



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**  
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS VERACRUZ**

POSTGRADO EN AGROECOSISTEMAS TROPICALES

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

**HÉCTOR DANIEL INURRETA AGUIRRE**

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS**

MANLIO FABIO ALTAMIRANO, VERACRUZ, MÉXICO

2012

La presente tesis, titulada: **Potencial para producir *Jatropha curcas* L. como materia prima para biodiésel en el estado de Veracruz**, realizada por el alumno: **Héctor Daniel Inurreta Aguirre**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**AGROECOSISTEMAS TROPICALES**

**CONSEJO PARTICULAR**

CONSEJERO:



DR. ELISEO GARCÍA PÉREZ

ASESOR:



DR. JESÚS URESTI GIL

ASESOR:



DR. JUAN PABLO MARTÍNEZ DÁVILA

ASESOR:



DR. HIPÓLITO ORTIZ LAUREL

Tepetates, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, 20 de enero de 2012

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

Héctor Daniel Inurreta Aguirre, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2012

Existe gran interés alrededor del mundo en utilizar el aceite de *Jatropha curcas* L. como materia prima para biodiésel; sin embargo, con el fin de aumentar la eficiencia energética y económica de su cultivo, es necesario identificar áreas con condiciones agroecológicas óptimas y estimar su productividad en zonas marginales para evitar competencia con la producción de alimentos. El objetivo de este trabajo fue conocer la variación del potencial productivo de *Jatropha curcas* L. 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 *Jatropha curcas* L. Las unidades de cálculo fueron las Unidades de Respuesta Hidrológica (URH), definidas a partir de un modelo de elevación digital (DEM), un mapa edafológico y un mapa de uso actual del suelo. Los datos climáticos se obtuvieron de 95 estaciones climáticas. Los parámetros fisiológicos del cultivo fueron tomados de la literatura. El rendimiento simulado de semilla de *Jatropha curcas* L. varió de 0.16 a 5.74 t ha<sup>-1</sup> y se cartografió agrupando las URH en cinco intervalos. Se cuantificó la superficie correspondiente a cada intervalo, y su relación con el uso actual del suelo, agrupado en agrícola, forestal, y pastizales. Se identificaron 872 mil hectáreas con rendimiento de semilla superiores a 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.

# POTENTIAL TO PRODUCE *Jatropha curcas* L. AS FEEDSTOCK FOR BIODIÉSEL IN THE STATE OF VERACRUZ

Héctor Daniel Inurreta Aguirre, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2012

There is great interest around the world to use the oil from *Jatropha curcas* L. as feedstock for biodiesel; however, in order to increase the energetic and economic efficiency of its cultivation, it is necessary to identify areas with optimal agroecological conditions 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 *Jatropha curcas* L. in response to different soil and climatic conditions of the state of Veracruz. The model used to simulate the seed yield of *Jatropha curcas* L. was the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). The units of calculation were the Hydrologic Response Units (HRU), defined from a digital elevation model (DEM), an edaphologic map and a map of current land use.. The weather information was obtained from 95 weather stations. Crop physiological parameters were taken from the literature. The simulated seed yield of *Jatropha curcas* L. ranged from 0.16 to 5.74 t ha<sup>-1</sup> and was mapped by grouping the HRU in five5 intervals. The area for each interval and their relationship with the current land use, grouped into agricultural, forest and grasslands. Eight hundred seventy two thousand hectares with seed yield higher than 3.63 t ha<sup>-1</sup> in grasslands were identified. The seed yield showed the greatest sensitivity to soil depth, followed by mean annual temperature and annual total rainfall.

Key words: SWAT, simulation models, zoning, GIS.

## AGRADECIMIENTOS

A mi Madre, **Elsa Aguirre** por haberme dado todo lo que tengo y haberme hecho todo lo que soy.

A mi Novia **Mariana Ruesgas**, por ser mi compañera y compartir conmigo un pasado, un presente y sobre todo un futuro.

A mi Padre **Ventura Inurreta**, por brindarme sus sabios consejos en todo momento.

A mi Padre **Anastasio Aguirre**, por ser siempre un ejemplo a seguir.

A mis Tíos **Josefa, Armando y Rocio**; mis primos **Karen, Denisse, Nadia, Marijose, Rocio y Rafael**; y mis sobrinos **Karol, Luca y Miguel** por todo el amor y cariño que siempre me han dado.

A mis Maestros, por haber contribuido en mi formación y ayudarme a comprender un poco mejor el mundo que me rodea.

A **Jesús Uresti**, por darme la oportunidad de trabajar con él y ayudarme siempre que lo solicite.

A **Roberto López** por ser un gran compañero, pero sobre todo un amigo durante tantos años.

A **Abel Hernández, Juan, Jair y Miguel Medina, Juan Concha, Oscar Maraboto, Alfredo Ruiz y Javier Andrade** por ser grandes amigos a lo largo de todos estos años.

A **CONACYT** por haber financiado mis postgrado, lo que me permitió crecer en todos los aspectos, pero especialmente como ser humano.

A **INIFAP** por todas las facilidades que ahí se me brindaron para el desarrollo de este proyecto.

Al proyecto **FOMIX** con clave: VER-2009-C03-128049 titulado “Identificación de especies e insumos vegetales, tecnológicas de procesos industriales y diseño de planta para producir en Veracruz biocombustibles en forma tecnológica, económica y sustentablemente viables”, por las facilidades de financiamiento otorgadas.

Al proyecto **FOMIX** con clave VER-2009-C03-127702 titulado “Diversidad morfo genética de *Jatropha curcas* y su potencial como materia prima para bioenergéticos en el estado de Veracruz”, por las facilidades de financiamiento otorgadas.

Dedicada a la MEMORIA de mi madre **Nadina Uscanga Domínguez**, quien simplemente es la persona más bella que he conocido. Siempre te recordare con un profundo amor y tratare de ser la persona que siempre quisiste hacer de mi.

## CONTENIDO

## Página

<b>1. Introducción</b> .....	1
<b>2. Problemática</b> .....	3
<b>3. Hipótesis</b> .....	4
3.1. General.....	4
3.2. Específicas .....	4
<b>4. Objetivos</b> .....	5
4.1. General.....	5
4.2. Específicos .....	5
<b>5. Revisión de literatura</b> .....	6
5.1. Biocombustibles líquidos .....	6
5.2. Contexto global para la producción de biocombustibles .....	8
5.3. El cultivo de <i>Jatropha curcas</i> L.....	16
5.4. Sistemas de información geográfica .....	32
5.5. Modelos de simulación .....	34
5.6. El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) .....	39
<b>6. Marco conceptual</b> .....	44
6.1. Sistema y pensamiento sistémico .....	44
6.2. Agroecosistemas.....	45
6.3. Sostenibilidad e intensificación agroecológica .....	47
6.4. Zonificación agroecológica .....	47
<b>7. Materiales y Métodos</b> .....	51
7.1. Descripción del área de estudio .....	51

7.2. Generación de archivos requeridos por el modelo .....	56
7.3. Procedimiento de simulación.....	64
7.4. Análisis de resultados.....	69
<b>8. Resultados</b> .....	<b>72</b>
8.1. Simulación y cartografía .....	72
8.2. Ubicación de las zonas con los distintos intervalos de rendimiento simulado de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L. en el mapa de uso actual del suelo .....	77
8.3. Análisis de correlación entre rendimiento simulado de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L. y variables de suelo y clima.....	77
8.4. Análisis general de rendimiento simulado de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L.....	87
<b>9. Conclusiones</b> .....	<b>89</b>
<b>10. Recomendaciones</b> .....	<b>90</b>
<b>11. Literatura Citada</b> .....	<b>91</b>

## LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1.- Requerimientos agroecológicos de <i>Jatropha curcas</i> L.....	22
Cuadro 2.- Transpiración anual de plantaciones de <i>Jatropha curcas</i> L. (mm año <sup>-1</sup> ) con diferentes densidades de plantas.....	23
Cuadro 3.- Criterios desarrollados por Hallowes (2007) para modelar áreas adecuadas para la producción de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L.....	24
Cuadro 4.- Lámina de agua y rendimiento promedio de semilla de árboles de <i>Jatropha curcas</i> L. de dos años de edad en Sinaloa, México.....	24
Cuadro 5.- Tasas de fertilización mineral de <i>Jatropha curcas</i> L. con base en la remoción de nutrientes. ....	26
Cuadro 6.- Evolución de la tasa de fertilización recomendada para <i>Jatropha curcas</i> L.....	27
Cuadro 7.- Rendimiento de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L. esperado a los cinco años de edad bajo diferentes escenarios de fertilidad del suelo y disponibilidad de agua de lluvia.....	28
Cuadro 8.- Relación beneficio/costo (B/C) en la producción de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L.....	30
Cuadro 9.- Resultados de la evaluación del ciclo de vida del biodiésel de <i>Jatropha curcas</i> L. bajo las condiciones del Sureste de México. Biorefinería con capacidad para producir 50 millones de litros anuales de biodiésel.....	32
Cuadro 10.- Partición de emisiones de GEI y partición del uso y producción de energía.....	32
Cuadro 11.- Clasificación de modelos de simulación por distintos criterios.....	36
Cuadro 12.- Evolución histórica del concepto de agroecosistemas. ....	46
Cuadro 13.- Metodología y fuentes usadas para calcular los datos de suelo faltantes. ....	59
Cuadro 14.- Características del perfil típico del suelo Cambisol calcárico. ....	59
Cuadro 15.- Parámetros fisiológicos de <i>Jatropha curcas</i> L. utilizados por SWAT para simular el rendimiento de semilla. ....	60
Cuadro 16.- Datos estadísticos de la estación meteorológica 30100.....	62



Cuadro 17.- Manejo agronómico de <i>Jatropha curcas</i> L. utilizado para simular el rendimiento de semilla con el modelo SWAT.....	67
Cuadro 18.- Clasificación de suelos por textura, profundidad y materia organica (MO). .....	70
Cuadro 19.- Superficie (ha x 1000) de los intervalos de rendimiento de <i>Jatropha curcas</i> L. en sobreposición con los distintos usos actuales de suelo.....	78
Cuadro 20.- Datos estadísticos básicos de la clasificación de URH por profundidad de suelo.....	79
Cuadro 21.- Niveles de rendimiento de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L. en diferentes interacciones entre la profundidad del suelo y otros factores edáficos. ....	80
Cuadro 22.- Niveles de rendimiento de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L. en diferentes interacciones entre la profundidad del suelo y elementos del clima.....	80
Cuadro 23.- Datos estadísticos básicos de la clasificación de URH por temperatura.....	83
Cuadro 24.- Niveles de rendimiento de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L. en diferentes interacciones entre la temperatura y factores edáficos. ....	83
Cuadro 25.- Niveles de rendimiento de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L. en diferentes interacciones entre la temperatura y otros elementos del clima.....	84
Cuadro 26.- Datos estadísticos básicos de la clasificación de URH por precipitación.....	85
Cuadro 27.- Niveles de rendimiento de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L. en diferentes interacciones entre la precipitación pluvial y factores edáficos. ....	86
Cuadro 28.- Niveles de rendimiento de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L. en diferentes interacciones entre la precipitación pluvial y otros elementos del clima.....	86
Cuadro 29.- Presencia de factores de suelo en intervalos de rendimiento. ....	88
Cuadro 30.- Presencia de factores de clima en intervalos de rendimiento. ....	88

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.- Localización del estado de Veracruz. ....	51
Figura 2.- Climas del estado de Veracruz. ....	53
Figura 3.- Topografía y pendiente del terreno en el estado de Veracruz. ....	54
Figura 4.- Suelos del estado de Veracruz. ....	55
Figura 5.- Uso del suelo en el estado de Veracruz. ....	57
Figura 6.- Ubicación de las 95 estaciones climáticas usadas por SWAT. ....	63
Figura 7.- Estado de Veracruz dividido en las 224 subcuencas generadas por SWAT. ....	65
Figura 8.- Estado de Veracruz dividido en las 3381 URH generadas por SWAT. ....	66
Figura 9.- Distribución de las categorías de precipitación pluvial, radiación y temperatura en el estado de Veracruz. ....	71
Figura 10.- Rendimiento de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L. simulada por SWAT en el estado de Veracruz, México. ....	73
Figura 11.- Comparación entre nivel de adaptación climática (Sánchez-Colín y Goytia-Jiménez, 2009) y rendimiento simulado de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L. en Veracruz. ....	76
Figura 12.- Potencial productivo de <i>Jatropha curcas</i> L. ....	76
Figura 13.- Relación entre la profundidad del suelo y el rendimiento simulado de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L. ....	79
Figura 14.- Relación entre la textura del suelo y el rendimiento simulado de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L. ....	81
Figura 15.- Relación entre el porcentaje de materia orgánica en la primera capa de suelo y el rendimiento simulado de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L. ....	82
Figura 16.- Relación entre la temperatura y el rendimiento simulado de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L. ....	83
Figura 17.- Relación entre la precipitación pluvial y el rendimiento simulado de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L. ....	85
Figura 18.- Relación entre la radiación y el rendimiento simulado de semilla de <i>Jatropha curcas</i> L. ....	87

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe interés por producir combustibles a partir de materia orgánica, comúnmente llamados biocombustibles. Dentro de estos los que han tenido mayor interés son los biocarburos líquidos (BCL), en particular el etanol y biodiésel; el etanol se elabora a partir de la fermentación de azúcares y el biodiésel a partir de la transesterificación de cualquier aceite vegetal o grasa animal (IICA, 2007a FAO, 2008a).

El interés por producir estos combustibles radica en tres principales fuerzas promotoras: a) crisis energética, b) calentamiento global, c) desarrollo rural (IICA, 2007b; FAO, 2008a; SAGARPA, 2008).

Por el contrario, existe preocupación de que las tierras cultivables que actualmente se destinan para la producción de alimentos se utilicen para la siembra de cultivos con vocación de ser materia prima para biocombustibles, ocasionando un aumento en el precio de los alimentos e incrementado los problemas de hambruna en el mundo (FAO, 2008a).

Entre las materias primas para la producción de biodiésel que han despertado mayor interés a nivel global se encuentra *Jatropha curcas* L. (*J. curcas* L.); (Sunil *et al.*, 2008; Achten *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2010), debido al alto porcentaje y calidad de aceite que poseen sus semillas (Makkar y Becker, 1997), a la facilidad con que este se convierte en biodiésel (Azam *et al.*, 2005; Tiwari *et al.*, 2007; Pompelli *et al.*, 2010), además de una serie de características agroecológicas favorables que se le han atribuido a esta especie, como su capacidad para desarrollarse bajo condiciones de estrés hídrico (Achten *et al.*, 2008; Ndong *et al.*, 2009; Trabucco *et al.*, 2010), para crecer en suelos

degradados y poco fértiles (Zahawi, 2005; Kehira y Atta, 2009; Reubens *et al.*, 2011) o por no presentar plagas y enfermedades (Francis *et al.*, 2005; Radhakrishna, 2007; Tiwari *et al.*, 2007). Es importante mencionar que algunas de estas aseveraciones no tienen fundamentos científicos, pues *J. curcas* L. es aún una especie semidomesticada que requiere de investigación (Fairless, 2007; Achten *et al.*, 2008; Reubens *et al.*, 2011).

Uno de los temas que requiere mayor investigación en *J. curcas* L. es el rendimiento potencial de semilla de este cultivo bajo distintas condiciones edafoclimáticas (Pompelli *et al.*, 2010; Trabucco *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2010), que permita identificar zonas con alto potencial productivo, para el futuro establecimiento de plantaciones comerciales.

Actualmente se han desarrollado sistemas de información geográfica que permiten realizar análisis complejos y espacialmente explícitos (Tsihrintzis *et al.*, 1996; Simms, 2002), es decir, que son capaces de abordar fenómenos considerando las distintas características de un área geográfica. De la misma forma se han creado modelos de simulación de crecimiento de cultivos, basados en procesos con los cuales se puede predecir el rendimiento de estos a partir de la interacción entre el medio ambiente y la fisiología del cultivo (Sharply y Williams, 1990; Neitsch *et al.*, 2005). La combinación de estas dos tecnologías ha dado como resultado modelos de simulación basados en proceso con un interfaz de sistemas de información geográfica, que permite incluir la variación espacial y realizar una zonificación que no solo clasifique, si no que indique la productividad de cada zona (zonificación cuantitativa). Con estas herramientas es posible realizar investigaciones a diferentes escalas, reduciendo tiempo y costos.

