



**POTENCIAL PARA PRODUCIR *Jatropha curcas* L. COMO MATERIA PRIMA PARA BIODIESEL EN EL ESTADO DE VERACRUZ**

**[POTENTIAL TO PRODUCE *Jatropha curcas* L. AS FEEDSTOCK FOR BIODIESEL IN THE STATE OF VERACRUZ]**

**Héctor Daniel Inurreta Aguirre<sup>1\*</sup>, Eliseo García Pérez, Jesús Uresti Gil<sup>2</sup>, Juan Pablo Martínez Dávila<sup>1</sup> and Hipólito Ortiz Laurel<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Colegio de Postgraduados Email: inurreta.daniel@gmail.com, geliseo@colpos.mx, jpmartin@colpos.mx, hlaurel@colpos.mx*

<sup>2</sup>*Instituto Nacional de Investigaciones Agrícola y Pecuaria Email: uresti.jesus@inifap.gob.mx*

*\*Corresponding author*

**RESUMEN**

Existe un gran interés en utilizar *Jatropha curcas* L. (*J. curcas*) como materia prima para producir biodiesel. Sin embargo, es necesario identificar áreas con condiciones agroecológicas óptimas y estimar su productividad en distintos usos actuales de suelo, con el fin de coadyuvar a incrementar la eficiencia energética y económica de su cultivo. El objetivo de este trabajo fue conocer la variación del potencial productivo de *J. curcas* en respuesta a las distintas condiciones edafoclimáticas del estado de Veracruz. Se utilizó el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), para simular el rendimiento de semilla de *J. curcas*. La unidad de cálculo fueron las Unidades de Respuesta Hidrológica (URH's); el clima se extrajo de 95 estaciones climáticas; los parámetros fisiológicos del cultivo fueron tomados de la literatura. El rendimiento simulado de semilla de *J. curcas* varió de 0.16 a 5.74 t ha<sup>-1</sup> y se cartografió agrupándolo en 5 intervalos. Se cuantificó la superficie correspondiente a cada intervalo, y su relación con el uso actual del suelo. Se identificaron 872 mil hectáreas con rendimiento de semilla superiores 3.63 t ha<sup>-1</sup> en pastizales. El rendimiento de semilla presentó la mayor sensibilidad a la profundidad del suelo, seguida por la temperatura media anual y la lluvia total anual.

**Palabras clave:** SWAT; Modelos de simulación; Zonificación; SIG.

**INTRODUCCIÓN**

A escala global desde los años 70's las fuerzas promotoras detrás del gran impulso que han tenido los biocombustibles son: a) la crisis energética ocasionada por el incremento en la demanda y el agotamiento de yacimientos de combustibles fósiles b) la necesidad de reducir las emisiones de gases de

**SUMMARY**

There is great interest to use from *Jatropha curcas* L. (*J. curcas*) as feedstock for biodiesel. In order to increase energy and economic efficiency, it is necessary to identify areas with optimal agroecological conditions for its cultivation and to determine its productivity in marginal areas to avoid competition with food production. The aim of this study was to determine the variation of the productive potential of *J. curcas* in response to different soil and climatic conditions of the state of Veracruz. The model used to simulate the seed yield of *J. curcas* was the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). The units of calculation were the Hydrologic Response Units (HRU); the weather was extracted from 95 weather stations; Crop physiological parameters were taken from the literature. The simulated seed yield of *J. curcas* ranged from 0.16 to 5.74 t ha<sup>-1</sup> and was mapped by grouping in 5 intervals. Surfaces were quantified for each interval and related to the current land use. There were identified 872 thousand hectares with seed yield higher than 3.63 t ha<sup>-1</sup> in grasslands. The seed yield showed the most sensitivity to soil depth, followed by the mean annual temperature and annual total rainfall.

**Key words:** SWAT; Simulation Models; Zoning; GIS.

efecto invernadero como medida de mitigación para el cambio climático y c) el desarrollo rural sustentable que aumente el ingreso de los agricultores, sobre todo en países en vías de desarrollo (IICA, 2007; FAO, 2008; SAGARPA, 2008). En posición opuesta existe el temor de que los cultivos usados como materia prima para biocombustibles desplacen a los cultivos alimenticios, ocasionando escases de alimentos y un consiguiente aumento en el precio de los mismos. Por

otro lado, la superficie de tierras marginales para producir BCL está limitada a 500 millones de hectáreas, con lo cual se podría cubrir hasta una cuarta parte de las necesidades de BCL (FAO, 2008), por lo tanto, para lograr un mayor abastecimiento sin un cambio en el uso actual del suelo, es necesario llevar a cabo acciones, como incrementar la productividad de materia prima por unidad de superficie, desarrollar de especies vegetales más eficientes para producir insumos bioenergéticos, desarrollar tecnologías de bajo costo, implementar de proyectos alternativos para aumentar la producción de alimentos e identificar y evaluar el potencial de producción de los insumos bioenergéticos de las diferentes áreas (SAGARPA, 2009).

En el 2009 según USA-DOE (2010) se produjeron cerca de 93 mil millones de litros de BCL (77.03 mil millones de litros de etanol+ 17.89 mil millones de litros de biodiesel), de los cuales EUA produjo el 55 % de etanol y 12 % de biodiesel, Brasil el 35 % de etanol y 10 % de biodiesel, la Unión Europea 5 % de etanol y 62 % de biodiesel y Asia conjuntamente con Oceanía el 4 % de etanol y 14 % de biodiesel; en el resto del mundo incluyendo México la producción fue insignificante. La misma fuente reporta que en el periodo 2005-2009 la producción mundial se incrementó un 147 % (127 % de etanol y 299 % de biodiesel) con una tasa de incremento anual de 11.3 mil millones de litros (8.62 mil millones de litros para etanol y 2.68 mil millones de litros para biodiesel), sin embargo México hasta el 2007 no tuvo producción significativa y del 2007 al 2009 solo aumento a una tasa anual de 1.99 millones de litros (0.06 millones de litros para etanol y 1.93 millones de litros para biodiesel).

La *J. curcas* es una planta originaria de México, Centroamérica, Bolivia Perú, Paraguay, Argentina y Brasil (Pompelli *et al.*, 2010; Trabucco *et al.*, 2010; Reubens *et al.*, 2011), con un rango altitudinal que va de los 0 a los 1800 msnm (Foidl *et al.*, 1996). Es un pequeño árbol o un arbusto grande (5-7 m), decíduo, que pertenece a la familia *Euphorbiaceae*, con tallo suculento y una esperanza de vida de 50 años (Achten *et al.*, 2010; Behera *et al.*, 2010; Trabucco *et al.*, 2010).

La planta presenta tolerancia a condiciones semiáridas (Ndong *et al.*, 2009; Behera *et al.*, 2010; Trabucco *et al.*, 2010), no muestra sensibilidad a la duración del día (Heller, 1996) y tolera altas temperaturas (Gour, 2006; Achten, 2008; Maes, 2009). Puede crecer en una amplia gama de suelos incluso con bajo contenido de nutrientes, aunque prefiere los que presentan buena aireación y drenaje, en suelos pesados la formación de raíces puede estar obstaculizada (Foidl *et al.*, 1996; Heller, 1996; Behera *et al.*, 2010), se desarrolla bien cuando estos

tienen con una profundidad mayor a los 45 cm (Gour, 2006), el pH no debe ser mayor de 9 (Biswas *et al.*, 2006; Tiwari, 2007), tampoco tolera altos niveles de sodio, en caso de ser suelos muy ácidos se requieren fertilizaciones de Ca y Mg (Behera *et al.*, 2010) y la pendiente debe ser menor a 30°. Es muy susceptible a inundaciones (Biswas *et al.*, 2006; Singh *et al.*, 2006). Como cultivo, presenta fácil establecimiento y rápido crecimiento (Behera *et al.*, 2010), poca incidencia de problemas fitosanitarios (Henning, 2006; Achten *et al.*, 2008; Kehira y Atta 2009).

Actualmente a nivel mundial existe un gran interés en utilizar *J. curcas* como materia prima para biodiesel (Sunil *et al.*, 2008; Trabucco *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2010), particularmente en México se observa una creciente promoción y apoyo (SAGARPA, 2008; CONAFOR, 2009; INIFAP, 2009.). Dicho interés radica en algunas de las características antes mencionadas, que ubican a la *J. curcas* como un cultivo capaz de crecer en terrenos marginales y no competir con la producción de alimentos (Wu *et al.*, 2010) y de bajo impacto ecológico (Behera *et al.*, 2010; Pompelli *et al.*, 2010; Reubens *et al.*, 2011).. Aunado a esto sus semillas, estas poseen alto contenido de aceite (Makkar y Becker 1997), con facilidad para convertirse en biodiesel que cumple con las normas de calidad de E.U.A. y U.E. (Azam *et al.*, 2005; Tiwari *et al.*, 2007; Behera *et al.*, 2010).

