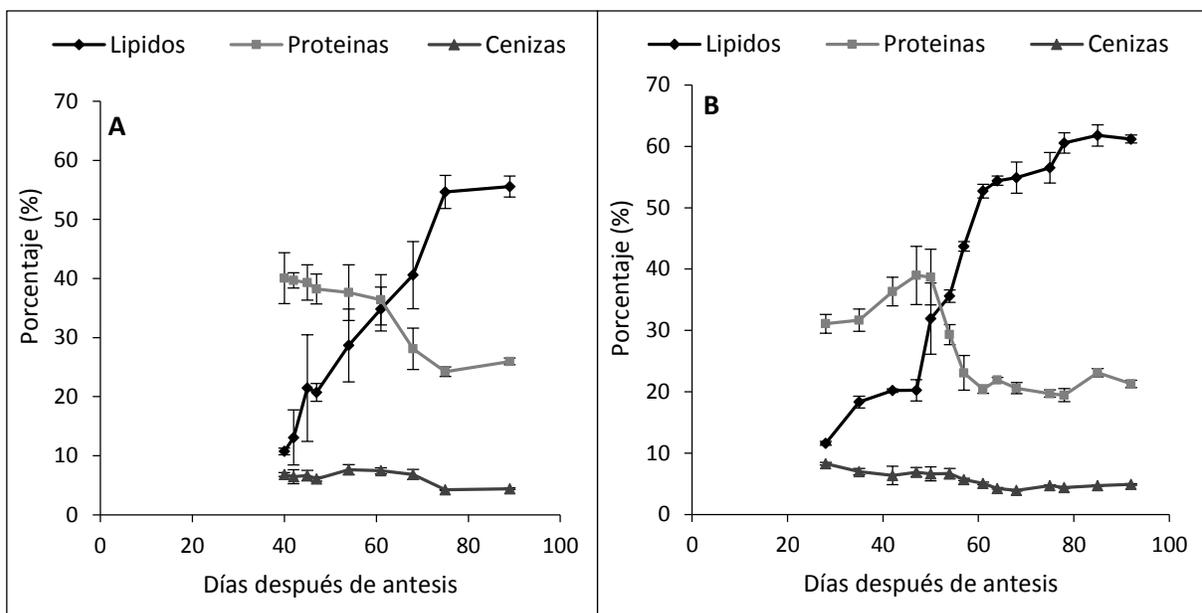


Figura 10. Cinética de acumulación de lípidos, proteínas y cenizas durante el desarrollo de semilla de *Jatropha curcas* L.: Primer (A) y segundo (B) periodo de floración y fructificación.

Perfil de ácidos grasos

El perfil de ácidos grasos reveló la presencia de nueve compuestos, tres saturados y seis insaturados, que son los de mayor concentración y los más reportados en otras investigaciones (Martinez *et al.*, 2006; Hanny y Shizuko 2008; Abdelgadir *et al.*, 2010; Huawu *et al.*, 2012; Li Kun *et al.*, 2012; Thitipon *et al.*, 2013) (Cuadro 2). Los ácidos saturados con mayor concentración son el palmítico (C16:0) y esteárico (C18:0) con promedio de 15.2 y 14.1 % y 8.6 y 12.8 %, y en los insaturados el oleico (C18:1) y linoleico (C18:2) con promedio de 36.1 y 35.8 % y 41.3 y 37.0 %, para el primer y segundo periodo de fructificación, respectivamente. El resto de los ácidos grasos representan alrededor de 3 % del total (Cuadro 2). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Thitipon *et al.*, (2013); Huawu *et al.*, (2012) quienes señalan que los ácidos grasos principales en el aceite de semillas

de *Jatropha curcas* L. durante el periodo de maduración fueron ácido oleico seguido por linoleico, palmítico y esteárico.

Cuadro 2: Composición del perfil de ácidos grasos durante el desarrollo de semillas de *Jatropha curcas* L.

