Agronomía Mesoamericana

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Artículo científico
Volumen 31(2):277-290. Mayo-agosto, 2020
e-ISSN 2215-3608, doi:10.15517/am.v31i2.39213

Desempeño productivo y adaptación de *Jatropha curcas* L. en tres ecorregiones en Colombia[1]

Productive performance and adaptation of *Jatropha curcas* L. in three ecoregions in Colombia[1]

Luis Fernando Campuzano-Duque[2], Ramon Gualdrón-Acosta[3], Luis Fernando Chávez-Oliveros[4]

[1] Recepción: 7 de octubre, 2019. Aceptación: 26 de noviembre, 2019. Este trabajo formó parte del Proyecto Plataforma Jatropha Colombia, financiado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR); Empresa Colombiana de Petróleo (Ecopetrol), Carbones de Colombia (Cerrejón) y Departamento Nacional de Ciencia y Tecnología (Colciencias).

[2] Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Centro de Investigación La Libertad. Villavicencio, Meta, Colombia. lcampuzano@agrosavia.co (autor para correspondencia; https://orcid.org/0000-0003-1146-4591).

[3] Cerrejón-Colombia. Albania, Colombia. ramon.gualdron@gmail.com (https://orcid.org/0000-0003-4593-2074).

[4] Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Centro de Investigación Palmira, Palmira, Valle del Cauca, Colombia. lchavez@agrosavia.co (https://orcid.org/0000-0003-4251-9946).

Resumen

Introducción. *Jatropha curcas* L., es una especie con alto contenido de aceite apto para biocombustible; no obstante, por su condición silvestre, el rendimiento de fruto y de aceite es bajo; por lo tanto, amerita mejoramiento genético. **Objetivo.** Conocer el desempeño productivo de *J. curcas* en tres ecorregiones de Colombia. **Materiales y métodos.** El trabajo fue realizado de 2012 a 2014. Fue establecido un diseño de bloques completos al azar con quince genotipos en tres ecorregiones (Caribe seco, Valle interandino y Orinoquía). Se utilizó el modelo AMMI y su gráfico biplot para determinar la estabilidad fenotípica del rendimiento de fruto y con el rendimiento de aceite se determinó el beneficio neto y la relación beneficio-costo. **Resultados.** En dos de las tres ecorregiones empleadas, Caribe seco y Valle interandino, *J. curcas* presentó un rendimiento acumulado de fruto de 3,6 t ha^{-1} y 6,7 t ha^{-1}, respectivamente; en la región de Orinoquía el rendimiento fue menor a 0,1 t ha^{-1}. El costo de un litro de aceite de *J. curcas* fue de US$1,07 para Albania (Caribe seco) y US$1,24 para Espinal (Valle interandino), superior al del aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*) de US$0,89. **Conclusión.** Los quince genotipos de *J. curcas* evaluados en este estudio mostraron el mejor desempeño productivo en Albania (Caribe seco) y en Espinal (Valle interandino), y el genotipo CJC3 fue el de mejor producción de frutos y de aceite.

Palabras clave: adaptabilidad, análisis de costos y beneficios, biocarburante.

Abstract

Introduction. *Jatropha curcas* L., is a species with high oil content suitable for biofuel; however, due to its wild condition, the yield of fruit and oil is low; therefore, it warrants genetic improvement. **Objective.** To know the productive performance of *J. curcas* in three ecoregions of Colombia. **Materials and methods.** The work was carried out from 2012 to 2014. A randomized complete block design with fifteen genotypes in three ecoregions (dry Caribbean, Inter-Andean

Agronomía Mesoamericana es desarrollada en la Universidad de Costa Rica bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. Para más información escriba a pccmca@ucr.ac.cr o pccmca@gmail.com

Valley and Orinoquia) was established. The AMMI model and its biplot graph were used to determine phenotypic stability of the fruit yield and with the oil yield the net benefit and the benefit-cost ratio were determined. **Results.** In two of the three ecoregions used; dry Caribbean and Inter-Andean Valley, *J. curcas* presented an accumulated fruit yield of 3.6 t ha^{-1} and 6.7 t ha^{-1}, respectively; in the Orinoquia region the yield was less than 0.1 t ha^{-1}. The cost of a liter of *J. curcas* oil was US$1.07 for Albania (dry Caribbean) and US$1.24 for Espinal (Inter-Andean Valley), higher than that of African palm oil (*Elaeis guineensis*) of US$0.89. **Conclusion.** The fifteen *J. curcas* genotypes used in this study showed the best productive performance in Albania (dry Caribbean) and Espinal (Inter-Andean Valley), and the CJC3 genotype was the one with the best fruits and oil production.

Keywords: adaptability, cost benefit analysis, biofuel.

Introducción

Jatropha curcas L., con origen en Mesoamérica, es una especie conocida en muchos países como Piñón, Piñón manso o Tempate que está aún en condición silvestre y en proceso de mejoramiento genético (Pecina-Quintero et al., 2014). Tiene una amplia distribución entre los 30 °N y 35 °S (Jongchaap et al., 2007; Abobatta, 2019), se encuentra en Centroamérica, América del Sur, África, Asia y Oceanía (Pecina-Quintero et al., 2014).

J. curcas ha adquirido interés global económico por su contenido de aceite (30 % a 35 %), es apto para uso como biocombustible (Achten et al., 2010; Acevedo et al., 2016; Borah, 2018), la torta desengrasada contiene entre 40 % y 60 % de proteína que la hace aprovechable en la alimentación animal, después de eliminar compuestos tóxicos (Campuzano-Duque et al., 2016; Abobatta, 2019). Su cultivo se focaliza en áreas marginales, áridas y semiáridas, por su adaptación y plasticidad fenotípica para soportar períodos de sequía (Behera et al., 2010; Lama et al., 2016; Borah et al., 2018); además, ayuda a la rehabilitación de tierras degradadas, es mejoradora del suelo y controla la erosión (Gudeta, 2016; Abobatta, 2019); no obstante, en condiciones edafoclimáticas limitadas el rendimiento no es el óptimo (Achten et al., 2010).