Sin embargo, otros autores consideran que muchas de las características antes mencionadas no están respaldadas científicamente (Openshaw, 2000; Fairless, 2007; Achten *et al.*, 2008; Reubens *et al.*, 2011), pues *J. curcas* es una planta semidomesticada y poco estudiada de la que presenta una amplia variación en distintos ambientes (Francis *et al.*, 2005; Jongschaap *et al.*, 2007; Maes *et al.*, 2009), lo que aunado a la practicas de manejo poco documentadas (Achten *et al.*, 2010; Behera *et al.*, 2010; Trabucco *et al.*, 2010), a la falta de variedades (Wu *et al.*, 2010) y a la presencia de problemas fitosanitarios en plantaciones comerciales (Sharma, 2007) generan incertidumbre en el rendimiento de semilla de este cultivo en distintas condiciones (Achten *et al.*, 2008; Trabucco *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2010), en especial en áreas marginales (Behera *et al.*, 2010; Trabucco, 2010; Wu, 2010).

Utilizando modelos de simulación es posible obtener información sobre la producción de biomasa y rendimiento de semilla de *J. curcas* (Gunaseelan, 2009; Sharma *et al.*, 2009), que permitan elaborar predicciones sensatas y coadyuven a la identificación de áreas adecuadas para el establecimiento de plantaciones comerciales.

El SWAT es un modelo matemático de simulación dinámica (Neitsch *et al.*, 2005; Ng *et al.*, 2010), que

trabaja a nivel de cuenca (Narasimhan *et al.*, 2005; Neitsch *et al.*, 2005; Garg *et al.*, 2011), y que gracias a un interfaz con SIG (ArcSWAT) es espacialmente explícito. Es capaz de simular procesos ecológicos, hidrológicos, químicos y ambientales (Guzmán *et al.*, 2004; Luo *et al.*, 2008), usando información disponible de clima, suelo, uso de suelo y topografía (Narasimhan *et al.*, 2005). El desarrollo de cultivos es simulado por el modelo utilizando una simplificación del modelo EPIC (Narasimhan *et al.*, 2005; Neitsch *et al.*, 2005; Akhavan *et al.*, 2010). Dentro del EPIC el desarrollo fenológico está basado en la acumulación diaria de unidades calor; la biomasa generada está basada en la radiación interceptada por el área foliar y la eficiencia del cultivo para transformar esa radiación en biomasa; el rendimiento lo calcula multiplicando la biomasa generada por el índice de cosecha. (Narasimhan *et al.*, 2005; Neitsch *et al.*, 2005; Akhavan *et al.*, 2010). El modelo considera tres factores de estrés: a) temperatura, b) nutrientes (nitrógeno y fosforo) y c) agua, la presencia de estos reducen el rendimiento potencial (Luo *et al.*, 2008; Garg *et al.*, 2011). Por su característica de ser espacialmente explícito y su capacidad de calcular el rendimiento de cultivos, es posible realizar zonificaciones con clasificaciones cuantitativas en intervalos de toneladas de biomasa seca producida por hectárea (Faramarzi *et al.*, 2010; Srinivasan *et al.*, 2010; Lakshmanan *et al.*, 2011).

En el presente trabajo se simuló el rendimiento de semilla de *J. curcas* en el estado de Veracruz, con la finalidad de conocer la variación del su potencial productivo como respuesta a las diferentes condiciones edafoclimáticas presentes.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del área de estudio

El área de estudio comprendió la superficie del estado de Veracruz de 7.18 millones de hectáreas. El estado de Veracruz se localiza entre los 17° 00' y 22° 20' LN y entre los 93° 35' y 98° 34' LO, a lo largo del golfo en la zona tropical del sureste de México (Figura 1).

La Figura 2, muestra mapas con la distribución geográfica de los climas, suelos, topografía y uso del suelo, respectivamente, del estado de Veracruz. Información obtenida de los mapas temáticos digitales escala 1:250,000 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

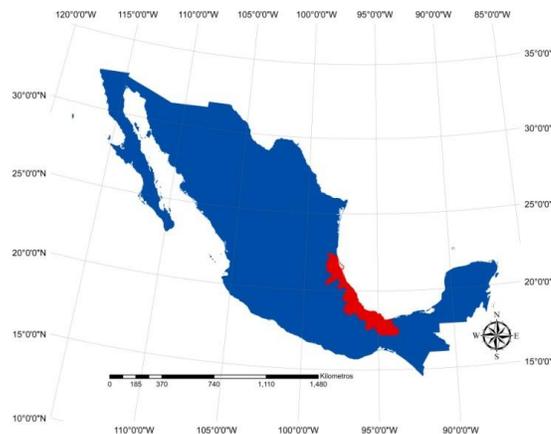


Figura 1. Localización del estado de Veracruz

### Proceso de simulación general

El proceso de simulación puede ser dividido en dos etapas, en la primera se crean las unidades de simulación mediante operaciones cartográficas, y en la segunda se asignan parámetros a dichas unidades a partir de la base de datos interna del modelo.

El SWAT trabaja a nivel de cuenca y es espacialmente explícito, por lo que requiere información cartográfica para identificar áreas con características similares y sobre ellas llevar a cabo la simulación. Para lograr esto, se divide la cuenca a simular en subcuencas, utilizando información topográfica proveniente de un modelo de elevación digital (DEM) y un mapa de escurrimientos superficial, permitiéndole al usuario definir la precisión de tal definición. Posteriormente generan las URH's, las cuales son áreas que pertenecen a la misma subcuenca y presentan el mismo intervalo de pendiente, tipo de suelo y uso actual del suelo. El mapa de pendientes es generado por el SWAT a partir del DEM de acuerdo a los intervalos establecidos por el usuario, mientras que los mapas edafológico y de uso actual del suelo deben ser ingresados.

Una vez definidas las unidades de simulación el modelo procede a asignarles parámetros que permitan llevar a cabo la simulación. Primero se integra la información climática indicándole al modelo cuales estaciones meteorológicas debe considerar de una base de datos previamente cargada. El modelo considera para cada subcuenca la información climática de la estación más cercana a su centroide.

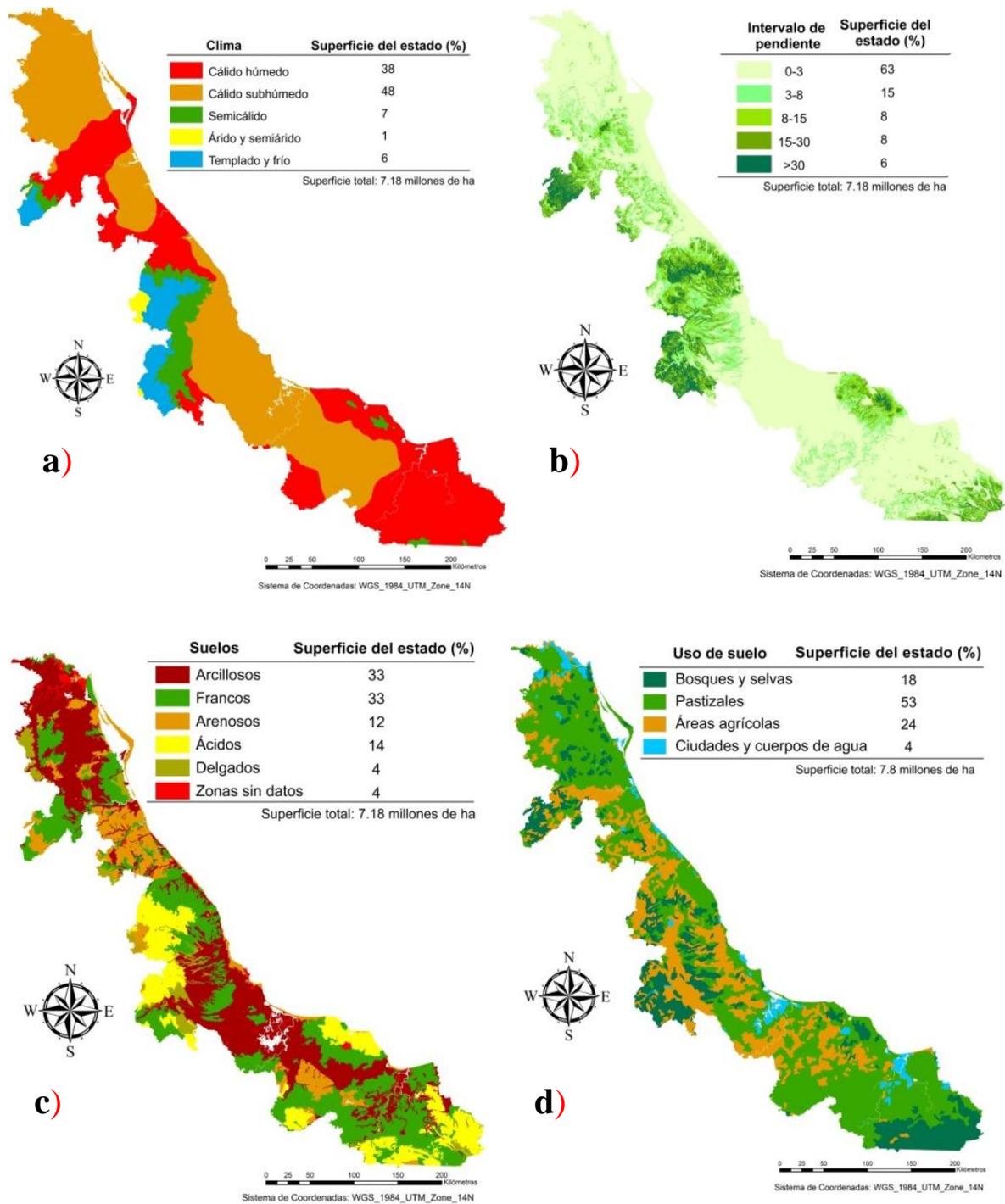


Figura 2. Distribución geográfica de tipos de clima (a), intervalos de pendiente (b), tipos de suelo (c) y uso actual del suelo (d) en el estado de Veracruz.