## 2. PROBLEMÁTICA

Debido al cambio climático, a la crisis energética y al interés por generar desarrollo rural, se ha promovido el uso de biocombustibles a nivel global. Gracias a varias de las características que se le imputan a *J. curcas* L., esta presenta potencial para ser usada como materia prima para biodiésel. Sin embargo, existe cierta preocupación por parte de la comunidad científica de que cultivos bioenergéticos desplacen a cultivos alimenticios atentando contra la seguridad alimentaria, además del argumento de que la mayoría de las plantaciones actuales destinadas a biocombustibles son poco sustentables económica y energéticamente.

Existe un interés actual en producir *J. curcas* L. como materia prima para biocombustibles en el estado de Veracruz, sin embargo, se desconoce la variación del potencial productivo de esta especie en respuesta a las distintas condiciones edafoclimáticas presentes en la entidad.

Conocer las áreas que presentan vocación para este cultivo ayudará a aumentar la sostenibilidad de futuras plantaciones del mismo y el complementar esta información con el uso actual del suelo contribuiría a evitar una posible competencia con cultivos alimenticios.

Por todo esto, el presente trabajo planteó la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el potencial del estado de Veracruz para producir semilla de *J. curcas* L. en función de las distintas condiciones edafoclimáticas que inciden sobre la fisiología de la planta?

### **3. HIPÓTESIS**

#### **3.1. GENERAL**

El potencial para producir semilla de *Jatropha curcas* L. en el estado de Veracruz está en función del efecto de las distintas condiciones edafoclimáticas que inciden sobre la fisiología de la planta.

#### **3.2. ESPECÍFICAS**

El potencial de Veracruz para producir semilla de *J. curcas* L. está en función de las características edafoclimáticas existentes”.

En el estado de Veracruz existen áreas con potencial significativamente distinto para producir semilla de *J. curcas* L.

Las variables edafoclimáticas tienen distinto impacto sobre el rendimiento potencial de semilla de *J. curcas* L.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. GENERAL**

Conocer la variación del potencial para producir semillas de *Jatropha curcas* L. como respuesta a las diferentes condiciones edafoclimáticas del estado de Veracruz.

### **4.2. ESPECÍFICOS**

Simular el rendimiento de semilla de *J. curcas* L. en Veracruz.

Cartografiar el potencial para producir semilla de *J. curcas* L. en Veracruz.

Analizar el efecto de las distintas variables edafoclimáticas sobre el rendimiento de semilla de *J. curcas* L. en Veracruz.

## **5. REVISIÓN DE LITERATURA**

Dentro de la revisión de literatura se desarrollan algunos temas que ayudan a contextualizar este trabajo. En primer lugar se expone el concepto de biocombustibles, así como datos estadísticos de su producción actual; en segundo se habla tanto de las fuerzas que promueven a los biocombustibles, como de las precauciones que se deben de tener en dicha promoción; en tercer lugar se analiza el cultivo de *J. curcas* L. desde distintos ángulos; y por último, se describen las herramientas usadas en este trabajo.

### **5.1. BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS**

Actualmente, a nivel global se producen dos principales tipos de BCL: el etanol y el biodiésel. El etanol se produce a partir de tres principales fuentes de insumos: 1) los azúcares fermentables (sacarosa, glucosa y fructuosa), contenidos en cultivos como la caña de azúcar, remolacha azucarera y sorgo dulce; Brasil y la Unión Europea son los principales productores de etanol a partir de esos cultivos. 2) los azúcares (glucosa) contenidos en el almidón de una amplia gama de cultivos cereales como maíz, sorgo, trigo, arroz y tubérculos como la yuca; Estados Unidos de Norteamérica (E.U.A.) es el principal productor de etanol a partir del grano de maíz (Tollefson, 2008). 3) los azúcares simples contenidos en la celulosa y hemicelulosa de la biomasa vegetal. La tecnología para producir este último (el llamado etanol de segunda generación) aún no está comercialmente desarrollada; E.U.A., Canadá y la Unión Europea son los países más avanzados en la producción del etanol de segunda generación y cuentan con varias plantas piloto. Sánchez y Cardona (2005) presentan una descripción detallada de los procesos para producir cada uno de los tres tipos de etanol descritos.



El biodiesel es el segundo BCL más importante y se produce a partir del aceite vegetal de una amplia gama de cultivos y grasa animal. La Unión Europea es el principal productor de biodiésel, a partir del aceite de colza y girasol, seguido por E.U.A. y Brasil, que producen biodiésel de soya y varios países asiáticos que lo producen a partir de palma de aceite. El aceite vegetal y/o grasas animales son transformados a biodiésel a través del proceso el cual puede ser con base química, física o enzimática. La transesterificación con base química como la describe Rojas *et al.* (2009) es la más usada; Ibarra (2011) describe con detalle el proceso de transesterificación enzimática.

### **5.1.1. ESTADÍSTICAS DE PRODUCCIÓN**

Aún y cuando actualmente existe marcado interés en la producción y uso de los BCL, a nivel mundial su producción y uso sigue siendo limitado, aunque tiende a incrementarse significativamente. Según la FAO (2008a) la matriz energética mundial corresponde a 11,400 Mt equivalentes de petróleo, de las cuales, el 81 % se deriva de energía fósil y el 19 % restante de energía renovable, de la cual, el 6 %, 2 %, 1 % y 10 % corresponde a energía nuclear, hídrica, eólica y biocombustibles, respectivamente. De estos últimos, el 8.1 % corresponde a biocombustibles sólidos, principalmente la leña utilizada en la mayoría de los países en vías de desarrollo, y sólo el 1.9 % corresponde a BCL, de los cuales, el 1 % se utiliza en el sector de transportes y el 0.9 % en otros sectores, como la generación de electricidad. Se estima que para 2030 la producción y uso de BCL para el sector de transportes se incremente hasta 4 %. En México, la fuente y producción de energía primaria se distribuye en 92.5 % de combustibles fósiles y 7.5 % de energía renovable, de la cual, el 3.4 % corresponde a biocombustibles originados de

la leña y el bagazo de caña de la industria azucarera. La producción de BCL en México aún es insignificante.

En el 2009 según USA-DOE (2010) se produjeron cerca de 93 millardos de litros de biocombustible (77.03 millardos de litros de etanol + 17.89 millardos de litros de biodiésel), de los cuales E.U.A. produjo 55 % etanol y 12 % biodiésel, Brasil 35 % etanol y 10 % biodiésel, la Unión Europea 5 % etanol y 62 % biodiésel, y Asia conjuntamente con Oceanía 4 % etanol y 14 % biodiésel; 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 % etanol y 299 % biodiésel), con una tasa de incremento anual de 11.3 millardos de litros (8.62 millardos de litros para etanol y 2.68 millardos de litros para biodiesel), sin embargo, México hasta el 2007 no tuvo producción significativa, y del 2007 al 2009 solo aumentó a una tasa anual de 1.99 millones de litros (0.06 millones de litros para etanol y 1.93 millones de litros para biodiésel).

## **5.2. CONTEXTO GLOBAL PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES**

Al principio de la década de los 70 con la primera crisis energética a nivel global, se inició a mayor escala la promoción y uso de los BCL, y a partir de 2002, cuando se visualizó otra crisis energética y se agudizó la percepción sobre la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y el calentamiento global, se observa a nivel mundial y en México una promoción y producción ascendente de BCL sin precedentes (IICA, 2007b; FAO, 2008a; SAGARPA, 2008), que obedece a tres principales fuerzas: 1) la búsqueda

de seguridad energética, 2) reducir la emisión de GEI y 3) promover el desarrollo económico en sector rural de países en vías de desarrollo.