El mejor desempeño productivo de *J. curcas* está reportado en suelos de textura liviana, bien drenados con buena aireación; mientras que en suelos de textura pesada tiene dificultades para crecer por limitación radical (Achten et al., 2008; Jingura et al., 2011; Krishnamurthy et al., 2012). Posee capacidad para soportar suelos básicos, con un pH entre 6,0 y 8,0 (Borah et al., 2018; Abobatta, 2019), puede tolerar el agua salina (Dagar et al., 2006). *J. curcas* ha co-evolucionado hacia la adaptación xerofítica con un requerimiento de precipitación anual mínima de 500 - 600 mm y óptima de 1000 a 1500 mm (Achten et al., 2008; Behera et al., 2010).

El aceite *de J. curcas* ha cobrado un auge a nivel mundial como biocombustible, sin competir con la seguridad alimentaria (Jongschaap et al., 2007). El aceite presenta una composición dominante de ácido graso oleico, linoleico, palmítico y esteárico, que lo hacen apto como biodiesel (Borah et al., 2018).

El rendimiento de fruto de *J. curcas* depende del componente genético (Krishnamurthy et al., 2012; Santoso et al., 2014; Lama et al., 2018), su variabilidad está determinada por las interacciones bióticas (plagas y enfermedades) y abióticos (suelo-fertilidad, temperatura y precipitación), y su manejo agronómico (Valdés-Rodríguez et al., 2013; Singh et al., 2014; Lama et al., 2018). En las regiones del trópico con buena disponibilidad de agua, *J. curcas* produce frutos todo el año debido a su asincronía floral; no obstante, su producción es heterogénea, va de 0,4 t ha^{-1} hasta 12,0 t ha^{-1} (Jones y Miller, 1992), con una media mundial de 2,2 t ha^{-1} (Lama et al., 2018); sin embargo, los modelos económicos estiman que el rendimiento para su viabilidad comercial debe ser entre 2,0 y 5,0 t ha^{-1} (Singh et al., 2014; Lama et al., 2018). Aún así, se reporta poco éxito comercial, consecuencia del uso de genotipos silvestres con un bajo rendimiento y ausencia de prácticas agronómicas óptimas (Singh et al., 2014; Lama et al.,

Agron. Mesoam. 31(2):277-290, mayo-agosto, 2020
ISSN 2215-3608 doi:10.15517/am.v31i2.39213

2016; Kumar et al., 2017; Borah et al., 2018). Si bien la información relacionada con la producción es incipiente en Colombia, sí existen muchos trabajos relacionados con la descripción de condiciones ambientales en las que la especie desarrolla óptimamente. Por esta razón, se realizó este estudio con el objetivo de conocer el desempeño productivo de *J. curcas* en tres ecorregiones de Colombia.

Materiales y métodos

Estructuración del ensayo de adaptación

Se utilizó el modelo genético ambiental (fenotipo= genotipo + ambiente + genotipo x ambiente) para determinar la interacción genotipo x ambiente mediante un ensayo de cultivo de quince genotipos de *J. curcas* en tres ecorregiones en Colombia, durante el período 2012 a 2014.

Localidades de evaluación y genotipos

El estudio se realizó en tres ecorregiones y siete localidades. Las ecorregiones fueron Orinoquía (O), Valles interandinos (VI) y Caribe seco (CS). Las localidades asociadas con la ecorregión y su georreferenciación fueron: Localidad 1: Albania-Guajira (CS) (11°09'39" N 72°35'32" O); Localidad 2: Espinal-Tolima (VI)(4°10'40" N 74°56'39" O); Localidad 3: Villavicencio-Meta (4°03'12" N 73°23'16" O) (O); Localidad 4: Puerto Gaitán (Taluma)-Meta (O)(4°22' 41" N 72°13'25" O); Localidad 5: Puerto Gaitán (Carimagua)-Meta (O)(4°06'10" N 71°12' 07" O); Localidad 6: Santa Rosalía-Vichada (O)(5°07'34" N 70°56'39" O); Localidad 7: Puerto Carreño-Vichada (O)(6°11'06" N 67°29'22" O).

Las localidades y sus ecorregiones asociadas presentan cinco diferencias asociadas con el clima y el suelo: 1) régimen de precipitación unimodal y bimodal, 2) precipitación desde 700 hasta 3200 mm, 3) gradiente de textura desde ligera a pesada, 4) pH del suelo ácido y básico, y 5) un nivel de fertilidad del suelo de media a baja (Cuadro 1). La ecorregión Caribe seco y Valle interandino coinciden en la precipitación bimodal, textura del suelo liviano (franco-arenosa), pH básico (6,2 a 6,4) y fertilidad media. No obstante, el principal contraste entre Caribe seco (Albania) y Valle interandino (Espinal) es la precipitación de 700 mm y de 1200, respectivamente. Las localidades

Cuadro 1. Características de suelo y clima de tres ecorregiones y siete localidades de evaluación de quince genotipos de *Jatropha curcas* en Colombia. 2012-2014.

Table 1. Soil and climate characteristics of three ecoregions and seven evaluation locations of fifteen Jatropha curcas genotypes in Colombia. 2012-2014.

Ecorregión	Localidad (Departamento)	Altitud (msnm)	Precipitación (régimen) mm	Textura	pH	Fertilidad
Caribe seco	Albania (Guajira)	240	700 Bimodal	Fa	Básico 6,4	media
Valle interandino	Espinal (Tolima)	323	1200 Bimodal	Fa	Básico 6,2	media
Orinoquía	Villavicencio (Meta)	467	3200 Unimodal	Far	Ácido 4,5	baja
Orinoquía	Puerto Gaitán (Taluma) (Meta)	149	2800 Unimodal	Far	Ácido 4,7	baja
Orinoquía	Puerto Gaitán (Carimagua) (Meta)	140	2800 Unimodal	Far	Ácido 4,6	baja
Orinoquía	Santa Rosalía (Vichada)	50	2100 Unimodal	Far	Ácido 4,5	baja
Orinoquía	Puerto Carreño (Vichada)	51	2100 Unimodal	Far	Ácido 4,6	baja

Fa: franco arenoso, Far: franco-arcilloso / Fa: sandy loam, Far: loamy-loamy.

de la Orinoquía se diferencian de las otras dos ecorregiones, por el tipo de precipitación unimodal con nueve meses de lluvia y tres meses de sequía desde 3200 mm en Villavicencio hasta 2100 mm en Puerto Carreño, textura del suelo pesada (franco-arcilloso), pH ácido (4,5 a 4,7) y de fertilidad baja. En todas las ecorregiones y localidades coincide una época seca de tres meses y su ubicación en altitudes menor a 500 msnm, desde 50 msnm en Santa Rosalía hasta 467 msnm en Villavicencio.