Fuente: Modificado de INEGI.

El SWAT requiere información diaria de temperatura, precipitación pluvial, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento, sin embargo también

cuenta con un generador climático que permite simular los datos diarios a partir de estadísticas climáticas mensuales. Después el modelo asigna

parámetros edafológicos e hidrológicos y posteriormente se selecciona el cultivo a simular, para esto el SWAT incluye en su base de datos, los parámetros fisiológicos necesarios para la simulación de 110 especies vegetales, además de permitir utilizar especies no contenidas en su base de datos, si se conocen estos parámetros. De igual manera permite ingresar algunas prácticas de manejo como: a) plantación; b) cosecha; c) fertilización d) riego; e) labranza; f) aplicación de plaguicidas; g) pastoreo, con algunas variantes de las mismas. Estas prácticas se pueden calendarizar tanto por fecha como por etapa fenológica, a través de unidades calor. Finalmente se define un periodo de simulación y se ajusta el formato de las salidas. En el caso del rendimiento de árboles el resultado que expresa el modelo es un promedio en toneladas por hectárea por año de los rendimientos anuales del periodo simulado.

### Creación de archivos necesarios

Los mapas utilizados fueron los siguientes: a) DEM de elaborado a partir de las curvas de nivel de INEGI, con un tamaño de pixel de 90 m<sup>2</sup>; b) mapa de ríos de INEGI escala 1:250,000; c) máscara formato raster, que abarca una superficie mayor a la del estado; d) mapa edafológico de INEGI escala 1:250,000, al cual se le realizaron modificaciones para separar las subclases de suelo presentaban fase lítica; e) mapa de uso hipotético de suelo que considera *J. curcas* para todo el estado. A todos los mapas utilizados se les aplicó una proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) zona 14.

La información necesaria de suelo se elaboró creando un perfil típico para cada una de las 58 clases de suelo

(46 subclase FAO + 13 nuevas creadas por presentar fase lítica), de acuerdo a la descripción de la subclase y a los datos analíticos de 829 perfiles de suelo, presentados por INEGI en cartas edafológicas para 7 estados del Sur Sureste de México (Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintana Roo, Chiapas y Oaxaca). Los parámetros de suelo necesarios por el SWAT se extrajeron de los datos analíticos de los 829 perfiles de INEGI, sin embargo debido a que no toda información requerida se encontraba en las cartas edafológicas, por lo que fue necesario estimarlos de diversas formas y a partir de diferentes fuentes como se describe en el Tabla 1.

La información climática se trabajó a partir de los datos diarios de 137 estaciones climatológicas distribuidas en todo el estado, estas estaciones contaban con datos de precipitación pluvial, temperatura máxima y mínima de al menos 20 años durante el periodo 1960-2000. Con esta información y usando el generador climático del modelo Environment Policy Integrated Climate (EPIC) desarrollado por Sharply y Williams (1990), se generaron las estadísticas climáticas mensuales que requiere el SWAT para cada estación. Posteriormente se generaron los datos diarios faltantes para el periodo 1960-2010 de temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación pluvial. Finalmente solo fueron usadas 95 estaciones, debido a que las restantes no eran las más cercanas de ningún centroide de subcuenca.

Tabla 1.- Metodología y fuentes usadas para calcular los datos de suelo faltantes.

Parámetro	Método usado para su obtención
Profundidad	Reportado en cartas edafológicas <sup>1</sup>
Textura	Reportado en cartas edafológicas <sup>1</sup>
Materia orgánica	Reportado en cartas edafológicas <sup>1</sup>
Conductividad eléctrica	Reportado en cartas edafológicas <sup>1</sup>
Conductividad hidráulica saturada	A partir de textura del suelo <sup>2</sup>
Densidad aparente	A partir de textura del suelo <sup>2</sup>
Capacidad de agua disponible	A partir de textura del suelo <sup>2</sup>
Carbono orgánico	Carbono orgánico=0.95*(Materia orgánica) <sup>3</sup>
USLE_K	$K_{usle} = \frac{0.00021 * M^{1.14} * (12 - MO) + 3.25 * (C_{soilstr} - 2) + 2.5(C_{perm} - 3)}{100}$
Albedo	Estimado a partir de materia orgánica <sup>4</sup>

Fuentes: 1. INEGI, 2. Saxton *et al.* (1986), 3. Neitsch *et al.* (2005), 4. Ecuación de Harris (software Curve Expert 2.0.)

Tabla 2.- Parámetros fisiológicos de *J. curcas* utilizados por SWAT.

Parámetro fisiológico	Unidad	Valor
Eficiencia en el uso de la radiación (RUE) <sup>1,3</sup>	Kg ha <sup>-1</sup> (MJm <sup>-2</sup> ) <sup>-1</sup>	15
Índice de cosecha para óptimas condiciones de crecimiento (HI) <sup>1,5</sup>	Kg ha <sup>-1</sup> (Kg ha <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup>	0.2
índice máximo de área foliar potencial (BLAI) <sup>1,4</sup>	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>	5
Fracción del crecimiento correspondiente al primer punto de la curva de desarrollo óptimo de área foliar (FRGRW1) <sup>1</sup>	Fracción	0.05
Fracción del área foliar máxima correspondiente al primer punto de la curva de desarrollo óptimo de área foliar (LAIMX1) <sup>1</sup>	Fracción	0.05
Altura máxima del dosel <sup>1,6</sup>	m	5
Profundidad máxima de las raíces <sup>1,7</sup>	m	2.5
Fracción del total unidades calor correspondientes al primer punto de la curva de desarrollo óptimo de área foliar (FRGW2) <sup>1</sup>	Fracción	0.4
Fracción del área foliar máxima correspondiente al primer punto de la curva de desarrollo óptimo de área foliar (LAIMX2) <sup>1</sup>	Fracción	
Fracción del crecimiento donde el área foliar comienza a declinar (DLAI) <sup>1</sup>	(unidades calor)(unidades calor) <sup>-1</sup>	0.3
Temperatura optima (To) <sup>1</sup>	°C	30
Temperatura base (Tb) <sup>1</sup>	°C	10
Fracción de nitrógeno en la cosecha (CNYLD) <sup>2</sup>	Kg N(Kg rendimiento) <sup>-1</sup>	0.035
Fracción de fosforo en la cosecha (CPYLD) <sup>2</sup>	Kg P(Kg rendimiento) <sup>-1</sup>	0.0139
Fracción de nitrógeno en la emergencia(BN1) <sup>1</sup>	Kg N(Kg rendimiento) <sup>-1</sup>	0.0035
Fracción de nitrógeno a la mitad del ciclo (BN2) <sup>1</sup>	Kg N(Kg rendimiento) <sup>-1</sup>	0.002
Fracción de nitrógeno en la madurez (BN3) <sup>1</sup>	Kg N(Kg rendimiento) <sup>-1</sup>	0.001
Fracción de fosforo en la emergencia (BP1) <sup>1</sup>	Kg P(Kg rendimiento) <sup>-1</sup>	0.0007
Fracción de fosforo a la mitad del ciclo (BP2) <sup>1</sup>	Kg P(Kg rendimiento) <sup>-1</sup>	0.0004
Fracción de fosforo a la madurez (BP3) <sup>1</sup>	Kg P(Kg rendimiento) <sup>-1</sup>	0.0003
Limite menor de índice de cosecha (WSYF) <sup>1</sup>	Kg ha <sup>-1</sup> (Kg ha <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup>	0.02
Valor mínimo para el factor de erosión hídrica de la cobertura del suelo (USLE_C) <sup>1</sup>	A dimensional	0.001
Conductancia estomática máxima a alta radiación solar y bajo déficit de presión de vapor (GSI) <sup>1</sup>	m s <sup>-1</sup>	0.003
Déficit de presión de vapor correspondiente al segundo punto de la curva de conductancia estomática (VPDFR) <sup>2</sup>	kPa	4
Fracción de la máxima conductancia estomática correspondiente al segundo punto de la curva de conductancia estomática (FRGMAX) <sup>2</sup>	Fracción	0.75
Tasa de disminución en la eficiencia del RUE por unidad incrementada en el déficit de presión de vapor (WAVP) <sup>1</sup>	Porcentaje	8
Concentración elevada de CO <sub>2</sub> atmosférico correspondiente al segundo punto en la curva de eficiencia en el uso de la radiación (CO <sub>2</sub> HI) <sup>1</sup>	uL L <sup>-1</sup>	660
Eficiencia en el uso de la radiación correspondiente al segundo punto en la curva de eficiencia en el uso de la radiación (BIOEHI) <sup>1</sup>	Proporción	30
Coefficiente de descomposición de los residuos del cultivo (RSDCO) <sup>1</sup>	Fracción	0.05
índice de área foliar mínimo para la planta durante el periodo de dormancia(ALAI_MIN) <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>	0.75
Fracción de la biomasa de acumulada del árbol que se trasforma en residuo durante la dormancia (BIO_LEAF) <sup>2</sup>	Fracción	0.5
Número de años requeridos para que la especie alcance su máxima madurez (MAT_YRS) <sup>1</sup>	Años	4
Máxima biomasa para un bosque (BMX_TREES) <sup>2</sup>	t ha <sup>-1</sup>	1000
Coefficiente de extinción de la luz (EXT_COEF) <sup>2</sup>	A dimensional	0.65
Fracción de mortandad de la biomasa (BM_DIEOFF) <sup>2</sup>	A dimensional	0.1