### **5.2.1. SEGURIDAD ENERGÉTICA**

La International Energy Agency (2008) reporta reservas de combustibles fósiles solamente para los próximos 60 años, lo cual pondrá en alto riesgo la seguridad energética y desarrollo económico de las naciones. Ante ésta crisis energética, se ha propuesto a los BCL como una alternativa de solución que puede contribuir con la matriz energética. Sin embargo, la FAO (2008a) reporta que actualmente sólo el 1.9 % de la matriz energética global corresponde a BCL, y se proyecta que para 2030 se incremente hasta 4 % aproximadamente. Esta misma fuente indica que en el planeta se dispone de aproximadamente 500 millones de hectáreas para producir biocombustibles sin entrar en competencia con la producción de alimentos, y que una parte significativa de esta superficie se localiza en América Latina. Lo anterior significa una aportación aproximada de 24 % (12 % de BCL de primera generación y 12 % de BCL de segunda generación) a la matriz energética mundial. Doornbosch y Steenblik (2007) indican que en 2050 los biocombustibles podrían participar con el 23 % de las necesidades de combustible líquido. Con base en lo anterior, se puede decir que los BCL pueden contribuir hasta con una cuarta parte de las necesidades actuales de combustibles, por lo que es necesario desarrollar paralelamente otras fuentes de energía renovable.

### **5.2.2. CALENTAMIENTO GLOBAL Y CAMBIO CLIMÁTICO**

El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) (2007b) confirma que el calentamiento global de la tierra es un hecho debido a causas antropogénicas (Solomon *et al.*, 2007). El incremento de la población, la quema de combustibles fósiles

para el abastecimiento y uso de energía, la agricultura, la deforestación y el cambio de uso del suelo para la producción de alimentos, productos forestales y urbanización, son los principales impulsores de la emisión de los gases de efecto invernadero (GEI) bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), a tasas que son consideradas peligrosas para el equilibrio del sistema climático, la seguridad alimentaria, la protección de ecosistemas y el desarrollo económico sostenible. La quema de combustibles fósiles es la causa principal de emisión de (GEI) que ocasionan el calentamiento global de la tierra. Barker *et al.* (2007) reportan que de 1970 a 2004 a nivel mundial la emisión de GEI se incrementó de 28.7 a 49 Gt  $\text{CO}_2$ -eq año<sup>-1</sup>, y que esta tendencia se mantendrá. La tasa de emisión global de GEI para 2030 se incrementará entre 25 % y 90 %, y para 2100 entre 90 % y 250 %, comparado con las tasas de emisión prevalecientes en el año 2000; y el mayor volumen de emisión (aproximadamente 70 %) provendrá de países en vías de desarrollo que buscan el desarrollo económico a través de la industrialización. El 77 % de las emisiones corresponde a  $\text{CO}_2$  proveniente principalmente de la quema de combustibles fósiles y deforestación, mientras que el 23 % restante corresponde principalmente a  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$  provenientes en su mayor parte del sector agropecuario. Estos mismos autores, reportan que por sector en 2004 el 26 % de las emisiones de GEI se originó en las actividades para el abastecimiento de energía, 19 % en la industria, 17 % en el sector forestal y uso del suelo, 14 % en el sector agropecuario, 13 % en el sector de transportes, 8 % en el sector residencial, comercial y de servicios y 3 % en basura y aguas negras.

El incremento de GEI en la atmósfera provocará, entre otras cosas, el incremento de la temperatura global de la tierra. Meehl *et al.* (2007) reportan que para los períodos 2011-2030, 2046-2065 y 2080-2099 la temperatura global promedio se incrementará en 1 a 2 °C, 3 a 4 °C y 4 a 7 °C, respectivamente. El calentamiento global impactará negativamente, entre otros sectores, a la productividad de los sectores agropecuario y forestal, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria (Easterling *et al.*, 2007; Parry *et al.*, 2007).

Para mitigar la emisión de GEI, el IPCC (2007b) plantea tres grandes acciones: reducción de emisiones, secuestro de carbono y desplazamiento de emisiones mediante el uso de energía renovable, entre la cual se ubican los biocombustibles líquidos. Sin embargo, el potencial de mitigación de la emisión de GEI por el uso de los biocombustibles líquidos es bajo. Según Smith *et al.* (2007), el potencial global de mitigación en la agricultura varía entre 5,500 y 6,000 Mt CO<sub>2</sub>-eq año<sup>-1</sup>, de las cuales aproximadamente sólo 200 Mt CO<sub>2</sub>-eq año<sup>-1</sup> corresponden a los biocombustibles. Al comparar estas cifras con la emisión global de 49 Gt CO<sub>2</sub>-eq año<sup>-1</sup>, se deduce que el potencial de mitigación, tanto en la agricultura como por los biocombustibles, es bajo.

### **5.2.3. DESARROLLO RURAL**

Ante el limitado impacto de los biocombustibles líquidos en la matriz energética y la reducción de la emisión de GEI y el calentamiento global, se puede plantear la hipótesis de que la principal razón de la producción de los biocombustibles líquidos, por lo menos en países en vías de desarrollo, es crear una nueva fuente de ingresos para los productores rurales que mejore su calidad de vida y el desarrollo rural sustentable en general. De hecho, la mayoría de la literatura relacionada con la producción de

biocombustibles (OECD, 2007; FAO, 2008a; Ministerio de Ambiente y Energía, 2008; SAGARPA, 2008; IICA, 2010) evoca al desarrollo rural sustentable como una de las principales razones para producir biocombustibles líquidos. En México, la Comisión Intersecretarial para el desarrollo de los bioenergéticos textualmente indica que, dentro de las motivaciones principales para el desarrollo de la bioenergía a gran escala, la de mayor significado es la posibilidad de impulsar el desarrollo rural sustentable, así como el desarrollo industrial y económico de diversas zonas de México, gracias a la creación de un nuevo mercado con compensaciones por la exportación e importación de bioenergía, con la ventaja logística debido a la infraestructura, demanda y producción.

Según Masera *et al.* (1999), la definición de agricultura sustentable más completa es la presentada en 1989 por la Sociedad Americana de Agronomía, que dice: “Una agricultura sustentable es aquella que, en el largo plazo, promueve la calidad del medio ambiente y los recursos base de los cuales depende la agricultura; provee las fibras y alimentos necesarias para el ser humano; es económicamente viable y mejora la calidad de vida de los agricultores y la sociedad en su conjunto”. Así mismo, indica que en todas las definiciones se encuentran los siguientes elementos: mejoramiento y conservación de la productividad del suelo, protección y mejoramiento del ambiente, la satisfacción de necesidades humanas, la viabilidad económica, la aceptabilidad social y mejora de la calidad de vida de los agricultores y la sociedad y la durabilidad del sistema en el largo plazo.

Como se puede deducir de lo anterior, la preservación de los recursos naturales y la rentabilidad de las actividades del sector agropecuario es uno de los principales indicadores del desarrollo rural sustentable. Al respecto, Doornbosch y Steenblik

(2007), Santa Bárbara (2007), FAO (2008a), OECD (2008) y Giampietro y Mayumi (2009) concluyen que actualmente la producción y uso de BCL no es redituable, por lo que están altamente subsidiados por los gobiernos. El litro de biodiésel en la Unión Europea presenta un subsidio de aproximadamente un dólar, mientras que en E.U.A. el litro de etanol cuenta con subsidios que varían entre 0.40 y 0.60 dólares. Walker (2011) a partir de su revisión, presenta que en la mayoría de los países productores de etanol a partir de una amplia gama de especies vegetales, sólo el etanol de caña de azúcar en Brasil y el de sorgo dulce en China son ligeramente más redituables que la gasolina. En su análisis, este autor también concluye que, en promedio, el 65 % y 35 % del costo total de la producción del etanol se atribuye a la producción del insumo energético vegetal y al proceso industrial para convertirlo en etanol.

Entre las principales causas de la baja rentabilidad se encuentra la baja productividad de los insumos vegetales bioenergéticos y los altos costos de producción, tanto en la fase primaria de producción de insumos (sector agrícola), como de los procesos industriales para transformar las materias primas en biocombustibles líquidos. De acuerdo con lo anterior y bajo los precios actuales del petróleo, la producción y uso de los BCL no es redituable sin el apoyo de subsidios gubernamentales, los cuales son descritos con detalle por la FAO (2008a). Sin embargo, se plantea la hipótesis de que, en la medida que el petróleo fósil se agote y sus costos se incrementen, la rentabilidad de los BCL sin subsidios se incrementará.