Diseño experimental

En cada localidad se utilizó un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con quince tratamientos y tres repeticiones (bloques). Los tratamientos se constituyeron por quince genotipos de *J. curcas*, identificados del 1 al 15 con la sigla de CJC (Colección Jatropha Colombia) (Campuzano-Duque, et al., 2016). La procedencia de los materiales fue: V1 al V9 genotipos locales del Caribe seco (Guajira) y la Orinoquía (Meta) en Colombia, V10 de Ecuador, V11 de la India, V12 de México, V13 variedad Cabo Verde, V14 de Tailandia y V15 de Venezuela (Biollanos). La unidad experimental estuvo constituida por veinte plantas de cada genotipo, establecidas con una distancia de siembra de 3 m x 2 m que constituyeron una densidad de plantas de 1666 plantas ha^{-1}.

Establecimiento y manejo agronómico

El establecimiento en campo se realizó en el segundo semestre del 2009 en las localidades de Villavicencio, Espinal y Albania, y en el segundo semestre del 2010 en Puerto Gaitán (Taluma y Carimagua) y Santa Rosalía. El método de siembra de los genotipos de *J. curcas* fue por semilla, en una previa etapa de vivero. Solo en las cuatro localidades de la Orinoquía, por la acidez del suelo (4,5 a 4,7), se realizó la aplicación, tres meses antes del establecimiento de plantas, de 4 t ha^{-1} de cal dolomítica, para acondicionar el suelo a una saturación de bases en porcentaje de 20-40 a 60-80. En cada localidad se realizó la preparación del suelo con un pase de arado de cincel vibratorio y dos pases de rastra. Se realizaron dos tipos de fertilización: de establecimiento y de mantenimiento. La fertilización de establecimiento se realizó con la aplicación al momento de la siembra de nitrógeno, fósforo y potasio en dosis en kg ha^{-1} de 100, 100 y 150, cantidades recomendadas para un rendimiento de 4 t ha^{-1} de fruto (Kalannavar, 2009; Kumar et al., 2017), y la de mantenimiento con la aplicación de 50 kg ha^{-1} de nitrógeno y 50 kg ha^{-1} de fósforo después de cada cosecha y poda de producción. En cada ecorregión y localidad, con excepción de Albania (Caribe seco), se realizaron podas de las ramas plagiotrópicas después de cada cosecha.

Variables de evaluación

En cada localidad, unidad experimental y repetición, se determinaron las siguientes variables:

a) Rendimiento acumulado de fruto, ajustado al 14 % de humedad y expresado en t ha^{-1}. Para ello, el fruto colectado en cada cosecha se desgregó por sus componentes: pulpa, fruto, cascarilla, almendra, torta y aceite; del fruto, se obtuvo la almendra y de esta, el aceite crudo por extracción química, utilizando el método Soxhlet (Jensen, 2007). El rendimiento acumulado de fruto en cada localidad se obtuvo con base en seis cosechas en Espinal (Valle interandino) y en Albania (Caribe seco), y dos en cada una de las cinco localidades de la Orinoquía.

b) rendimiento acumulado de aceite, determinado en el genotipo CJC3 que presentó el mayor rendimiento en Albania (Caribe seco) y en Espinal (Valle interandino), y obtenido de la sumatoria del rendimiento de aceite de cada cosecha y expresado en l ha^{-1}.

Agron. Mesoam. 31(2):277-290, mayo-agosto, 2020
ISSN 2215-3608 doi:10.15517/am.v31i2.39213

El análisis económico solo se realizó en las localidades de Espinal y Albania, con el genotipo CJC3, y se determinaron las siguientes variables:

a) Costo de producción desde vivero hasta los 514 días después del trasplante (ddt): preparación-suelo, vivero, siembra-establecimiento, nutrición, manejo de plagas, control de malezas, podas, cosecha de fruto (incluye despulpado y extracción de aceite), rubros expresados en US$.

b) Valor de la producción acumulada de aceite, calculado con base en el precio en Rotterdam (2014) (US$1,15 por tonelada).

c) Costo de producción de un litro de aceite, obtenido mediante la relación costo de producción/rendimiento de aceite acumulado, expresado en US$.

d) Beneficio neto, se obtuvo con base en la relación del valor de la producción acumulada de aceite menos el costo de producción, expresado en US$.

e) Relación costo/beneficio obtenido de la relación beneficio neto/costo de producción. Se tomó como referente el precio del aceite de palma crudo (US$ 0,89 l^{-1}, año 2014) (Fedepalma, 2014).

Procedimientos estadísticos y análisis de estabilidad fenotípica

Para la variable rendimiento acumulado de fruto, mediante el procedimiento Proc Univariate (SAS Institute Inc., 2003), se determinaron los cumplimientos de los supuestos del análisis de varianza; los procedimientos y análisis estadísticos se realizaron con el programa SAS Institute Inc. (2003) versión 9.3. Para establecer las diferencias entre medias se utilizó la prueba de Tukey (p=0,01). Para el análisis de varianza, las localidades y las repeticiones se consideraron efectos aleatorios y los genotipos, efectos fijos.

El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$Yijk = \mu + Gi + Aj + (GA)ij + Bk(j) + Eijk$$

Donde:

Yijk= rendimiento acumulado de fruto promedio del i-ésimo genotipo obtenido en el j-ésimo ambiente y k-ésima repetición.

μ= efecto de la media general.

Gi= efecto del i-ésimo genotipo.

Aj= efecto del j-ésimo ambiente.

(GA)ij= efecto de la interacción entre el i-ésimo genotipo y el j-ésimo ambiente.

Bk(j)= efecto de la k- ésima repetición en el j-ésimo ambiente.

Eijk= efecto aleatorio del error experimental asociado al i-ésimo genotipo en el j-ésimo ambiente y K-ésima repetición.