Fuentes: 1.- IITD (2010); 2.- SWAT “forest deciduous”; 3.- Rusmayandi *et al.* (2008); 4.- Behera *et al.* (2009); 5.- Achten *et al.* (2010) y Jongschaap (2007); 6.- Franken y Nielsen (2010); 7.- Reubens *et al.* (2011).

Los parámetros fisiológicos de *J. curcas* utilizados en la simulación fueron tomados de un trabajo realizado por el Instituto Indio de Tecnología Delhi (IITD) (2009), en el cual simularon el desarrollo de *J. curcas* usando el SWAT. Esta información fue complementada con otras fuentes, como se muestra en el Tabla 2.

El manejo se realizó tomando como base lo reportado por Franken y Nielsen (2010), considerando únicamente las labores de labranza y la dosis de fertilización para los requerimientos de nitrógeno y fósforo, debido a que las demás actividades del manejo agronómico de *J. curcas* propuesto por estos autores, no tienen impacto en el rendimiento simulado por SWAT (Neitsch *et al.*, 2005). Las labores de manejo simuladas consistieron en un chapeo el primero de mayo, un subsoleo el 15 de mayo, un rastreo el 28 de mayo y la siembra el primero de junio; mientras que la fertilización se simuló en cada año al inicio de la temporada de lluvias (15 de junio), variando la dosis de fertilizante: el primer año 23 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno y 7 kg ha<sup>-1</sup> de fósforo, el segundo 34 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno y 11 kg ha<sup>-1</sup> de fósforo, el tercero 69 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno y 21 kg ha<sup>-1</sup> de fósforo y a partir del cuarto año 103 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno y 32 kg ha<sup>-1</sup> de fósforo.

### Simulación y cartografía de rendimiento

Con la información generada, previamente descrita, se procedió a realizar la simulación del rendimiento de semilla de *J. curcas* en el estado de Veracruz, para el periodo 2000-2010. El rendimiento asignado a la URH correspondiente y el resultado cartografiado. Debido a que se utilizó una máscara mayor al tamaño del estado, que asegurara que toda superficie de Veracruz fuera incluida en la simulación, fue necesario recortar el mapa resultante a los límites estatales. Además, se discriminaron todas las zonas que presentaban una altura sobre el nivel del mar mayor a los 1800 m, por exceder el límite que tolera el cultivo (Foidl *et al.*, 1996). Finalmente, se clasificaron las URH's de acuerdo al rendimiento que presentaron en la simulación, agrupándolas en cinco intervalos de rendimiento (excelentes, buenos, regulares, malos y marginales) definidos de acuerdo a la metodología desarrollada por Jenks (1967).

### Intersección con mapa de uso actual del suelo

Al existir una preocupación acerca de un posible desplazamiento de los cultivos alimenticios o una

deforestación con intención de destinar esas tierras a cultivos bioenergéticos se realizó una sobreposición del mapa de rendimiento simulado de semilla de *J. curcas* clasificado en intervalos, con el mapa de uso actual del suelo, unificando en cuatro categorías: a) Áreas agrícolas; b) Selvas y bosques; c) Pastizales; d) Ciudades y cuerpos de agua. Se calculó la superficie que ocupaba cada una de las interacciones y que porcentaje de la superficie total del estado representaba.

### Análisis de la relación entre el rendimiento y factores edafoclimáticos

Con la intención de identificar el impacto de las distintas condiciones edafoclimáticas, existentes en el área de estudio, sobre el rendimiento simulado de semilla de *J. curcas*, se realizó un análisis estadístico utilizando el programa Statistica®. Este análisis consistió en una prueba de correlación entre tres factores edáficos y tres elementos del clima con el rendimiento simulado de semilla de *J. curcas* agrupado en los cinco intervalos anteriormente mencionados

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los rendimientos simulados de semilla de *J. curcas* variaron de 0.16 a 5.73 t ha<sup>-1</sup> los excelentes fueron mayores a 4.57 t ha<sup>-1</sup>, los buenos entre 3.63 y 4.56 t ha<sup>-1</sup>, los regulares entre 2.94 y 3.62 t ha<sup>-1</sup>, los malos entre 1.85 y 2.93 t ha<sup>-1</sup> y los marginales menores a 1.84 t ha<sup>-1</sup>; como se muestra en la Figura 3. En este mapa se puede apreciar que la categoría de rendimientos regulares está distribuida prácticamente en todo el estado y es la predominante ocupando el 41 % de la superficie; los rendimientos buenos también presentan una distribución uniforme en la entidad, pero su superficie se reduce a cerca de la mitad de los rendimientos regulares (21 %); los rendimientos malos se localizan en la zona centro y sur de Veracruz ocupando una superficie similar a la de los rendimientos buenos (18 %); finalmente los rendimientos extremos (marginales y excelentes) ocupan cada uno el 5 % de la superficie del estado, los primeros presentándose en la zona norte y centro, mientras que los segundos prácticamente se concentran en la zona centro, salvo una pequeña franja localizada en la zona norte. El área descartada representa un 10 % y se localiza principalmente en el centro del estado.

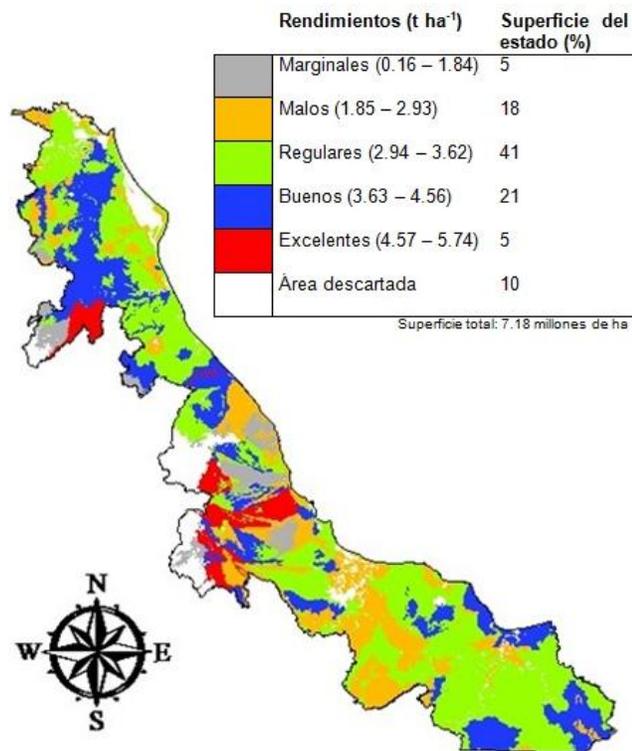


Figura 3.- Rendimiento de semilla de *J. curcas* simulada por SWAT en el estado de Veracruz, México.