Sin dejar de reconocer que para lograr el desarrollo rural sustentable de una región dada es necesaria la convergencia de muchos factores de índole ambiental y socioeconómicos, la alta rentabilidad de los BCL puede coadyuvar significativamente a

lograrla y para ello, es prioritaria la generación de materiales genéticos altamente productivos, tecnologías de bajo costo y la identificación y evaluación del potencial de producción de los insumos bioenergéticos de las diferentes áreas, como lo establece la SAGARPA(2009) en las líneas estratégicas de su Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico.

#### **5.2.4. SEGURIDAD ALIMENTARIA**

A nivel mundial se está de acuerdo en que la producción de BCL no debe competir por tierras, agua y otros recursos con la producción de alimentos, por lo que para lograrlo se propone el uso de tierras llamadas genéricamente tierras marginales (tierras degradadas de baja productividad, tierras subutilizadas y tierras abandonadas y ociosas no utilizadas en el sector agropecuario). También se propone el uso de cultivos altamente productivos y no utilizados en la alimentación humana como el sorgo dulce y la *Jatropha curcas* L. Como su nombre lo indica, los terrenos propuestos son marginales con bajo potencial de producción, mientras que los cultivos propuestos como la *J. curcas* L., no presentan el potencial de producción suficiente y menos bajo las condiciones limitantes de los terrenos marginales, por lo que junto con los altos costos de producción, los escenarios propuestos no presentan condiciones para hacer de la producción de BCL una actividad redituable, como ya se describió en el punto anterior.

Por lo anterior, para que la producción de BCL sea rentable y contribuya con el desarrollo rural sustentable, se plantea la hipótesis de que forzosamente competirá por tierras, agua, y otros insumos con la producción de alimentos, y se presentarán impactos negativos en la disponibilidad y el precio de los alimentos, que afectarán



negativamente a los sectores más pobres de las poblaciones. De hecho, a nivel mundial ya se reportan indicios del efecto negativo de la producción de BCL en alimentos debido al incremento en la demanda de insumos bioenergéticos (almidón, azúcares, aceite) no acorde con la oferta. Von Braun (2007) concluye que los BCL son, después del incremento de la población y el crecimiento económico de países como China y la India, el tercer factor que en la última década ha influido significativamente en el incremento del precio de los alimentos, debido a que estos originaron un incremento en la demanda, ante la reducción de la oferta debido al mayor consumo humano y contingencias climáticas, lo cual se agravará con el cambio climático. La FAO (2008b) y Doornbosch y Steenblik (2007) indican que el incremento en el precio de los alimentos generalmente beneficia a los productores agropecuarios pero perjudica a los consumidores, principalmente a las fracciones más pobres de las poblaciones, y que de no haber cambio en las políticas actuales sobre producción de BCL, se pondrá en alto riesgo la seguridad alimentaria mundial.

Según la FAO (2008a), 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, por lo tanto, para lograr un mayor abastecimiento sin ampliar la frontera agrícola de tierras dedicadas a la producción de BCL, es necesario implementar medidas como: incremento de la productividad del suelo por unidad de superficie, desarrollo de especies vegetales más eficientes (por unidad de superficie y tiempo) para producir los insumos bioenergéticos, desarrollo de tecnologías de bajo costo, implementación de proyectos alternativos para incrementar la producción de alimentos e identificar y evaluar el potencial de producción de los insumos

bioenergéticos de las diferentes áreas, como se mencionó en el punto anterior (SAGARPA, 2009).

### **5.3. EL CULTIVO DE *JATROPHA CURCAS* L.**

En los últimos años, en México se observa una creciente promoción y apoyo para producir biodiésel a partir de *J. curcas* L. como cultivo energético altamente promisorio en terrenos marginales, con alta expectativa de productividad para reducir la pobreza, la emisión de GEI e incrementar seguridad energética (La Jornada Michoacán, 2007; Imagen del Golfo, 2008; SAGARPA, 2008; CONAFOR, 2009; INIFAP, 2009). Sin embargo, a la fecha, en la literatura científica con revisión por pares en México y a nivel internacional no fueron encontrados reportes de proyectos exitosos. En respuesta a lo anterior, recientemente se ha publicado un considerable número de artículos científicos y reportes técnicos que permiten establecer las causas que han limitado el éxito de los proyectos, el estado actual de la tecnología para producir semilla de *J. curcas* L. y los procesos industriales para transformar el aceite en biodiesel, el rendimiento energético y la reducción en la emisión de GEI (Uresti-Gil *et al.*, 2009).

Según varios autores (Openshaw, 2000; Euler y Gorritz, 2004; Asselbergs *et al.*, 2006; Achten *et al.*, 2008), entre las causas principales que han limitado el éxito de los proyectos para producir biodiésel a partir de *J. curcas* L. se encuentran: altas expectativas de rentabilidad planteadas durante el proceso de planeación de proyectos no acordes con la realidad de baja rentabilidad derivada del bajo rendimiento de semilla y productos secundarios y alto costo de producción; incertidumbre en la oferta-demanda del biodiésel; falta de tecnología e infraestructura adecuada para la producción de aceite, proceso y transporte del biodiésel; falta de políticas claras

nacionales para apoyar la producción y uso del biodiésel, y proyectos elaborados con base en “mitos”, más que basados en el conocimiento científico y tecnología disponible.

### **5.3.1. ORIGEN, DISTRIBUCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA**

La especie *Jatropha curcas* L. es nativa de Mesoamérica (Heller, 1996). Rivera-Lorca y Ku-Vera (1997) y Schmook y Serralta-Peraza (1997) indican que en México *J. curcas* L. es conocida desde tiempos prehispánicos. Se localiza en todos los estados del sureste y en los estados a lo largo de la costa del océano Pacífico con climas tropicales cálido húmedo y subhúmedo y trópico seco (Makkar *et al.*, 1998a; Makkar *et al.*, 1998b; Martínez, 2007; Núñez-Colín y Goytia-Jiménez, 2009). Desde el siglo XVI los portugueses, vía las islas Cabo Verde, la introdujeron a sus colonias en África Occidental, desde donde a su vez, fue introducida al sureste asiático (Heller, 1996; ICRISAT, 2007). Actualmente *J. curcas* L. presenta una distribución pantropical, ya que se localiza en la mayoría de países de tres continentes con climas tropicales y subtropicales localizados en la faja comprendida entre los 30° latitud norte y los 35° latitud sur (Jongschaap *et al.*, 2007).

*Jatropha curcas* L. es un árbol o arbusto oleaginoso y caducifolio, que puede alcanzar una altura máxima de 8 m; pertenece a la familia *Euphorbiaceae*, con una esperanza de vida del árbol de aproximadamente 50 años, aunque su vida económicamente productiva puede estar entre los 20 y 30 años dependiendo de su manejo. La reproducción de la planta puede ser por semilla o esquejes; en el primer caso la planta produce una raíz central pivotante y cuatro raíces laterales, y cuando se reproduce por esquejes, sólo se desarrollan las cuatro raíces laterales.

El sistema sexual de *J. curcas* L. es monoico; las inflorescencias se forman en la intersección entre las ramas y los peciolo de la hojas, por lo que la cantidad de inflorescencias y frutos está directamente relacionada con el grado de ramificación de la planta. La proporción de flores masculinas-femeninas varía entre 9:1 y 29:1 (Raju y Ezradanam, 2002; Jongschaap *et al.*, 2007); mientras que la proporción de granos de polen-óvulos se reporta como 6332:1 (Raju y Ezradanam, 2002), lo cual parece ser, una estrategia para asegurar el máximo de polinización. Dado su carácter monoico, *J. curcas* L. es polinizada por hormigas, trips, abejas y moscas, que se encargan de transportar el polen dentro de una misma planta y entre plantas adyacentes, siendo esto último lo que mayor impacto presenta en la tasa de polinización (Raju y Ezradanam, 2002). Después del período de reposo provocado por la sequía, se inicia la floración estimulada por la alta disponibilidad de humedad en el suelo provocada por las lluvias del temporal o por el riego, y mientras la disponibilidad de agua continúe, la planta continuará floreado, lo que ocasiona que en una misma rama existan frutos maduros en la base, frutos en desarrollo en la parte media y flores en el ápice, ocasionando la presencia de frutos con diferentes edades que dificultan la cosecha mecánica (Jongschaap *et al.*, 2007).