DDA	Ácido mirístico	Ácido palmítico	Ácido esteárico	Ácido oleico	Ácido linoleico	Ácido linolénico	Ácido araquídico	Ácido eicosenoico	Ácido margárico
Primer fructificación									
40	0.223 ±0.00004	15.482 ±0.493	9.081 ±0.322	35.344 ±0.064	34.682 ±0.184	2.368 ±0.020	0.133 ±0.021	0.148 ±0.012	0.168 ±0.003
42	0.136 ±0.062	11.013 ±4.562	2.908 ±2.338	42.837 ±3.200	40.894 ±3.752	1.259 ±0.839	0.048 ±0.027	0.145 ±0.011	0.092 ±0.037
61	0.281 ±0.034	16.981 ±0.223	8.282 ±0.132	34.808 ±0.964	37.182 ±0.812	0.572 ±0.111	0.104 ±0.007	0.060 ±0.003	0.129 ±0.003
68	0.289 ±0.018	16.933 ±0.277	8.016 ±0.156	33.998 ±0.489	38.344 ±0.322	0.527 ±0.018	0.119 ±0.011	0.049 ±0.004	0.130 ±0.002
75	0.394 ±0.014	14.896 ±0.102	8.911 ±0.097	34.589 ±0.161	39.369 ±0.195	0.247 ±0.002	0.118 ±0.007	0.056 ±0.000	0.139 ±0.002
89	0.392 ±0.027	15.214 ±0.356	8.644 ±0.525	36.058 ±1.186	41.335 ±1.365	0.306 ±0.028	0.141 ±0.006	0.058 ±0.006	0.142 ±0.003
Segunda fructificación									
50	1.709 ±1.2096	39.980	8.770	20.940	29.920	0.100	ND	ND	0.240
54	0.783 ±0.0176	28.920 ±0.9919	11.171 ±0.3108	20.931 ±0.351	37.645 ±1.2978	0.060 ±0.0180	ND	ND	0.217 ±0.0029
57	0.491 ±0.0875	27.620 ±0.6780	10.427 ±0.5350	25.437 ±0.303	35.187 ±0.9485	0.504 ±0.3070	0.391	0.167	0.068 ±0.0412
61	0.446 ±0.0387	13.847 ±0.4795	11.263 ±0.5306	35.469 ±0.304	36.318 ±0.3488	0.482 ±0.0530	0.320 ±0.0079	0.139 ±0.0035	0.136 ±0.0026
64	0.373 ±0.0206	13.343 ±0.1878	12.336 ±0.1149	36.264 ±0.222	35.029 ±0.2606	0.369 ±0.0059	0.331 ±0.0079	0.150 ±0.0050	0.141
68	0.381 ±0.0026	13.265 ±0.1590	12.881 ±0.4304	37.680 ±0.233	33.585 ±0.4611	0.313 ±0.0321	0.333 ±0.0020	0.165 ±0.0041	0.138 ±0.0032
75	0.320 ±0.0205	13.727 ±0.2201	12.628 ±0.4230	37.143 ±0.268	34.290 ±0.2760	0.310 ±0.0097	0.287 ±0.0034	0.151 ±0.0018	0.088 ±0.0227
78	0.260 ±0.0044	13.564 ±0.1726	12.244 ±0.4977	37.504 ±0.120	34.725 ±0.4108	0.304 ±0.0155	0.303 ±0.0179	0.147 ±0.0029	0.087 ±0.0238
85	0.242 ±0.0044	13.363 ±0.1418	13.282 ±0.3358	36.208 ±0.324	35.070 ±0.3757	0.305 ±0.004	0.315 ±0.014	0.170 ±0.0107	0.142 ±0.0018
92	0.557 ±0.0332	14.060 ±0.3980	12.763 ±0.5821	35.773 ±0.839	37.033 ±0.607	ND	ND	ND	0.230 ±0.0086

Los datos (%) se muestran como la media ± DS, se derivan a partir de tres repeticiones, DDA= días después de antesis, NS= no significativo.

El contenido de ácidos grasos varió con el estado de madurez de la semilla y los cambios más evidentes resaltan una reducción del ácido palmítico (24.96 %) e incrementos en oleico (0.72 y 14.83 %) y linoleico (6.66 y 7.11 %) conforme la semilla se cosecha en un estado de madurez más avanzado, para el primer y segundo periodo de fructificación, respectivamente. Thitipon *et al.*, (2013) reporta que los ácidos palmítico, esteárico, oleico y linoleico son los principales en *J. curcas*, que aumentan a medida que avanza la madurez; lo cual coincide con los resultados del presente estudio, a excepción del ácido palmítico que disminuye conforme avanza la madurez. En tanto que, Huawu *et al.*, (2012) reportan resultados similares a los obtenidos en este estudio donde el ácido esteárico, oleico y linoleico aumentan en tanto que el ácido palmítico disminuye a medida que avanza la madurez.

Cuadro 3. Correlación de Pearson para peso seco de semilla con el resto de las variables

VARIABLES	PERIODOS DE FRUCTIFICACIÓN	
	PRIMERO	SEGUNDO
Peso Seco de semilla (mg)	1.000	1.000
Caracteres fisiológicos		
Viabilidad (%)	0.918 **	0.956 **
Germinación (%)	0.908 **	0.967 **
Peso Seco Plántula (mg)	0.513 NS	0.581 NS
Índice de Velocidad de Emergencia	0.928 **	0.966 **
Caracteres químicos		
Humedad (%)	-0.944 **	-0.956 **
Cenizas (%)	-0.470 NS	-0.764 *
Proteínas (%)	-0.809 **	-0.821 **
Lípidos (%)	0.834 **	0.910 **