Trabucco *et al.* (2010) realizaron un trabajo con la finalidad de mapear el rendimiento mundial simulado de *J. curcas* como respuesta al clima presente y futuro, obteniendo rendimiento que variaron entre 0 y 5 t ha<sup>-1</sup>, mientras que en el presente trabajo fue de 0.16 a 5.7 t ha<sup>-1</sup>. Según estos autores *J. curcas* presentó la mejor aptitud en temperaturas medias de entre 18 y 29 °C, con un óptimo entre 26 y 27 °C, lo cual es similar a lo encontrado en este estudio, donde el mejor rendimiento fue obtenido en las URH's con temperatura entre 18 y 26 °C. Con respecto a la precipitación pluvial anual *J. curcas* presento más aptitud en zonas que excedieron los 900 mm con un óptimo de 1500 mm, semejante a lo encontrado en esta investigación, donde los más altos rendimientos fueron simulados bajo condiciones de precipitación pluvial entre los 900 y los 2000 mm. Por último, relacionaron los rendimientos con la clasificación climática de Köppen modificada por E. García para la República Mexicana, señalando que en las categorías Am, Aw y Cf, se ubican los más altos rendimientos de semilla de *J. curcas*; estos tipos de climas

conforman el 86 % de la superficie total del estado de Veracruz.

Por otro lado Núñez-Colín y Goytia-Jiménez (2009), realizaron un trabajo similar con la intención de conocer la distribución y el potencial agroclimático actual y futuro de *J. curcas* en México. En la Figura 4 se comparan sus resultados con los simulados por SWAT en el presente trabajo.

Los responsables del Laboratorio de Agromapas Digitales del INIFAP elaboraron, mediante sobreposición de mapas el Potencial Productivo de *J. curcas* en México. En el que delimitan pocas áreas con potencial medio y alto para producir semilla de *J. curcas* localizadas en la zona centro y centro-norte del estado. Estas áreas coinciden con las identificadas en la simulación realizada por SWAT pero difieren en la magnitud y precisión, en virtud del mayor número de variables usadas.

### Relación con el UAS

En el Tabla 3 se muestra las superficies en hectáreas, resultado de la sobreposición de los mapas de rendimiento y UAS, así como el porcentaje correspondiente a la superficie total, donde se puede apreciar que los rendimientos excelentes solo constituyen el 5 % de la superficie total del estado y de esta solo el 1 % se localiza sobre pastizales, la cual sería el área idónea para establecer plantaciones y evitar tanto la competencia con cultivos alimenticios y áreas forestadas.

### Relación del rendimiento con factores del suelo y elementos del clima

El rendimiento de semilla de *J. curcas*, presentó una relación lineal directamente proporcional con la categoría de profundidad del suelo, con un coeficiente de correlación (r) de 0.40, donde los rendimientos aumentan a medida que la profundidad del suelo se incrementa, como se muestra en la Figura 5. La relación entre rendimiento de semilla de *J. curcas* y la profundidad del suelo, concuerda con lo reportado por Gour (2006), quien recomienda suelos con una profundidad mayor a los 45 cm para el establecimiento de plantaciones comerciales de *J. curcas*.

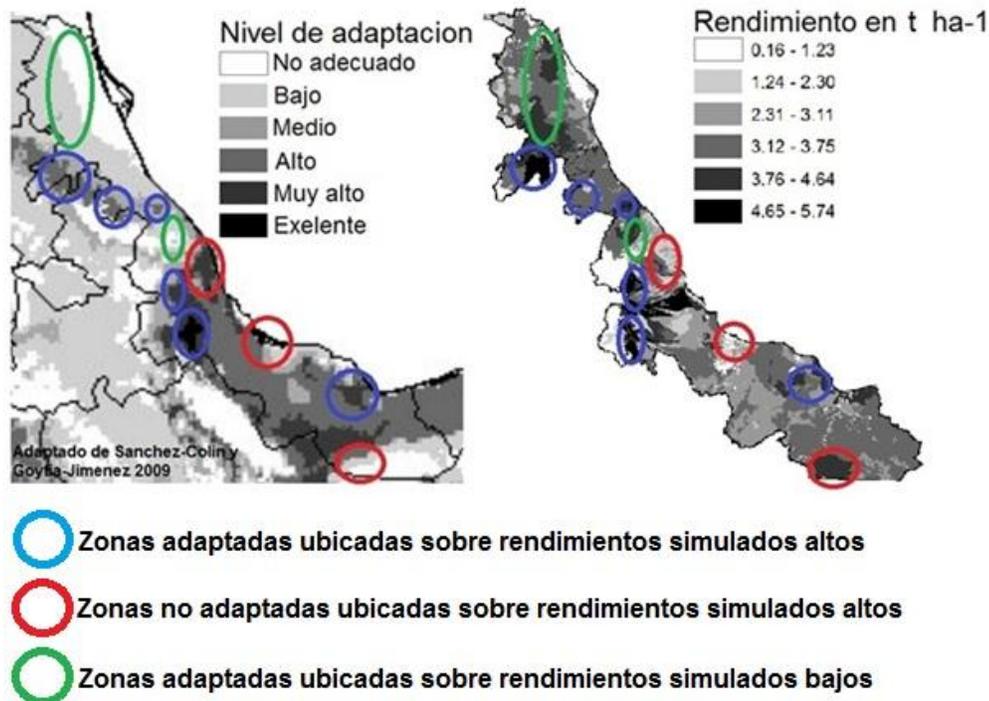


Figura 4.- Comparación entre nivel de adaptación climática (Sánchez-Colín y Goytia-Jiménez 2009) y rendimiento simulado de semilla de *J. curcas* en Veracruz.

Tabla 3.-Superficie en miles de ha de los intervalos de rendimiento simulado de *J. curcas* en sobreposición con los distintos usos actuales de suelo.

Rendimientos	TOTAL	Áreas agrícolas	Selvas y bosques	Pastizales	Ciudades y cuerpos de agua
Marginales	376(5 %)	128(2 %)	118(2 %)	127(2 %)	3(0 %)
Malos	1,274(18 %)	317(4 %)	147(2 %)	732(10 %)	78(1 %)
Regulares	2,919(41 %)	597(8 %)	374(5 %)	1,874(26 %)	74(1 %)
Buenos	1,545(21 %)	372(5 %)	357(5 %)	784(11 %)	32(0 %)
Excelentes	374(5 %)	171(2 %)	111(2 %)	88(1 %)	4(0 %)
Subtotal	6,487(90 %)	1,584(22 %)	1,107(15 %)	3,604(50 %)	191(3 %)
Área descartada	700 (10 %)				

Considerando los valores extremos del rendimiento simulado de semilla de *J. curcas* clasificado por textura, observamos que no existe ningún patrón, por lo que consideramos que el tipo de textura del suelo no mostro ninguna relación con el rendimiento simulado de semilla de *J. curcas*, esto se muestra con mayor claridad en la Figura 5. Lo anterior contradice a la literatura, que reporta que la *J. curcas* se desarrolla mejor sobre texturas gravosas o arenosas (Foidl *et al.*, 1996; Heller, 1996; Behera *et al.*, 2010), sin embargo, estas recomendaciones obedecen más a la preocupación de una posible inundación ocasionada por mal drenaje (Biswas *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2010), por lo tanto, al no ser la textura el

único factor responsable de una inundación, es posible que la *J. curcas* no presente limitantes en suelos con textura fina, si estos tienen cierta pendiente.

Se encontraron prácticamente todos los tipos de rendimiento simulado de semilla de *J. curcas* en las dos clases de MO, por lo que consideramos que no existe una correlación entre la entre estos dos factores, tal y como se observa en la Figura 5. El hecho de que la simulación reporte rendimientos similares de *J. curcas* en suelos con baja o alta materia orgánica, puede estar ocasionada por dos factores: a) la acción de otros factores edáficos y climáticos (como el hecho

de que en la caracterización realizada en este trabajo los suelos con alta MO están relacionados con suelos delgados); b) que la *J. curcas* tenga una baja necesidad de nutrimentos (Heller, 1996; Fairless, 2007; Ndong *et al.*, 2010).

La temperatura considerada por las URH's mostró una correlación positiva con el rendimiento simulado de *J. curcas* de  $r=0.38$ , donde los tanto las temperaturas bajas como las altas ocasionaron que el rendimiento decreciera como se aprecia en la Figura 6. El que la temperatura media resultara la de mayor productividad coincide con lo reportado por Achten *et al.* (2008), quienes afirmaron que esta planta es originaria de lugares que presentan una temperatura media entre 20 y 28 °C, de la misma forma en un estudio realizado por Maes *et al.* (2009), reportaron que la temperatura promedio de las colectas realizadas fue de 19.3 °C y 27.2. °C. El hecho de que las temperaturas bajas limitaran más el rendimiento que las altas, también concuerda con lo publicado por Heller (1996), Gour (2006) y Trabucco *et al.* (2010).