La madera del tallo y ramas es blanca, suave y esponjosa, cubierta por una corteza de color gris o rojiza; las hojas son de color verde, unidas a la rama en arreglo alternante por peciolo de 15 a 20 cm de largo. La hoja es de forma acorazonada, como lo sugiere la ecuación reportada por Severino *et al.* (2007):  $A=0.84 (LW) 0.99$ ; donde  $A$ =área en  $\text{cm}^2$ ,  $L$  y  $W$  corresponden al largo y ancho de la hoja (cm). El área de hojas pequeñas, medianas y grandes es aproximadamente  $43 \text{ cm}^2$ ,  $97 \text{ cm}^2$  y  $141 \text{ cm}^2$ ,

respectivamente. El fruto es una cápsula ovoide aproximadamente de 4 cm de largo y 3 cm de ancho, de aspecto carnosos; al principio los frutos son de color verde, posteriormente se tornan a color amarillento y finalmente, cuando están maduros, a color café-negro. El período de crecimiento del fruto desde polinización hasta madurez varía entre 75 y 90 días. Los frutos maduros se abren pasivamente, exponiendo las semillas (Raju y Ezradanam, 2002), que generalmente son de dos a tres por fruto (esporádicamente se encuentran frutos con cuatro semillas). Las semillas son de color negro y están compuestas por testa y almendra, de esta última se extrae el aceite.

De acuerdo con Jongschaap *et al.* (2007), la partición promedio de la biomasa aérea de una planta adulta de *J. curcas* L. es: 25 % corresponde a la biomasa de la madera en tallos y ramas, otro 25 % corresponde a la biomasa de pecíolos y hojas y 50 % corresponde a la biomasa del fruto. Este último está compuesto como sigue: 15 % corresponde a la biomasa de la cáscara y 35 % a la semilla, la cual se divide en 12 % en testa y 23 % en la almendra, que finalmente está integrada por 10 % de gluten (torta) y 13 % de aceite.

### **5.3.2. USOS DE LA PLANTA Y SUS PRODUCTOS**

Tanto en su centro de origen como en el resto de los países donde fue introducida, las poblaciones de *J. curcas* L. se localizan realizando funciones como cerco vivo para delimitar propiedades (Schmook y Serralta-Peraza, 1997; Henning, 2003; UNDESA, 2007), en su hábitat natural (Aponte, 1978; Cano, 1992; Raju y Ezradanam, 2002), como barrera viva contra la erosión hídrica y eólica del suelo (Henning, 2003; UNDESA, 2007), reforestación (Euler y Gorriz, 2004) y recientemente como

monocultivo para la producción de biodiésel (Heller, 1996; Henning, 2003; ICRISAT, 2007; Achten *et al.*, 2008).

El principal producto de *J. curcas* L. es el aceite que se extrae de la semilla. En África y otros países en vías de desarrollo se usa directamente para la producción de jabones y en cera para velas, como combustible para lámparas de iluminación doméstica y en estufas para cocinar como sustituto del keroseno y leña, y en motores de combustión interna generadores de electricidad para uso público a nivel de comunidad (DoveBiotech, 2010). Sin embargo, según Henning (2003), bajo las condiciones de marginalidad de África y el sistema de producción a nivel de traspatio y como cerca viva de *J. curcas* L., el uso más viable y económicamente redituable del aceite es la elaboración de jabones. Heller (1996) indica que el aceite producido en Cabo Verde durante la primera mitad del siglo pasado era exportado a Lisboa, Portugal y Marsella, Francia para la elaboración de jabones.

Recientemente el objetivo principal de las plantaciones de *J. curcas* L. es la producción de aceite para producir biodiésel, lo cual se logra a través del proceso de transesterificación. No se recomienda el uso directo del aceite en motores de combustión interna ya que genera hollín que después de 300 litros de consumo descomponen el motor. El biodiésel de *J. curcas* L. generalmente se usa mezclado con el diesel fósil en proporciones de 20:80, 10:90 y 5:95, donde el primer número corresponde al porcentaje de biodiésel y el segundo al diesel fósil.

Después de la extracción del aceite, los subproductos del fruto (cáscara, testa y pasta) de *J. curcas* L. no tóxica pueden ser utilizados para la elaboración de fertilizante orgánico, alimento para animales y/o biocombustible sólido. El glicerol, subproducto del

proceso de transesterificación para la obtención del biodiésel, es usado en la industria de cosméticos (Singh *et al.*, 2008; Sharma *et al.*, 2009). De hecho, Galvao *et al.* (2008) concluyen que para incrementar la rentabilidad del biodiésel de *J. curcas* L. y contribuir con la producción de alimentos, es indispensable el uso de los subproductos.

Para el caso de los materiales de *J. curcas* L. tóxica, es posible producir biopesticidas para uso en la agricultura y elaborar productos farmacéuticos y medicina tradicional (Schmook y Serralta-Peraza, 1997). Gush y Hallowes (2007) ofrecen una amplia revisión de los usos medicinales y como pesticidas de *J. curcas* L.

### **5.3.3. GENOTIPOS DE *JATROPHA CURCAS* L. Y MEJORAMIENTO GENÉTICO**

Como se mencionó anteriormente, *J. curcas* L. es una planta semidomesticada de la cual, a la fecha, no se conocen con claridad sus requerimientos agronómicos, ni el efecto que el medio ambiente pueda presentar en su desempeño como cultivo energético (Achten *et al.*, 2008). Actualmente en la literatura no se reportan genotipos mejorados para producir aceite, sólo se reportan poblaciones de plantas o ecotipos, que pueden ser tóxicas o no tóxicas dependiendo del contenido de ésteres de forbol. A la fecha, México es el único país donde se reportan poblaciones no tóxicas (Makkar *et al.*, 1998a; Makkar *et al.*, 1998b; Martínez, 2007; Basha *et al.*, 2009).

La mayor parte de la literatura sobre la variabilidad genética de accesiones de *J. curcas* L. colectadas fuera de su lugar de origen indica que presenta estrecha variabilidad genética y amplia variabilidad fenotípica (Sukarin *et al.*, 1987; Ginwal *et al.*, 2004; Basha y Sujatha, 2007; Kaushik *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2008; Basha *et al.*, 2009; Basha y Sujatha, 2009; Popluechai *et al.*, 2009). Sólo el trabajo de Ranade *et al.* (2008)

reporta variabilidad genética entre poblaciones de plantas provenientes de la India, mientras que Pant *et al.* (2006) y Kaushik *et al.* (2007) reportan variaciones fenotípicas debidas a efecto ambiental. Según Pecina-Quintero *et al.* (2011), 88 accesiones colectadas en Chiapas, México, presentaron amplia variabilidad genética. Sin embargo, Zavala *et al.* (2010) reportan que en un estudio realizado en Veracruz, usando marcadores de microsatélite, encontraron una variabilidad genética de *J. curcas* L. extremadamente baja.

#### **5.3.4. REQUERIMIENTOS AGROECOLÓGICOS DE *JATROPHA CURCAS* L.**

El Cuadro 1 muestra, a manera de resumen, los requerimientos de temperatura, altura sobre el nivel del mar, pendiente, profundidad, textura y pH del suelo, de *J. curcas* L. extraídos de diversas fuentes.

Cuadro 1.- Requerimientos agroecológicos de *Jatropha curcas* L.

Requerimiento	Subóptima	Óptima	Subóptima
Temperatura media anual (°C)	<20	20-28	>28
Temperatura base (°C)		12	
Precipitación pluvial (mm)	<900	900-1800	>1800
Altura sobre el nivel del mar (m)	-	0-900	>900
Pendiente (%)	<3	3-15	>15
Suelos	Profundidad	Somero	Somero
	Textura	Arcillosa, pesada	Franca, media
	pH	<6	6-8
			>8

Fuente: Gush y Hallowes (2007), Achten (2008), Brittain y Litaladio (2010), Franken y Nielsen (2010).

#### **5.3.4.1. REQUERIMIENTOS EDAFOCLIMÁTICOS Y LABORES CULTURALES**

Para máximo rendimiento de semilla *J. curcas* L. requiere suelo fértil y bien drenado (Gush y Hallowes, 2007; Achten *et al.*, 2008), cantidades suficientes de agua (Gush,



2008; Abou y Atta, 2009; CVTTS-FPS, 2009), nutrientes (Reinhardt *et al.*, 2007), control de plagas, enfermedades y malezas, mano de obra para manejo de la plantación y la cosecha manual, similares a los requerimientos de otros cultivos de interés económico (Heller, 1996; Ouwens, 2007), y en situaciones de estrés reduce significativamente su productividad.