** Altamente significativo $\alpha=0.05$; * Significativo $\alpha=0.1$; NS= no significativo.

Correlación de peso seco con variables fisiológicas y químicas

El análisis de correlación mostró diferencias significativas para todas las variables evaluadas, excepto peso seco de plántula en ambos periodos de fructificación evaluados y contenido de cenizas para el primer periodo de fructificación. Esto significa que la máxima calidad fisiológica en cuanto a viabilidad, germinación y vigor (cuantificado con el índice de velocidad de emergencia), así como el máximo contenido de aceite y calidad del mismo (en cuanto ácido oleico y linoleico) ocurre en madurez fisiológica de la semilla. Este último considerado como la máxima acumulación de materia seca, que tiene como indicador visual el color amarillo del fruto (Capítulo I del presente estudio).

CONCLUSIONES

La calidad fisiológica de la semilla de *Jatropha curcas* L., en términos de viabilidad, germinación e índice de velocidad de emergencia, incrementa conforme avanza en la maduración, con valores máximos en el momento en que ocurre la madurez fisiológica o máximo peso seco. El contenido total de proteína disminuye, mientras que el de lípidos incrementa con la madurez de la semilla, este último con un valor máximo en madurez fisiológica. En general el ácido palmítico tiende a disminuir, mientras el oleico y linoleico se incrementa a medida que la semilla se cosecha en estado más avanzado de madurez.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo financiero de Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) durante el periodo 2011-2013; Ing. Evaristo Genis Campos, quien facilitó su parcela para la realización del presente estudio; al Sr. Juan Herrera, por su apoyo en las

pruebas fisiológicas; y a la Dra. Cristian Jiménez Martínez del IPN-Escuela Nacional de Ciencias Biológicas por el apoyo en el laboratorio de Química de Alimentos.

LITERATURA CITADA

- Abdelgadir A H, Jäger A K, Johnson S D, Van Staden J (2010).** Influence of plant growth regulators on flowering, fruiting, seed oil content, and oil quality of *Jatropha curcas*. South African Journal of Botany. 76:440–446
- Achten W M J, Vercot L, Franken Y J, Mathijs E, Singh V P, Aerts A, Muys B (2008).** *Jatropha* bio-diesel production and use. Biomass & Bioenergy 32:1063-1084.
- Adikadarsih S, Hastono J. 2007.** The effect of fruit maturity on the quality of physic nut seeds in Indonesian. Proceeding of Workshop II: Technology State of *Jatropha curcas* plant. Bogor, Indonesia, 29
- Annarao S, Sidhu O P, Roy R, Tuli R, Khetrupal C L (2008).** Lipid profiling of developing *Jatropha curcas* L. seeds using 1H NMR spectroscopy. Bioresource Technol. 99:9032-9035.
- AOAC (1995).** Official methods of analysis of the Association of Analytical Chemist, 15th. Ed. Washington D.C.
- Batin C (2011).** Seed germination and seedling performance of *Jatropha curcas* L. fruit based on color at two different seasons in Northern Philippines. International Conference on Environment and BioScience, IPCBEE, v21: 49-100.
- Bewley J D, Black M (1994).** Seeds: physiology of development and germination. 2ed. New York: Plenum Press, 445p.

- Bradford K J (2004).** Seed Production and Quality. Department of Vegetable Crops. University of California. Davis, California, U.S.A. 134 p.
- Copeland O L, McDonald M B (2001).** Principles of Seed Science and Technology. 4th edition. Kluwer Press. New York. USA. 488 p.
- Demir I, Ellis R H (1992).** Development of pepper (*Capsicum annuum*) seed quality. *Annals Applied Biology* v121:385-399.
- Dias C F S, Ribeiro F P, Dias L A S, Silva D J H, Vidigal D S (2006).** Tomato seed quality in relation to fruit maturation and post-harvest storage. *Seed Science and Technology* v34:691-699.
- Doijode S D (2001).** Seed Storage of Horticultural Crops. Haworth Press. New York, USA. 339 p.
- ISTA, (2005).** International Rules for Seed Testing. Edit 2005.
- Hanny J B y Shizuko H (2008).** Biodiesel production from crude *Jatropha curcas L.* seed oil with a high content of free fatty acids. *Bioresource Technology* 99:1716–1721
- Harrington J F (1972).** Seed storage longevity. *In* Seed Biology (ed. T.T. Koslowsky), Academic Press, New York. v3: 145-245.
- Huawu J, Pingzhi W, Sheng Z, Chi S, Yaping C, Meiru L, Yongxia J, Xiaohua F, Fan C, Guojiang W (2012).** Global Analysis of Gene Expression Profiles in Developing Physic Nut (*Jatropha curcas L.*) Seeds. *PLoS ONE* 7(5): e36522.
- Kaushik N (2003).** Effect of capsule maturity on germination and seedling vigour in *Jatropha curcas*. *Seed Science and Technology*, v31: 449-454.