La cantidad de precipitación pluvial que consideraron las URH's, mostro una correlación positiva ( $r=0.27$ ) con el rendimiento simulado de semilla de *J. curcas*, donde los mejores rendimientos se encontraron en las categorías intermedias de precipitación pluvial como se muestra en la Figura 6. Con base en estos resultados podemos decir que la *J. curcas* requiere un precipitación pluvial anual superior a la considerada deficiente (> de 900 mm), lo cual es similar a lo reportado por Maes *et al.* (2009) quienes ubicaron el límite inferior en 1200 mm. En contraste con esto Trabucco *et al.* (2010) y Pompelli *et al.* (2010), consideraron que *J. curcas* requiere una cantidad mucho menor de lluvia (250 mm). En cuanto al límite superior, este estudio considero que precipitaciones pluviales superiores a los 3000 mm son limitantes en el rendimiento, en concordancia con Trabucco *et al.* (2010) y Pompelli *et al.* (2010), pero superando los 2000 mm reportados por Maes *et al.* (2009). A diferencia de precipitación pluvial, la radiación solar presento una correlación muy baja con el rendimiento simulado de semilla de *J. curcas*, como se aprecia en la Figura 6.

Los rendimientos marginales, malos y regulares se presentaron prácticamente en todas las clases de clima y suelo, sin embargo los rendimientos

excelentes solo ocurrieron en: a) suelos con una profundidad mayor a 30 cm (someros, profundos y muy profundos); b) temperatura entre 18-26 °C (media); c) lluvia anual entre 1000-3000 mm (media y buena); d) radiación anual superior a 6050 MJ m<sup>-2</sup> (media y alta). Esto se muestra con mayor claridad en los Tablas 29 y 30.

Lo anterior se puede interpretar con una visión sistémica considerando la complejidad de interacciones (Herrscher, 2003) que ocurren incluso en de un modelo de simulación (SWAT), ocasionando que bajo la ausencia de condiciones idóneas para un factor edafológico o climático, el rendimiento se vea disminuido, pese a la presencia de condiciones adecuadas para el resto de los factores.

## CONCLUSIONES

El rendimiento simulado de *J. curcas* por SWAT en el estado de Veracruz varió de 0.16 a 5.74 t ha<sup>-1</sup> en función de las características edafoclimáticas presentes. Dicho rendimiento fue cartografiado agrupando las URH's, en 5 intervalos y cuantificando la superficie correspondiente a cada intervalo, así como su interacción con el uso actual del suelo.

Fueron identificadas 1,919 mil hectáreas con rendimientos buenos o excelentes (superiores a 3.63 t ha<sup>-1</sup>), de las cuales 872 mil están localizadas sobre pastizales, convirtiendo estas áreas en la mejor opción para establecer plantaciones, por su alta productividad para producir semilla de *J. curcas* y por estar actualmente subutilizadas.

Las distintas características edafoclimáticas tuvieron diferente impacto sobre el rendimiento simulado de *J. curcas*. La profundidad del suelo fue el factor de mayor incidencia sobre el rendimiento simulado de *J. curcas*, seguido por la temperatura y por la precipitación pluvial.

El modelo SWAT simuló el rendimiento de semilla de *J. curcas* con razonable precisión, por lo que se considera que la información generada puede ser utilizada de forma confiable por los tomadores de decisiones para establecer plantaciones de *J. curcas* para ser utilizada como materia prima para biodiesel.

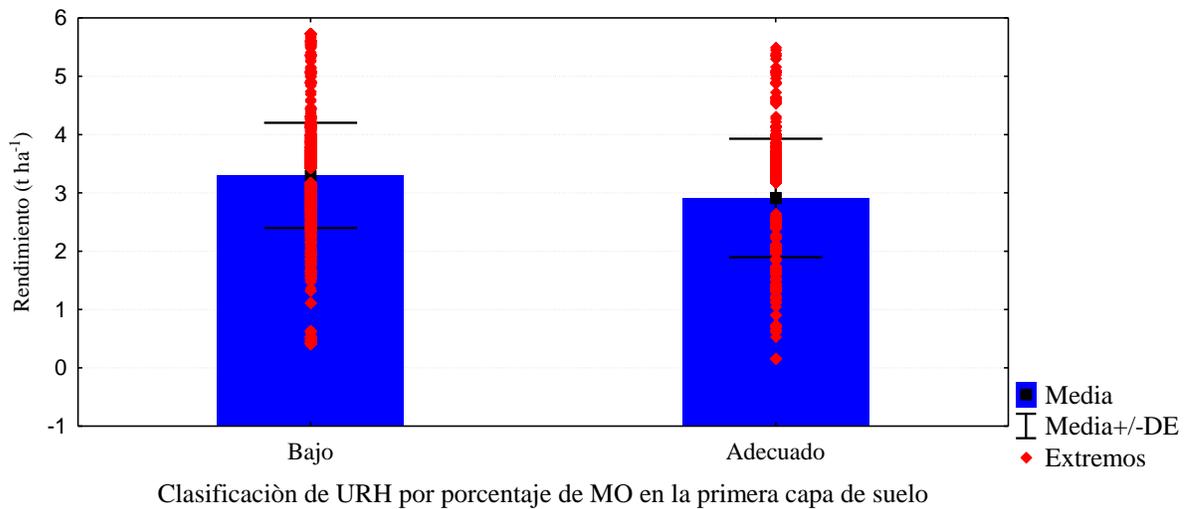
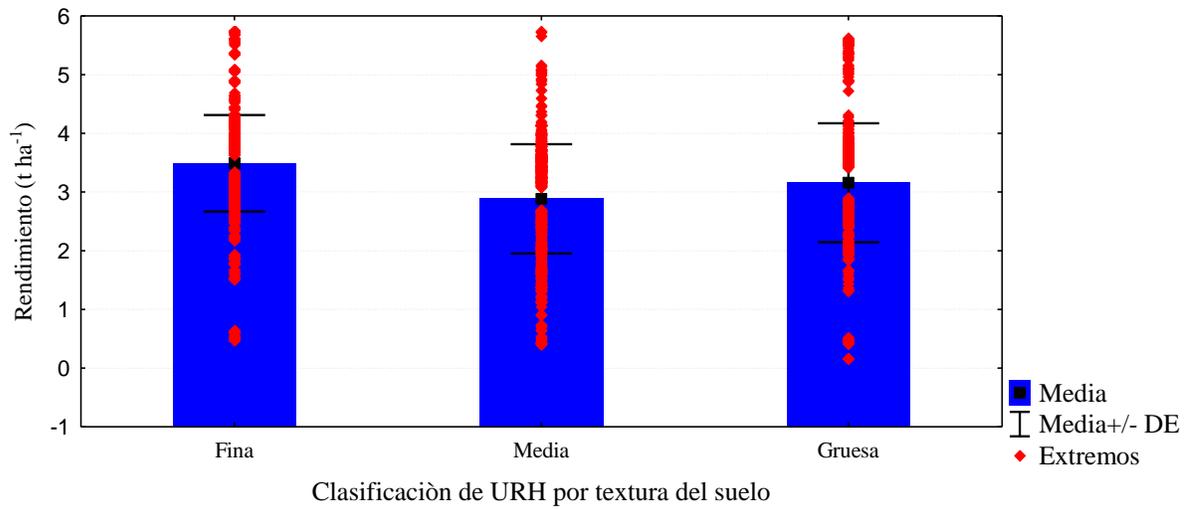
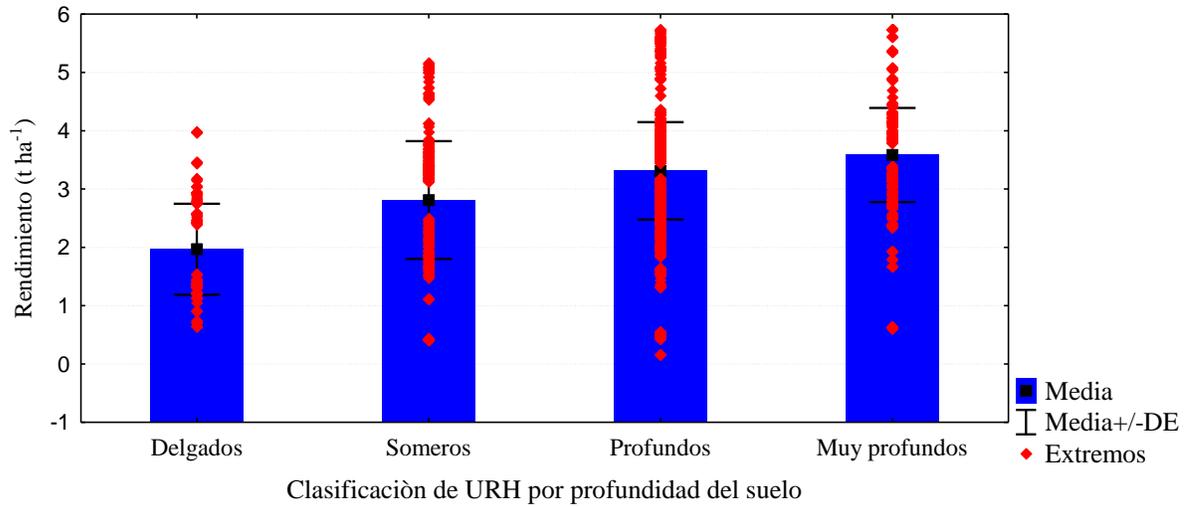


Figura 5.- Relación entre factores edáficos y el rendimiento simulado de semilla de *J. curcas* en Veracruz, México para el periodo 2000-2010.