### 5.3.4.2. NECESIDADES Y USO DE AGUA

Como se muestra en el Cuadro 2, a medida que se incrementa la edad de la planta esta transpira mayor cantidad de agua, principalmente con alta densidad de plantación para alto rendimiento de semilla, alcanzando cantidades significativas similares y/o mayores a las utilizadas por cultivos como maíz y soya.

Cuadro 2.- Transpiración anual de plantaciones de *Jatropha curcas* L. (mm año<sup>-1</sup>) con diferentes densidades de plantas.

Densidad de plantas (Plantas ha <sup>-1</sup> )	Edad de la planta		
	2 años	4 años	12 años
740	23	147	362
1600	50	317	781
2500	78	496	1221

Fuente: Elaborado con datos de Gush (2008) y Abou y Atta (2009).

Hallowes (2007) relacionó la precipitación pluvial anual y el rendimiento de semilla de *J. curcas* L., con lo cual desarrolló los valores que se presentan en el Cuadro 3, para modelar áreas adecuadas para la producción de esta oleaginosa. Con el criterio de “no apto”, la planta produce semilla en cantidades extremadamente bajas, solo para sobrevivir; por el contrario, con el criterio “óptimo”, la planta expresa su máximo potencial de producción. Nótese que la lámina de agua transpirada por plantaciones de

4 y 12 años de edad con alta densidad de plantación mostrada en el Cuadro 1 está dentro del intervalo de los criterios “adecuado” y “óptimo”.

Cuadro 3.- Criterios desarrollados por Hallowes (2007) para modelar áreas adecuadas para la producción de semilla de *Jatropha curcas* L.

Precipitación pluvial	Condición			
	no apto	Marginal	Adecuado	óptimo
mm año <sup>-1</sup>	<300	300 a 600	600 a 900	900 a 1200

En el Cuadro 4 se muestra ligero incremento en el rendimiento de semilla de *J. curcas* L. con mayor cantidad de agua recibida; sin embargo, aunque esta no es representativa de condiciones marginales, sino más bien de condiciones adecuadas, en todos los casos el rendimiento de semilla es considerado marginal.

Cuadro 4.- Lámina de agua y rendimiento promedio de semilla de árboles de *Jatropha curcas* L. de dos años de edad en Sinaloa, México.

Sistema	Precipitación pluvial (mm)	Rendimiento de semilla (kg ha <sup>-1</sup> )
Temporal +	691+0 = 691	489
Temporal + riego por gravedad	691+218 = 909	652
Temporal + riego por goteo	691+120 = 811	724

Fuente: CVTTS-FPS (2009)

Un estudio realizado por Abou y Atta (2009) muestra que tanto el déficit como el exceso de humedad reducen el rendimiento de semilla de *J. curcas* L. Cuando a la plantación se le aplicó el 100 % del agua evapotranspirada potencialmente (ETp), es decir, situación sin exceso o déficit de humedad, el rendimiento de semilla fue el máximo, y se redujo exponencialmente en 93 % y 262 % con 25 % y 50 % de déficit de humedad, respectivamente. Cuando se aplicó 25 % más de humedad, el rendimiento de semilla se redujo en 105 %. Estos resultados concuerdan con algunos autores que indican que los suelos arcillosos mal drenados con exceso de humedad no son adecuados para *J.*

*curcas* L., pero están en desacuerdo con las expectativas sobre *J. curcas* L. donde se indica que es una especie tolerante al estrés hídrico. Abou y Atta (2009) también indican que la fracción de aceite en el fruto de plantaciones sin estrés de humedad fue el máximo de 29.9 % y se redujo a 24.5 % y 25 % con 50 % de deficiencia de humedad y 25 % de exceso de humedad, respectivamente. En resumen, se puede decir que para la obtención de alto rendimiento de semilla, *J. curcas* L. requiere una lámina de agua similar o mayor que la requerida por la mayoría de los cultivos alimenticios, y bajo condiciones de estrés por déficit o exceso de humedad, el rendimiento de semilla y fracción de aceite producido por unidad de superficie se reduce drásticamente. De acuerdo con lo anterior, en terrenos marginales por déficit o exceso de humedad el rendimiento de semilla y aceite de *J. curcas* L. también será marginal, a menos que se corrijan dichas limitantes.

#### **5.3.4.3. NECESIDADES NUTRIMENTALES**

*Jatropha curcas* L. es susceptible al exceso de humedad y baja aireación del suelo, por lo que en suelos hidromórficos y suelos arcillosos mal drenados, y en terrenos planos sin pendiente, su desarrollo y rendimiento de semilla es muy limitado. Por el contrario, se desarrolla mejor y ofrece su máximo rendimiento de semilla y aceite en suelos profundos, fértiles, de textura media y ligera, bien drenados, con pH en un intervalo de 6 a 8 (Gush y Hallowes, 2007; Hallowes, 2007; Ouwens *et al.*, 2007). En suelos arcillosos y fértiles como los vertisoles, el rendimiento de semilla de *J. curcas* L. puede ser alto, siempre y cuando el suelo presente cierto grado de pendiente (preferentemente entre 3 % y 8 %), sin encharcamiento o exceso de agua.

Jongschaap *et al.* (2007) y Ouwens (2007) indican que el rendimiento de semilla de *J. curcas* L. responde a la fertilización orgánica y mineral aplicada al suelo. En terrenos marginales el rendimiento de semilla se puede incrementar en más de 100 % con la aplicación de 3 t ha<sup>-1</sup> de pasta de *J. curcas* L. (la pasta residual después de extraer el aceite) la cual, de acuerdo con los datos presentados por Jongschaap *et al.* (2007), contiene en promedio 5.04 % de nitrógeno, 1.82 % de fósforo y 1.38 % de potasio, que equivalen a la aplicación de 151-55-42 kg ha<sup>-1</sup> de NPK, respectivamente, además de considerables cantidades de nutrientes secundarios. Estos autores a partir de su revisión, también encontraron que para plantas de dos y medio años de edad con una densidad de población de 1667 plantas ha<sup>-1</sup>, la dosis óptima de fertilización fue 45-30-00 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de NPK, con incremento en rendimiento de semilla de aproximadamente 100 %.

Con base en la remoción de nutrientes, Reinhardt *et al.* (2007) presentan las tasas de fertilización mineral al suelo mostradas en el Cuadro 5 para tres escenarios de producción.

Cuadro 5.- Tasas de fertilización mineral de *Jatropha curcas* L. con base en la remoción de nutrientes.

Escenarios de producción	Tasa de fertilización (kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Actual	48	19	53
Adecuado	81	31	89
Óptimo	141	56	139

Por su parte, Franken y Nielsen (2010) reportan la evolución de la tasa de fertilización con macro nutrientes para *J. curcas* L. durante los primeros cuatro años a partir del establecimiento de la plantación, como se muestra en el Cuadro 6.

De acuerdo con lo anterior y como lo mencionan Brittain y Lualadio (2010), *J. curcas* L. puede sobrevivir en terrenos marginales infértiles, sin embargo, para obtener alto rendimiento de semilla y aceite, es necesario aplicar adecuadas cantidades de fertilizantes.

Cuadro 6.- Evolución de la tasa de fertilización recomendada para *Jatropha curcas* L.

Nutrientes	Tasa de fertilización (kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )				Total
	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	
N	23	34	69	103	229
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7	11	21	32	71
K <sub>2</sub> O	34	50	101	151	336

Fuente: Franken y Nielsen (2010).

#### 5.3.4.4. CONTROL DE MALEZAS, PLAGAS Y ENFERMEDADES

Al igual que cualquier otro cultivo de interés económico, para evitar la reducción del rendimiento debido a la competencia de malezas por agua, nutrientes y luz, es necesario que la plantación de *J. curcas* L. se encuentre libre de malezas, por lo que dependiendo de la zona, es necesario realizar de dos a tres limpiezas por año (Brittain y Lualadio, 2010; Franken y Nielsen, 2010).