La interacción genotipo x localidad se estudió para la variable rendimiento de fruto, utilizando el modelo (AMMI) (efectos principales aditivos e interacciones multiplicativas) descrito por Gabriel (1971) y Crossa et al. (2002). El nivel de significancia (p=0,01) de los valores de componentes principales se determinó con la prueba de Gollob (1968).

ISSN 2215-3608 doi:10.15517/am.v31i2.39213

Resultados

Rendimiento de fruto acumulado

El análisis de varianza combinado a través de localidades para el rendimiento acumulado de fruto, de acuerdo con el modelo AMMI, mostró que los factores localidad, genotipo y la interacción genotipo x localidad presentaron significancia estadística (p=0,01). La mayor participación de la variación total del rendimiento acumulado se debió a la interacción genotipo x localidad (38,6 %), superior a la observada por el componente genético-genotipo (12,4 %) y el componente ambiental-localidad (5,4 %). Con base en el análisis AMMI, se estableció mediante la prueba de Gollobs (p=0,01), que los dos primeros componentes principales con una significancia (α<0,01) explicaron el 99,9 % de la interacción genotipo x localidad. Los otros componentes CP3 a CP6 no fueron significativos y sus valores de participación fueron de poco valor en la explicación del modelo (Cuadro 2). Este resultado permite una interpretación confiable del comportamiento de la interacción genotipo x localidad, ya que un valor aceptable es en proporción mayor a 75 % (Crossa et al., 2002).

Cuadro 2. Análisis AMMI para el rendimiento acumulado de fruto (kg ha^{-1}) a los 514 ddt de quince genotipos de *Jatropha curcas* L., en tres ecorregiones en Colombia. 2012-2014.
Table 2. AMMI analysis for the accumulated fruit yield (kg ha^{-1}) at 514 ddt of fifteen *Jatropha curcas* L. genotypes, in three ecoregions in Colombia. 2012-2014.

Fuente variación F. de V.	Grados de libertad	Cuadrado medio	Participación F. de V. (%)	Acumulado CP (%)
Localidad-L	6	53 957*	5,4	
Repetición (L)	14	1 755 921		
Genotipo-G	14	1 427 062**	12,4	
Genotipo x localidad	84	6 600 050**	38,6	
Componente principal 1	19	2 749 496**		89,72
Componente principal 2	17	186 322**		99,93
Componente principal 3	15	1719 ns		99,98
Componente principal 4	13	578 ns		99,99
Componente principal 5	11	213 ns		99,99
Componente principal 6	9	66 ns		100,00
Error	196	3 057 600		

*, **, ns= diferencias significativas a α<0,05, α<0,01 y no significativa, respectivamente (prueba de Gollobs) para componentes principales CP1 y CP2. (1) = porcentaje de participación en la variación total; (2) = porcentaje acumulado / *, **, ns= significant differences at α<0.05, α<0.01, and not significant, respectively (Gollobs test) for main components CP1 and CP2. (1) = percentage of total variation; (2) = accumulated percentage.

El rendimiento acumulado de fruto fue de 3027 kg ha^{-1} en Albania y 4896 kg ha^{-1} en Espinal, a diferencia del obtenido en las cinco localidades de la Orinoquía, que no lograron superar los 150 kg ha^{-1}. En Albania, el rendimiento varió entre 1298 kg ha^{-1} con el genotipo CJC6 y 3643 kg ha^{-1} con el genotipo CJC3, y en Espinal entre 2199 kg ha^{-1} con el genotipo CJC6 y 6712 kg ha^{-1} con el genotipo CJC3. En estas dos localidades (Espinal y Albania) coincidió CJC3 como el genotipo con el mayor rendimiento acumulado de fruto (Cuadro 3).

Agron. Mesoam. 31(2):277-290, mayo-agosto, 2020
ISSN 2215-3608 doi:10.15517/am.v31i2.39213

Cuadro 3. Rendimiento acumulado de fruto (kg ha^{-1}) a los 514 ddt de quince genotipos de *Jatropha curcas* L., evaluados en tres ecorregiones (Caribe seco-CS; Valles interandinos-VI; Orinoquía-O) y siete localidades en Colombia. 2012-2014.

Table 3. Fruit yield accumulated (kg ha^{-1}) at 514 ddt of fifteen *Jatropha curcas* L. genotypes, evaluated in three ecoregions (dry Caribbean-CS, Inter-Andean Valleys-VI, Orinoquía-O) and seven locations in Colombia. 2012-2014.

Genotipo	CS	VI	Ecorregión/localidad				
			O				
	Albania	Espinal	Villavicencio	Puerto Gaitán 1	Puerto Gaitán 2	Santa Rosalia	Puerto Carreño
CJC 1	3426 a	5294 ab	162,9 a	62,1 ab	21,1 d	14,4 d	18,7 c
CJC 2	3166 a	5228 ab	133,1 a	86,7 a	25,0 d	18,8 d	14,3 c
CJC 3	3643 a	6712 a	184,0 a	80,8 a	23,1 d	25,7 d	18,9 c
CJC 4	3215 a	5440 ab	176,2 a	81,8 a	38,4 cd	29,4 d	26,7 ab
CJC 5	2382 b	3613 c	80,1 b	32,7 cd	15,7 e	11,9 d	9,5 d
CJC 6	1298 c	2199 d	50,6 c	54,0 c	34,1 cd	15,4 d	9,5 d
CJC 7	3438 a	5393 ab	175,1 a	78,2 a	42,4 cd	28,7 d	19,7 c
CJC 8	3324 a	6384 a	165,5 a	85,8 a	51,9 c	29,1 d	29,6 ab
CJC 9	3135 a	5556 ab	164,6 a	83,2 a	50,7 c	42,7 c	38,9 ab
CJC 10	3167 a	5422 ab	192,7 a	84,2 a	72,4 ab	42,0 c	39,5 ab
CJC 11	2076 b	3283 c	72,3 b	60,6 ab	33,3 cd	19,6 d	18,3 c
CJC 12	3495 a	5172 ab	189,5 a	77,6 a	82,8 a	46,4 c	37,3 ab
CJC 13	3158 a	4143 bc	70,1 b	56,5 c	81,2 a	50,8 ab	41,2 a
CJC 14	3258 a	5216 ab	182,1 a	75,2 a	91,0 a	61,8 a	51,5 a
CJC 15	3226 a	4380 bc	85,6 b	66,8 ab	85,2 a	70,5 a	41,0 a
Promedio	3027 b	4896 a	138,9 c	69,1 d	49,9 d	33,8 de	27,7 e

a,b,c,d Medias con distinta literal en la misma columna indica diferencias con p≤0,05 (Tukey) / a,b,c,d Means with different literal in the same column indicate differences with p≤0.05 (Tukey).