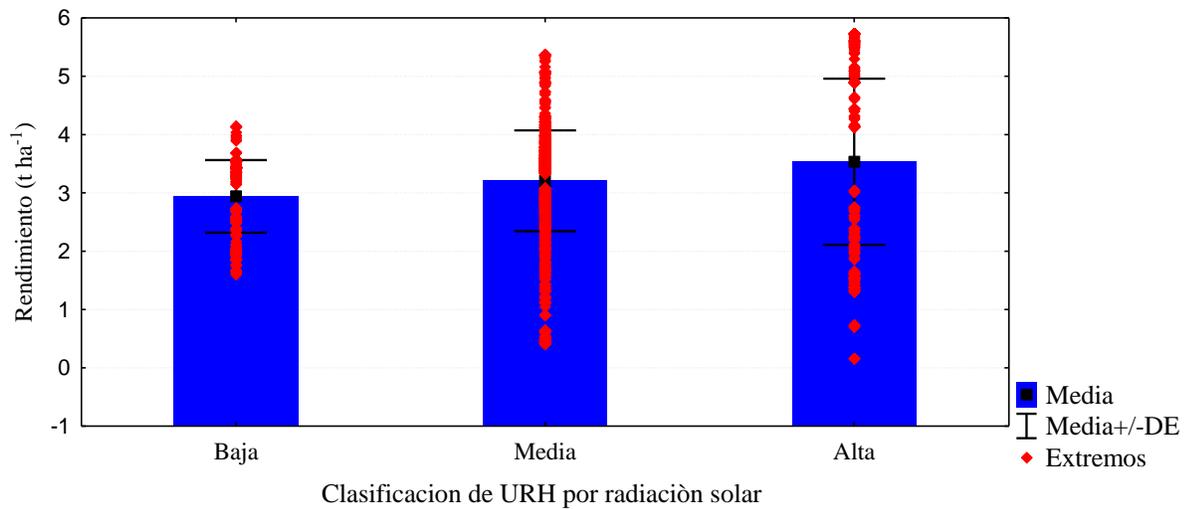
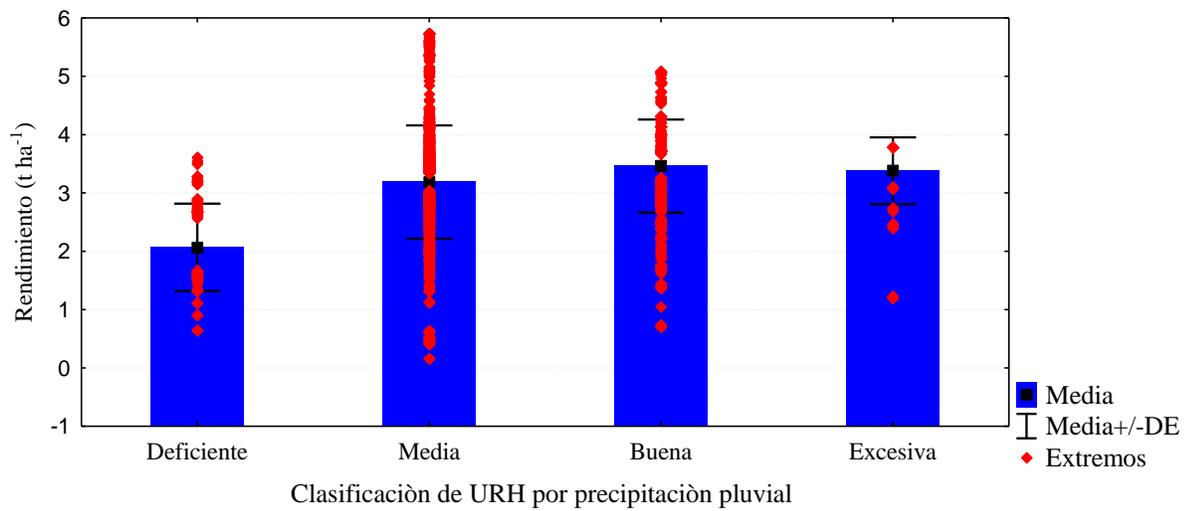
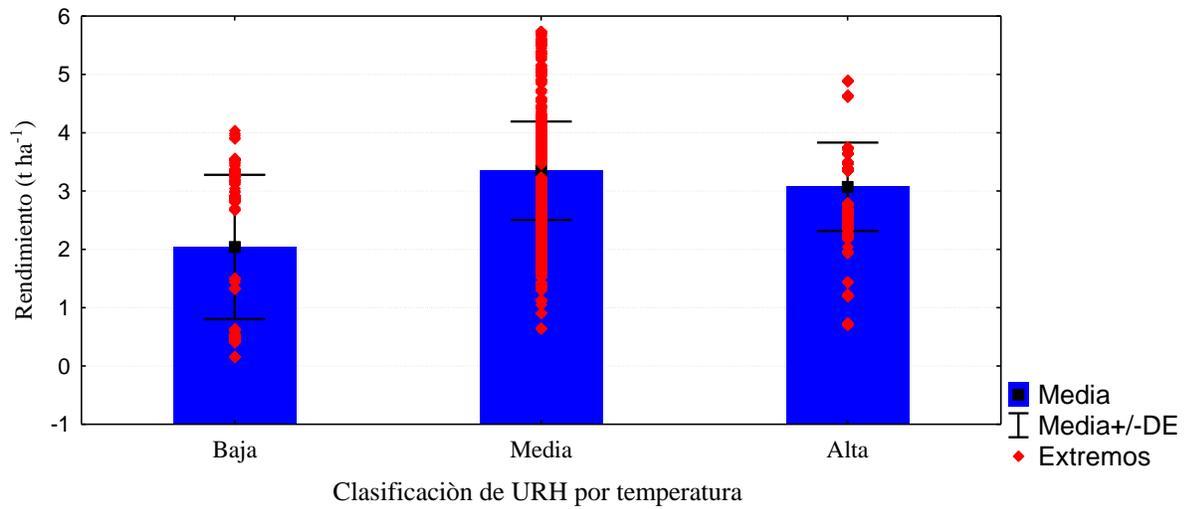


Figura 6.- Relación entre elementos del clima y el rendimiento simulado de semilla de *J. curcas* en Veracruz, México para el periodo 2000-2010.

*J. curcas* en Veracruz,

## REFERENCIAS

- Achten, W.M.J., Verchot, L., Franken, Y.J., Mathijs, E., Singh, V.P., Aerts, R., Muys, B. 2008. *Jatropha* Bio-diesel production and use. *Biomass and Bioenergy*. 32:1063-1084.
- Achten, W.M.J., Maes, W.H., Reubens, B., Mathijs, E., Singh, V.P., Verchot, L., Muys, B. 2010. Biomass production and allocation in *Jatropha curcas* L. seedlings under different levels of drought stress. 34:667-676.
- Akhavan, S., Abedi-Koupai, L., Mousavi, S.F., Afyuni, M., Eslamian, S.S., Abbaspour, K.C. 2010. Applications of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar Watershed, Iran. *Ecosystems and Environment*. 139:675-688.
- Azam, M.M., Waris, A., Nahar, N. M. 2005. Prospects and potential of fatty acid methyl esters of some non-traditional seed oils for use as biodiesel in India. *Biomass and Bioenergy*. 29:293-302.
- Behera, S.K., Srivastava, P., Tripathi, R., Singh, J.P., Singh, N. 2010. Evaluation of plant performance of *Jatropha curcas* L. under different agro-practices for optimizing biomass- A case study. 34:30-41.
- Biswas, S., Kaushik, N., Srikant, G. 2006. Biodiesel: technology and business opportunities- an insight. In: Proceedings of the biodiesel conference toward energy independence-focus on *Jatropha*. Singh B, Swaminathan, R., Ponraj, V (eds.). New Delhi, India. June 9-10. pp. 303-330.
- Fairless, D. 2007. Biofuel: the little shrub that could-maybe. *Nature*. 449:652-655.
- FAO. 2008. The State of Food and Agriculture: Biofuels: prospects, risks and opportunities.
- Faramarzi, M., Yang, M., Schulin, R., Abbaspour, K.C. 2010. Modeling wheat yield and crop water productivity in Iran - Implications of agricultural water management for wheat production. *Agricultural Water Management*. 97:1861-1975.
- Foidl, N., Foidl, G., Sanchez, M., Mittelbach, M., Hackel, S. 1996. *Jatropha curcas* L. as a source for the production of biofuel in Nicaragua. *Bioresource Technology*. 58:77-82.
- Francis, G., Endinger, R., Becker, K. A. 2005. A concept for simultaneous wastelands reclamation, fuel production, and socio-economic development in degraded areas in India: need, potential and perspectives of *Jatropha* plantations. *Natural Resources Forum*. 29:12-24.
- Franken, J.Y., Nielsen, F. 2010. Plant establishment and management. In: *The Jatropha Handbook*. From cultivation to application. Van der Putten, E., Franken, Y.J., Nielsen, F.de Jongh, J., Rijsenbeek, W., Beerens, P., Van Eijck, J., Galema, T., Groeneveld, G., Ansø, N., Wijnker, M., Adriaans, T., Moers P. (eds.). *Fuels from Agriculture in Communal Technology (FACT)*. Eindhoven, Deutschland. pp:9-29.
- Garg, K.K., Bharati, L., Gaur, A., George, B., Acharya, S., Jella, K., Narasimhan, B. 2011. Spatial mapping of agricultural water productivity using the SWAT model in Upper Bhima Catchment, India. *Irrigation and Drainage*. 60:1-20.
- Gour, V.K. 2006 Production practices including post-harvest management of *Jatropha curcas*. In: Proceedings of the biodiesel conference toward energy independence-focus on *Jatropha*. Singh B, Swaminathan, R., Ponraj, V (eds.). New Delhi, India. June 9-10. pp: 223-251.
- Gunaseelan, V.N. 2009. Biomass estimates, characteristics, biochemical methane potential, kinetics and energy flow from *Jatropha curcas* on dry lands. *Biomass and Bioenergy*. 33:589-596.
- Guzman, E., Bonini, J., Matamoros, D. 2004. Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para la predicción de caudales y sedimentos en una cuenca hidrográfica Caso de estudio: Cuenca del Rio Chaguana. *Revista Tecnológica*. 17:152-161.
- Heller J. 1996. Physic nut *Jatropha curcas*. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. International Plant Genetic Resources Institute. Rome, Italy.
- [http://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/energy/op/biofuels/biofuel\\_henning.pdf](http://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/energy/op/biofuels/biofuel_henning.pdf). Consulted on September 27 of 2011.
- Instituto Indio de Tecnología Delhi (IITD). 2006.