- Kermode A R (1995).** Regulatory mechanisms in the transition from seed development to germination: interactions between the embryo and the seed environment. *In:* J. Kigel, G. Galili, Eds. Seed Development and Germination. Marcel Dekker, Inc. New York. 273-332 p.
- Li Kun, Liu F Y, Sun Y Y (2012).** Research Development and Utilization Status on *Jatropha curcas* in China. New Advances and Contributions to Forestry Research. 161-170
- Maguire J D (1962).** Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Sci.* v2:176-177.
- Moreno E (1996).** Análisis físico y biológico de semillas agrícolas. 3ed. Instituto de Biología. UNAM. México. 222 p.
- Martinez H J, Siddhuraju P, Francis G, Davila O G, Becker K (2006).** Chemical composition, toxic/antimetabolic constituents, and effect of different treatments on their levels, in four provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. *Food Chem* 96:80-89.
- Sanhewe A J, Ellis R H (1996).** Seed development and maturation in *Phaseolus vulgaris*. II. Post-harvest longevity in air-dry storage. *Journal of Experimental Botany* v47:959-965.
- Santoso B B (2008).** Karakterisasi morfologi dan agronomi serta kandungan minyak jarak pagar (*Jatropha curcas* L.). PhD dissertation. Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Sabah.
- Santoso B B, Budianto A, Aryana I M (2012).** Seed viability of *Jatropha curcas* in different fruit maturity stages after storage. 4:113-117

- Silip J J (2010).** Duración del ciclo de vida y madurez heterogeneidad de *Jatropha curcas* Linn. Journal of Desarrollo Sostenible, Toronto, v3: 291 -295.
- Silva L J, Dias D C F S, Dias L A S, Hilst P C (2011).** Physiological quality of *Jatropha curcas* L. seeds harvested at different development stages. Seed Sci. & Technol v39:572-580
- Sowmya K J 1, Rame G, Balakrishna P, Gururaja Rao M R (2012).** Effect of fruit maturity stages on seed quality parameters in jatropha (*Jatropha curcas* L.). Indian Journal of Plant Sciences. Vol. 1 (1) April-June, 85-90 pp.
- Taiz L, Zeiger E (2006).** Fisiología Vegetal. 3th Ed. Sinauer Associates, Inc., Publishers. Sunderland, Massachusetts. 764 p.
- Tekrony D M, Egli D B (1997).** Accumulation of seed vigour during development and maturation. In: Basic and Applied Aspects of Seed Biology, Kluwer Academic Publishers, Boston. v30: 369-384.
- Thitipon B, Narumon P, Janthima J, Chompunuch V, Sittiruk R, Warawut C (2013).** Proteomic evaluation of free fatty acid biosynthesis in *Jatropha curcas* L. (physic nut) kernel development. African Journal of Biotechnology. v12: 3132-3142.
- Wanita Y P, Hartono J (2006).** The effect of fruit maturity degree on oil content of *Jatropha curcas* L. Paper presented at Lokakarya II: Status Teknologi Tanaman Jarak Pagar. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perkebunan, Department Pertanian.

CONCLUSIONES GENERALES

La máxima acumulación de materia seca en la semilla se alcanzó a los 75 dda, momento considerado como madurez fisiológica. Los valores en las variables de fruto incrementaron a medida que avanzó la madurez, alcanzando los máximos valores generalmente antes de la madurez fisiológica, por lo cual, no correlacionaron significativamente con ese estado fisiológico. Mientras que, los caracteres de semilla correlacionaron significativamente, con valores máximos más cerca de madurez fisiológica. Por lo que estos caracteres pueden ser considerados indicadores de madurez fisiológica. Para efectos prácticos, la variable que mayor asociación presentó con la máxima acumulación de peso seco fue el color, de manera particular el amarillo; es decir, en sustitución del peso seco, el color amarillo podría ser un indicador confiable de madurez fisiológica en *Jatropha curcas*.

Todas las variables cuantitativas para determinar la calidad fisiológica aumentaron con forme avanzaba el desarrollo y madurez de la semilla alcanzando sus máximos valores en el punto marcado como madurez fisiológica que son 75 dda. Por lo que la prueba de germinación, viabilidad y vigor basado en el índice de velocidad de emergencia son buenos indicadores del momento en que se alcance la máxima calidad fisiológica. Mientras que el peso seco de plántula no correlacionó positivamente.

El contenido total de proteína disminuye, mientras que el de lípidos incrementa con la madurez de la semilla, este último con un valor máximo en madurez fisiológica. En general el ácido palmítico tiende a disminuir, mientras el oleico y linoleico se incrementa a medida que la semilla se cosecha en estado más avanzado de madurez.