Con base en el gráfico biplot del modelo AMMI (Figura 1), se determinó el reconocimiento de: a) genotipos con adaptación general, aquellos asociados y cercanos al vértice cero; b) genotipos con adaptación específica, aquellos asociados al vértice del vector de una o varias localidades, y c) el aporte de cada localidad en la interacción genotipo x localidad (mayor longitud del vector mayor aporte en la interacción y viceversa), y la potencia para discriminar genotipos. Albania y Espinal presentaron, por su mayor longitud del vector-localidad, el mayor aporte a la interacción genotipo x localidad, y las cinco localidades de la ecorregión Orinoquía presentaron la menor longitud de los vectores-localidad, indicando bajo aporte en la interacción genotipo x localidad.

La adaptación específica reconocida en el gráfico biplot como la ubicación de un genotipo próximo con el vector de una o varias localidades, mostró dos genotipos asociados al vector-localidad. El genotipo CJC3 (identificado como SS) asociado a la localidad de Albania y el genotipo CJC12 asociado a la localidad de Espinal (identificado como JJ) (Figura 1).

Indicadores económicos

La producción acumulada de aceite (l ha^{-1}) de 3,10 en Espinal y 1,66 en Albania, tuvo un costo de producción de US$3865 y US$1783 para la primera y segunda localidad, respectivamente. Los rubros asociados con esta producción fueron en Espinal: nutrición (26,6 %), cosecha (20,5 %), control de malezas (16,7 %) y siembra-establecimiento (11,3 %), y en Albania, lo fueron siembra-establecimiento, preparación del suelo, cosecha y control de malezas con valores de 26,2 %, 24,6 %, 23,6 % y 11,8 %, respectivamente (Cuadro 4). En Espinal, el modelo de

ISSN 2215-3608 doi:10.15517/am.v31i2.39213

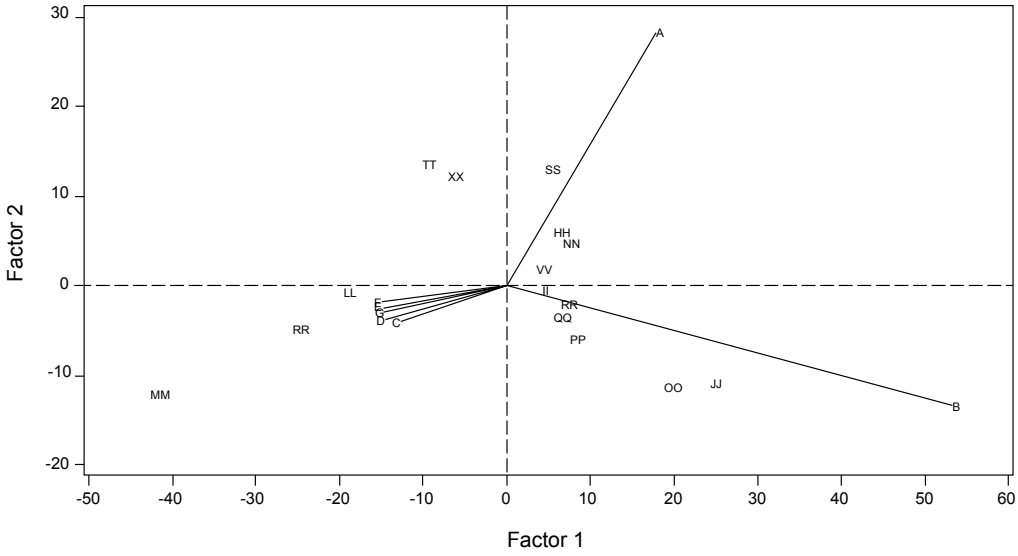

Figura 1. Representación de genotipos y ambientes respecto a los dos primeros componentes CP1 y CP2 del análisis AMMI para el rendimiento de fruto de quince genotipos de *J. curcas* evaluados en siete localidades. Colombia, 2012-2014.

Localidades: A= Albania; B= Espinal; C= Villavicencio; D= Puerto Gaitán1; E= Puerto Gaitán2; F= Santa Rosalía; G= Puerto Carreño.

Figure 1. Representation of genotypes and environments with respect to the first two components CP1 and CP2 of the AMMI analysis for the fruit yield of fifteen *J. curcas* genotypes evaluated in seven locations. Colombia, 2012-2014.

Locations: A= Albania; B= Espinal; C= Villavicencio; D= Puerto Gaitán1; E= Puerto Gaitán2; F= Santa Rosalía; G= Puerto Carreño.

Cuadro 4. Costo de producción (US$ ha^{-1}, año 2014) y participación por rubro de *Jatropha curcas* L., CJC3 en dos ecorregiones (Caribe seco-Albania; Valle interandino-Espinal) en Colombia. 2012-2014.

Table 4. Cost of production (US$ ha^{-1}, year 2014) and participation by category of *Jatropha curcas* L., CJC3 in two ecoregions (dry Caribbean-Albania, Interandean Valley-Espinal) in Colombia. 2012-2014.

Rubro	**Localidad**		**Participación en el total (%)**	
	Espinal	**Albania**	**Espinal**	**Espinal**
Preparación-suelo	212	440	5,5	**24,6**
Vivero	142	125	3,7	7,0
Siembra y establecimiento	435	464	**11,3**	**26,0**
Nutrición	1030	0,0	**26,6**	0,0
Manejo Integrado de plagas	0,0	0,0	0,0	0,0
Control de malezas	645	210	**16,7**	**11,8**
Podas	338	0,0	8,7	0,0
Cosecha-despulpado	792	420	**20,5**	**23,6**
Extracción aceite	271	124	7,0	7,0
Total	**3865**	**1783**	**100**	**100**

Agron. Mesoam. 31(2):277-290, mayo-agosto, 2020
ISSN 2215-3608 doi:10.15517/am.v31i2.39213

producción de *J. curcas*, presentó valores negativos de US$ de -300 y US$-0,07, para el beneficio neto y relación beneficio/costo, respectivamente; a diferencia de Albania, estos dos indicadores fueron positivos de US$125 y US$0,07, respectivamente. El costo objetivo por litro de aceite como un indicador de eficiencia productiva fueron US$1,24 y US$1,07 para Espinal y Albania, respectivamente (Cuadro 5).