- Modeling Effect of *Jatropha* on Water Resources of Chhattisgarh. Fourth Report to European Union New Delhi, India.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 2007. Atlas de la Bioenergía y los Biocombustibles en las Américas. II. Biodiesel. IICA, San José, Costa Rica.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 2009. INIFAP 2004-2009: Evolución, Logros y Retos. Publicación Especial Número 3. México, D. F., México.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 2012. Potencial productivo de *Jatropha curcas* L. Agromapas digitales. <http://www.agromapas.inifap.gob.mx/potencialproductivo/imagenes/mapas/jatropha.jpg>. Consultado el 7 de enero del 2012.
- Jenks, G.F. 1967. The Data Model Concept in statistical Mapping. *International Yearbook of Cartography*. 7:186-190.
- Jongschaap R.E.E., Corre, W.J., Bindraban, P.S., Brandenburg, W.A. 2007. Claims and Facts on *Jatropha curcas* L.: Global *Jatropha curcas* evaluation, breeding and propagation programme. Plant Research International Report, Wageningen, Netherlands.
- Kehira, A.A.A., Atta, N.M.M. 2009. Response of *Jatropha curcas* L. to water deficit: yield, water use efficiency and oilseed characteristics. *Biomass and Bioenergy*. 33:1343-1350.
- Lakshmanan, V., Rajalakshmi, D., Nagothu, R., Annamalai, H. 2011. Climate Change Adaptation Strategies in Bhavani Basin using SWAT Model. *Applied Engineering in Agriculture*. 27:887-893.
- Luo, Y, He, C., Sophocleous, M., Yin, Z., Hongrui, R., Ouyang, Z. 2008. Assessment of crop growth and soil water modules in SWAT2000 using extensive field experiment data in an irrigation district of the Yellow River Basin. *Journal of Hydrology*. 352:139-156.
- Maes, W.H., Trabucco, A., Achten, W.M.J., Muys, B. 2009. Climatic growing conditions of *Jatropha curcas* L. *Biomass and Bioenergy*. 33:1481-1485.
- Makkar, H.P.S., Becker, K. 1997. Potential of *J. curcas* seed meal as a protein supplement to livestock feed, constraints to its utilization and possible strategies to overcome constraints. In: *Biofuels and industrial products from Jatropha curcas-Proceedings from the symposium "Jatropha97"*. Gübitz G.M., Mittlebach, M., Trabi, M. (eds.). Managua, Nicaragua. February 23-27. pp. 190-205.
- Narasimhan, B., Srinivasan, R., Arnold, J.G., DiLuzio, M. 2005. Estimation of long-term soil moisture using a distributed parameter hydrologic model and verification using remotely sensed data. *American Society of Agricultural Engineers*. 48:1101-1113.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. 2005. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Backland Research Center. Texas Agricultural Experiment Center. Texas, U.S.A.
- Ndong, R., Montrejaud-Vignolesk, M., Saint Girons, O., Gabrielle, B., Pirot, R., Domergue, M., Sablayrolles, C. 2009. "Life Cycle Assessment of Biofuels from *Jatropha curcas* in West Africa: A Field Study." *GCB Bioenergy*. 1:197-210.
- Ng, T.L., Eheart, J.W., Cai, X., Miguez, F. 2010. Modeling Miscanthus in the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to simulate its water quality effects as a bioenergy crop. *Environmental Science Technology*. 44:7138-7144.
- Núñez-Colín, C.A., Goytia-Jiménez, M.A. 2009. Distribution and agroclimatic characterization of potential cultivation regions of physic nut in México. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 44:1078-1085.
- Openshaw, K. 2000. A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise. *Biomass and Bioenergy* 19:1-15.
- Pompelli, M.F., Barata-Luis, R., Vitorino, H.S., Gonçalves, E.R., Rolim, E.V., Santos, M. G., Almeida-Cortez, J.S., Ferreira, V.M., Lemos, E.E., Endres, L. 2010. Photosynthesis, photoprotection and antioxidant activity of purging nut under drought deficit and recovery. 34:1207-1215.
- Reubens, B., Achten, W.M.J., Maes, W. H., Danjon, F., Aerts, R., Poesen, J., Muys, B. 2011.

- More than biofuel? *Jatropha curcas* root system symmetry and potential for soil erosion control. *Journal of Arid Environments*. 75:201-205.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., Papendick, R.I. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*. 50:1031-1036
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2008. Estrategia Intersecretarial y Programas de Producción Sustentable de Insumos e introducción de Bioenergéticos en México. Resumen Ejecutivo. Gobierno Federal, México D.F., México.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) 2009. Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico. México, Gobierno Federal México D.F. México
- Sharma, N. 2007. Pest disease management. In: FACT seminar on *Jatropha curcas* L. agronomy and genetics. FACT Foundation. Wageningen, Netherlands.
- Sharpley, A.N., Williams, J.R. 1990. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator. USDA, Agricultural Research Service. Technical bulletin No. 1768. Washington, D.C., U.S.A.
- Singh, L., Bargali, S.S., Swamy, S.L. 2006. Production practices and post-harvest management. In: Proceedings of the biodiesel conference toward energy independence –focus of *Jatropha*. Singh, B., Swaminathan, R., Ponraj, V. (eds.). New Delhi, India June 9-10. pp: 223-251.
- Srinivasan, R., Zhang, X., Arnold, J. 2010. SWAT ungauged: Hydrological budget and crop yield predictions in the upper Mississippi river basin. *American Society of Agricultural and Biological Engineer*. 53:1533-1546.
- Sunil, N., Varaprasad, K.S., Sivaraj, N., Kumar, T.S., Abraham, B., Prasad, R.B.N. 2008. Assessing *Jatropha curcas* L. germplasm in-situ a case study. *Biomass and Bioenergy*. 32:198-202.
- Tiwari, A.K., Kumar, A., Raheman, H. 2007. Biodiesel production from *Jatropha* (*Jatropha curcas*) with high free fatty acids: an optimized process. *Biomass and Bioenergy*. 31:569-575.
- Trabucco, A., Achten, W.M.J., Bowe, C., Aerts, R., Van Orshoven, J., Norgroves, L., Muys, B. 2010. Global mapping of *Jatropha curcas* yield based on response of fitness to present and future climate. *GCB Bioenergy* 2:139-151.
- United States of America-Department of Energy (USA-DOE). 2010. Biomass Energy Data Book. Department of Energy. Ridge National Laboratory, U.S.A.
- Wu, W.G., Huang, J.K., Deng, X.Z. 2010. Potential land for plantation of *Jatropha curcas* as feedstocks for biodiesel in China. *Science China Earth Sciences*. 53:120-127.

*Submitted January 27, 2012– Accepted March 03, 2012*

*Revised received March 15, 2013*