Cuadro 5. Indicadores productivos y económicos para *Jatropha curcas* CJC3**,** en dos ecorregiones (Caribe seco-Albania; Valle interandino-Espinal) en Colombia. 2012-2014.

Table 5. Productive and economic indicators for *Jatropha curcas* CJC3, in two ecoregions (dry Caribbean-Albania, Interandean Valley-Espinal) in Colombia. 2012-2014.

Variable	Localidad	
	Espinal	**Albania**
Rendimiento acumulado fruto (t ha^{-1})	6,7	3,6
Rendimiento acumulado aceite (t ha^{-1}) (1)	3,10	1,66
Meses acumulados	17	17
Costo producción aceite (US$ ha^{-1})	3865	**1783 (1516)**
Valor producción de aceite	3565	1909
Beneficio neto (US$)	-300	125 (393)
Costo producción US$ por litro	1,24	**1,07 (0,89)**
Relación beneficio-costo	-0,07	0,07 (0,25)

Valor aceite de *J. curcas* (USD$ 1,15 por litro, 2014); valor aceite de palma crudo (USD$0,89 por litro, 2014); valor dólar en Colombia año 2014 ($2000); (1): extracción de aceite (46 %). Valores en paréntesis Albania (escenario hipotético reducción 15 % costo de producción) / Oil value of *J. curcas* (USD$1,15 per liter, 2014); value of crude palm oil (USD$ 0,89 per liter, 2014); dollar value in Colombia year 2014 ($2000); (1): oil extraction (46 %); values in parenheses Albania (hypothetical scenario reduction production cost, 15 %).

Tomando como referente el costo del aceite de palma africana de US$0,89 por litro (año 2014) (Fedepalma, 2014), los costos de producción en Espinal y Albania presentaron una diferencia mayor en USD$ 0,35 y US$ 0,10, respectivamente. En el escenario hipotético de lograr un equilibrio entre el precio del aceite de *J. curcas* y la palma africana, solo con una reducción del 15 % en los costos de producción en Albania se alcanzaría un costo de USD$ 1516 óptimo, para lograr el valor del aceite de *J. curcas* de USD$ 0,89 por litro (Cuadro 5).

Los indicadores económicos presentados fueron transversales, solo hacen referencia al año 2014 (tercer año de la plantación después del establecimiento). Al tratarse de una plantación nueva (tres años), se debe considerar que a partir del establecimiento la producción se incrementa cada año, estabilizándose en el quinto año, por lo que es de esperar que el beneficio sea incremental hasta el quinto año que alcanza su techo de rendimiento. Debido a que una plantación puede tener una vida útil aproximada a los veinticinco años, los precios no pueden ser garantizados y cualquier cambio futuro afectaría el beneficio.

Discusión

El rendimiento de fruto acumulado presentó tres grupos clasificados como alto, medio y bajo, los cuales se asociaron con el clima y el suelo. El primer grupo, de alto rendimiento en kg ha^{-1} de 2199 a 6712, en el Valle

interandino (Espinal-Tolima) y el segundo grupo, intermedio con un rendimiento en kg ha^{-1} de 1298 a 3693 observado en el Caribe seco (Albania-Guajira). Estos dos grupos, estuvieron asociados con el tipo de precipitación bimodal, textura del suelo liviana, suelos básicos y nivel de fertilidad media. El tercer grupo, de bajo rendimiento (hasta 150 kg ha^{-1}) estuvo asociado con la Orinoquía, con una precipitación unimodal, textura del suelo pesada, con un pH ácido y de fertilidad baja.

Tres fenómenos biológicos asociados con el comportamiento productivo ocurrieron en la evaluación de *J. curcas* en Colombia: asincronía floral, aborto floral y bajo número de flores hembras. El primero, se observó en todas las localidades y ecorregiones, con presencia de los diferentes estados de desarrollo de flores y fruto en la planta (flores, fruto verde, amarillo-café y café) (Figura 2), fenómeno ya descrito por Campuzano-Duque y Cardeño-López (2017) en Colombia con una relación desuniforme de frutos 19:31:36:14 (verde: amarillo: amarillo-café y café). Este carácter de asincronía floral fue descrito por otros investigadores (Dasumiati et al., 2017) y constituye además en un factor limitante para el rendimiento de frutos. El aborto floral, solo se observó después de la segunda cosecha en las cinco localidades de la ecorregión Orinoquía (Figura 3) en porcentajes cercanos al 90 % y fue una de las principales causas del bajo o casi nulo rendimiento obtenido en esta ecorregión. La relación de flores macho: hembra fue alta similar a valores reportados de 29:1 (Solomon y Ezradaman, 2002), 13,1:1 en la India (Kaur et al., 2011) y de 25-30:1 (Gangwar et al., 2016), y se constituye en una de las principales causas del bajo rendimiento de *J. curcas*.

Figura 2. Asincronía floral en *J. curcas* con presencia de diferentes estados desarrollo del fruto. Espinal, Colombia. 2012-2014. Fotografía Luis F. Campuzano Duque.

Figure 2. Floral asynchrony in *J. curcas* with presence of different stages of fruit development. Espinal, Colombia. 2012-2014. Photography Luis F. Campuzano Duque.

Agron. Mesoam. 31(2):277-290, mayo-agosto, 2020
ISSN 2215-3608 doi:10.15517/am.v31i2.39213

Figura 3. a. Flores de *J. curcas* con 90 % de aborto floral en Villavicencio, Colombia. **b.** Flores de *J. curcas* sin aborto floral en Espinal, Colombia. AGROSAVIA, 2012-2014. Fotografía: Luis F Campuzano Duque.

Figure 3. a. *J. curcas* flowers with 90 % floral abortion in Villavicencio, Colombia. 2012. **b.** Flowers of *J. curcas* without floral abortion in Espinal, Colombia. AGROSAVIA. 2012-2014. Photography: Luis F Campuzano Duque.

El rendimiento de fruto acumulado como un indicador de desempeño productivo y de adaptación de *J. curcas* en Colombia, estuvo asociado con el clima y suelo. El primer grupo de alto rendimiento en Espinal (6,7 t ha-^{1}) y Albania (3,6 t ha^{-1}) presentaron un rendimiento superior al rendimiento promedio mundial (2,2 t ha^{-1} año^{-1}) y estuvieron asociados a un tipo de precipitación bimodal, con valores entre 700 y 1200 mm, suelos básicos y textura liviana.

En contraste, las cinco localidades de la Orinoquía no lograron superar el rendimiento acumulado de fruto de 0,1 t ha^{-1}, en condiciones diametralmente diferentes con mayor precipitación (entre 2100 y 3200 mm) de tipo unimodal, suelos ácidos, de textura pesada y fertilidad baja. En las cinco localidades de la Orinoquía, predominó el aborto floral (90 %) después de la segunda cosecha (Figura 3), razón por la cual el rendimiento fue insignificante, el cual no logró superar los 150 kg ha^{-1}. Las condiciones de acidez y alta precipitación en la Orinoquía fueron quizás lo que más incidió en el aborto floral; efecto reportado por Abobatta (2019) en África, en plantaciones de pequeños productores, donde el 41 % de 246 predios las plantas presentaron bajo o muy bajo rendimiento. El bajo rendimiento de *J. curcas* ha sido la causa de que muchos agricultores en India y América Latina hayan abandonado sus cultivos, por haber obtenido el rendimiento esperado (Lama et al., 2016).

La heterogeneidad del rendimiento de los genotipos evaluados en Colombia, con valores de rendimiento (t ha^{-1}) desde 1298 a 3643 en Albania y desde 2199 a 6712 en Espinal, coincidieron con el comportamiento heterogéneo del rendimiento de *J. curcas* a nivel mundial (Alam et al., 2011; Dasumiati et al., 2017; Abobatta, 2019), y es explicado por la condición genética intrínseca de la especie, que aún posee un alto grado de condición silvestre y por su condición de alogamia (protoginia y geitonogamia) (Solomon y Ezradanam, 2002; Gangwar et al., 2016; Dasumiati et al., 2017), su asincronía floral y por la relación alta de flores macho:hembra (Solomon y Ezradaman, 2002; Kaur

et al., 2011; Gangwar et al., 2016), sumado a las prácticas agronómicas variables, climas específicos del sitio y fertilidad del suelo (Lama et al., 2018). Considerando lo anterior, los reportes a nivel mundial del rendimiento se hacen aún más difíciles de comprender por la heterogeneidad de los datos en relación con la unidad de expresión del rendimiento en unidades como: rendimiento de semilla, de fruto, por planta, por parcela y escasamente expresado en rendimiento por hectárea, y manejo (tipo de semilla, densidad de plantas, nutrición, riego, nutrición y podas) (Solomon y Ezradanam, 2002; Lama et al., 2018).

Conclusiones

Los quince genotipos de *J. curcas* evaluados en este estudio tuvieron el mejor desempeño productivo en Albania (Caribe seco) y en Espinal (Valle interandino). El genotipo CJC3 tuvo la mejor producción de frutos y de aceite. *J. curcas* solo presentó adaptación en Albania (Caribe seco) y en Espinal (Valle interandino). Los indicadores económicos del aceite del genotipo CJC3 no fueron competitivos.

Agradecimientos

Esta investigación fue posible al apoyo económico del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR), Empresa Colombiana de Petróleo (Ecopetrol), Carbones de Colombia (Cerrejón) y Departamento Nacional de Ciencia y Tecnología (Colciencias). Agradecimiento a los asistentes de investigación Heber Camargo y Pedro García del Centro de Investigación de Corpoica CI La Libertad, por su trabajo de apoyo en el campo.

Literatura citada

Abobatta, W.F. 2019. *Jatropha curcas*: an overview. J. Adv. Agric. 10:1650-1656. doi:10.24297/jaa.v10i0.8145

Acevedo, P., I. Cabeza, J. Puello, and E. Benedetti. 2016. Mobile plant for biodiesel production from *Jatropha curcas* seeds, in Colombian Caribbean regions. Chem. Eng. Trans. 50:283-288. doi:10.3303/CET1650048

Achten, W., W.H. Maes, R. Aerts, L. Verchot, A. Trabucco, E. Mathijs, V.P. Singh, and B. Muys. 2010. Jatropha: from global hype to local opportunity. J. Arid Environ. 74:164-165. doi:10.1016/j.jaridenv.2009.08.010

Achten, W.M.J., L. Verchot, Y.J. Franken, E. Mathijs, V.P. Singh, R. Aerts, and B. Muys. 2008. Jatropha bio-diesel production and use. Biomass Bioen. 32:1063-1084. doi:10.1016/j.biombioe.2008.03.003

Alam, N.C.N., T.L. Abdullah, and N.A.P. Abdullah. 2011. Flowering and fruit set under Malaysian climate of *Jatropha curcas* L. Am. J. Agric. Biol. Sci. 6:142-147. doi:10.3844/ajabssp.2011.142.147

Behera, S.K., P. Srivastava, R. Tripathi, J.P. Singh, and N. Singh. 2010. Evaluation of plant performance of *Jatropha curcas* L. under different agro-practices for optimizing biomass – A case study. Biomass Bioen. 34:30-41. doi:10.1016/j.biombioe.2009.09.008

Borah, N., S. Mapelli, P. Pecchia, K.D. Mudoi, B. Chaliha, A. Gogoi, A. Doley, R. Kotoky, and S.P Saikia. 2018. Variability of growth and oil characteristics of *Jatropha curcas* L., in India. Biofuels 2018:1472979. doi:10.1080/17597269.2018.1472979

Campuzano-Duque, L.F., and F. Cardeño-López. 2017. Measurement of fruit color-heterogeneity index and their relation to *Jatropha curcas* L., oil in Colombia. Acta Agron. 66:9-14. doi:10.15446/acag.v66n1.50736

Campuzano-Duque, L.F., L.A. Ríos, y F. Cardeño-López. 2016. Caracterización composicional del fruto de 15 genotipos de *Jatropha curcas* L. en el departamento del Tolima, Colombia. Cienc. Tecnol. Agropecu. 17:379-390. doi:10.21930/rcta.vol17_num3_art:514

Crossa, J., P. Cornelius, and W. Yan. 2002. Biplots of linear-bilinear models for studying crossover genotype environment interaction. Crop. Sci. 42:619-633. doi:10.2135/cropsci2002.6190

Dagar, J.C., O.S. Tomar, Y. Kumar, H. Bhagwan, R.K. Yadav, and K. Tyagi. 2006. Performance of some under-explored crops under saline irrigation in a semiarid climate in Northwest India. Land Degrad. Dev. 17:285-299. doi:10.1002/ldr.712

Dasumiati, M., M. Miftahudin, T. Triadiati, and A. Hartana. 2017. Sex types in flowering of *Jatropha curcas*. Biodiversitas 18:442-446. doi:10.13057/biodiv/d180158

Fedepalma (Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite). 2014. Precios de referencia Fondo de Fomento Palmero. Fedepalma, Bogotá, COL. http://web.fedepalma.org/precios-de-referencia-del-fondo-de-fomento-palmero (consultado mar. 2019).

Gabriel, K.R. 1971. The biplot graphic of matrices with application to principal component analysis. Biometrika 58:453-467. doi:10.2307/2334381

Gangwar, M., H. Sood, and R.S. Chauchan. 2016. Genomic and relative expression analysis identifies key genes associated with a high proportion of female to male flowers in *Jatropha curcas* L. Mol. Biol. Rep. 43:305-322. doi:10.1007/s11033-016-3953-7

Gollob, H.F. 1968. A statistical model which combines features of factor analytic and analysis of variance techniques. Psychometrika 33:73-115. doi:10.1007/BF02289676

Gudeta, T.M. 2016. Composición química, potencial de biodiesel y usos de *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae). Am. J. Agric. For. 4(2):35-48. doi:10.11648/j.ajaf.20160402.15

Jensen, W.B. 2007. The origin of the Soxhlet extractor. J. Chem. Educ. 82:12. doi:10.1021/ed084p1913

Jingura, RM., R. Matengaifa, D. Musademba, and K. Musiyiwa. 2011. Characterisation of land types and agro-ecological conditions for production of *Jatropha* as a feedstock for biofuels in Zimbabwe. Biomass Bioen. 35:2080-2086. doi:10.1016/j.biombioe.2011.02.004

Jones, N., and J.H. Miller. 1992. *Jatropha curcas*: A multipurpose species for problematic sites. World Bank, WA, USA.

Jongschaap, R.E.E., W.J. Corre, P.S. Bindraban, and W.A. Brandenburg. 2007. Claims and facts on Jatropha curcas L.: Global Jatropha curcas evaluation, breeding and propagation programme. Plant Research International, Wageningen, NLD.

Kalannavar, V.N. 2009. Effect of major nutrients on growth and yield of *Jatropha curcas* L. Karnataka J. Agric. Sci. 22:1095-1096.

Kaur, K., G.P.S. Dhillon, and R.I.S. Gill. 2011. Floral biology and breeding system of *Jatropha curcas* in North-Western India. J. Trop. For. Sci. 23(1):4-9.

Krishnamurthy, L., M. Zaman-Allah, S.P. Wani, and A. Rao. 2012. Root growth in Jatropha and its implications for drought adaptation. Biomass Bioen. 39:247-52. doi:10.1016/j.biombioe.2012.01.015

Kumar, A., N. Patil, R. Kumar, and D. Mandal. 2017. Irrigation scheduling and fertilization improves production potential of Jatropha (*Jatropha curcas* L.). Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci. 6:1703-1716. doi:10.20546/ijcmas.2017.605.185

Lama, A.D., J. Kim, O. Martiskainen, T. Klemola, J.P. Salminen, and P. Niemelä. 2016. Impacts of simulated drought stress and artificial damage on concentrations of flavonoids in *Jatropha curcas* (L.), a biofuel shrub. J. Plant Res. 129:1141-1150. doi:10.1007/s10265-016-0850-z

Lama, A. D., T. Klemola, I. Saloniemi, P. Niemela, and T. Vuorisato. 2018. Factors affecting genetic and seed yield variability of *Jatroha curcas* (L.) across the globe: A review. Energy for Sustainable Development 42:170-182. doi:10.1016/j.esd.2017.09.002.

Pecina-Quintero, V., J.L. Anaya-López, A. Zamarripa-Colmenero, and C. A. Núñez-Colín. 2014. Genetic structure of *Jatropha curcas* L. in Mexico and probable centre of origin. Biomass Bioen. 60:147-155. doi:10.1016/j.biombioe.2013.11.005

Santoso, B.B., B.S. Purwoko, and I.K.D. Jaya. 2014. Yield of *Jatropha curcas* L. accessions of West Nusa Tenggara during five a year production cycle on a degraded agricultural land. J. Degraded Min. Lands Manage. 1:123-130. doi:10.15243/jdmlm.2014.013.123

SAS Institute Inc. 2003. User´s guide Version 9.3. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.

Singh, K., B. Singh, S.K. Verma, and D.D. Patra. 2014. *Jatropha curcas*: A ten year story from hope to despair. Renew. Sustain. Energy Rev. 35:356-360. doi:10.1016/j.rser.2014.04.033

Solomon, A.J., and V. Ezradaman. 2002. Pollination ecology and fruiting behaviour in a monoecious species, *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae). Curr. Sci. 83:1395-1398.

Valdés-Rodríguez, O.A., O. Sánchez-Sánchez, A. Pérez-Vásquez, J.S. Caplan, and F. Danjon. 2013. *Jatropha curcas* L. root structure and growth in diverse soils. Sci. World J. 2013:827295. doi:10.1155/2013/827295

Agron. Mesoam. 31(2):277-290, mayo-agosto, 2020
ISSN 2215-3608 doi:10.15517/am.v31i2.39213