Con el argumento de que *J. curcas* L. es tóxica, se ha desarrollado el mito de que es resistente a plagas y enfermedades; sin embargo, Brittain y Lualadio (2010) y Franken y Nielsen (2010), mencionan que esto solo se aplica a árboles maduros con más de 15 años de edad y aislados. En plantaciones comerciales en monocultivo, *J. curcas* L. es atacada por una amplia gama de plagas y enfermedades fungosas y bacterianas similares a las que atacan a la mayoría de los cultivos alimenticios (Héller, 1996; CVTTS-FPS, 2009; Brittain y Lualadio, 2010; Franken y Nielsen, 2010), por lo que, para mantener alto el rendimiento de semilla, es necesario controlar los problemas

fitosanitarios en forma similar al control aplicado a cualquier otro cultivo de interés económico.

### 5.3.4.5. RENDIMIENTO DE SEMILLA, ACEITE Y COPRODUCTOS

Con base en la revisión del rendimiento de semilla y las condiciones edáficas y climáticas que originaron el rendimiento presentado en varios trabajos (Hallowes, 2007; Achten, 2008; Brittain y Litaladio, 2010; Franken y Nielsen, 2010), se establecieron los rendimientos de semilla para plantaciones de *J. curcas* L. de cinco años de edad (rendimiento estabilizado) para las diferentes condiciones de fertilidad del suelo y disponibilidad de agua que se muestran en el Cuadro 7. Como se observa, el rendimiento de semilla más alto se obtuvo en zonas de adecuada disponibilidad de agua de lluvia y suelos con alta fertilidad. El rendimiento se abate en diferentes magnitudes a medida que se presentan condiciones de déficit o exceso de humedad en suelos de mediana y baja fertilidad.

Cuadro 7.- Rendimiento de semilla de *Jatropha curcas* L. esperado a los cinco años de edad bajo diferentes escenarios de fertilidad del suelo y disponibilidad de agua de lluvia.

Fertilidad del suelo	Disponibilidad de lluvia anual en mm		
	<i>Optima</i> (De 1000 a 2000)	<i>Regular</i> (De 600 a 1000 ó de 2000 a 2500)	<i>Deficiente</i> (Menor de 600 ó Mayor de 2500)
Alta	6,000	4,000	1,500
Media	3,000	2,000	1,000
Baja	1,000	500	250

Durante los primeros cuatro años de la plantación el rendimiento potencial de semilla por unidad de superficie se incrementa paulatinamente; en los primeros dos años

representa entre el 20 % y 30 % del rendimiento de semilla máximo obtenido a los cinco años de edad, mientras que el rendimiento obtenido de los tres a los cuatro años de la plantación representa entre el 60 % y 70 % del máximo.

Los productos secundarios o coproductos (cáscara, pasta y testa) representan entre el 70 % y 80 % de la biomasa del fruto (Jongschaap *et al.*, 2007). La cáscara es importante como materia prima para producir biogás o biocombustible sólido, mientras que la pasta obtenida del proceso de prensado para extraer el aceite es importante como alimento para ganado o como materia prima para elaborar biofertilizantes orgánicos (en el caso de la *J. curcas* L. tóxica). Finalmente, la glicerina obtenida del proceso de transesterificación puede utilizarse para alimentar ganado vacuno o en la industria de cosméticos.

### **5.3.5. ESTADÍSTICAS GENERALES PARA CARACTERIZAR LA PRODUCCIÓN Y COPRODUCTOS DE *JATROPHA. CURCAS* L.**

En el siguiente tema se revisan algunas estadísticas relativas al cultivo de *J. curcas* L., donde se analiza su eficiencia económica mediante los costos de producción y la relación beneficio-costos, y su eficiencia energética usando un análisis del ciclo de vida.

#### **5.3.5.1. COSTO DE PRODUCCIÓN Y RELACIÓN BENEFICIO/COSTO**

En México, el biodiésel de *J. curcas* L. actualmente no es redituable debido principalmente a la baja producción unitaria de semilla y altos costos de producción del aceite y su transformación a biodiésel (SENER, 2006; Probst, 2007). En el Cuadro 8 se muestran los costos de producción y la relación beneficio/costo de *J. curcas* L., calculados con los precios de los insumos prevaletentes en el estado de Veracruz

durante el año 2011 y el rendimiento de semilla obtenido bajo las condiciones óptimas del Cuadro 7.

En el Cuadro 8 se observa que en el mejor de los casos con alto rendimiento de semilla en suelos fértiles, probablemente de uso agrícola, el rendimiento y los costos de establecimiento, producción y mantenimiento de la plantación no permiten obtener rentabilidad del cultivo, considerando un precio en México del biodiésel de *J. curcas* L. de entre 8.55 y 10.95 pesos, y un precio del diesel fósil de PEMEX de 4.65 pesos. Por lo anterior, sería necesaria la intervención del gobierno para aplicar subsidios, como se maneja en otros países como E.U.A. en la producción de etanol a partir de maíz.

Cuadro 8.- Relación beneficio/costo (B/C) en la producción de semilla de *Jatropha curcas* L.

Concepto	Costos de establecimiento y producción				
	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Establecimiento de plantación (\$ ha <sup>-1</sup> )	17,460	-----	-----	-----	-----
Costo de producción y mantenimiento (\$ha <sup>-1</sup> )	-----	7,095	7,425	7,860	8,175
Rendimiento de semilla (t ha <sup>-1</sup> )	0.72	1.44	3.0	4.2	6.00
Precio de venta semilla (\$ t <sup>-1</sup> )	1,200	1,305	1,425	1,575	1,740
Ingreso neto (\$ ha <sup>-1</sup> )	864	1,879	4,275	6,615	10,440
Relación B/C	0.05	0.26	0.56	0.84	1.28

Relación B/C acumulada en los cinco años: 48,015/24,073 = 0.50

### 5.3.5.2. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL BIODIÉSEL DE *JATROPHA CURCAS* L.

Según la literatura internacional, el retorno energético del biodiésel de *J. curcas* L. varía entre 0.5 y 2.0, lo cual lo ubica entre los más bajos, y en el sector transportes genera emisiones de GEI similares al diesel fósil (Reinhardt *et al.*, 2007; Whitaker y Heath, 2009).



Uresti-Gil *et al.* (2010) realizaron una evaluación preliminar del ciclo de vida del biodiésel de *J. curcas* L. para las condiciones del sureste de México, simulando tres escenarios de rendimiento. Como se observa en el Cuadro 9, el Coeficiente de Energía Neta (CEN) y el Rendimiento Unitario de Energía Neta (RUEN) se incrementaron a medida que se incrementó el nivel de producción. En términos de emisión de GEI, la cantidad neta emitida y la intensidad de emisión se redujeron a medida que se incrementó el nivel de producción. Los valores de CEN, RUEN y la reducción en la emisión de GEI obtenidos con el nivel de producción de 3.0 t ha<sup>-1</sup> son similares a los valores típicos previamente reportados para el biodiésel de *J. curcas* L. (Reinhardt *et al.*, 2007; Whitaker y Heath, 2009), mientras que los valores de estas variables obtenidos con productividad de semilla de 6.0 y 12.0 t ha<sup>-1</sup> son valores mayores que no se encontraron reportados en la literatura, debido muy probablemente a que a nivel global, aún no es posible obtener en plantaciones a gran escala rendimientos de semilla de 6.0 y 12 t ha<sup>-1</sup>. Sin embargo, los resultados preliminares aquí reportados ponen de manifiesto que con rendimiento unitario de semilla de *J. curcas* L. mayor al rendimiento actual (menor a 3 t ha<sup>-1</sup>), puede mejorar el retorno energético y la reducción de GEI.

El Cuadro 10 muestra que con los niveles de productividad de 3.0 y 6.0 t ha<sup>-1</sup>, la emisión de CO<sub>2</sub>-eq fue mayor durante el proceso de producción de la semilla de *J. curcas* L., que durante el proceso industrial para transformar el aceite en biodiesel, mientras que con el nivel de producción de 12.0 t ha<sup>-1</sup>, la mayor proporción de CO<sub>2</sub>-eq emitido fue durante el proceso industrial. A medida que se incrementó el rendimiento unitario de semilla de *J. curcas* L., la energía utilizada en el proceso para producir

biodiésel se redujo. Así mismo, a medida que se incrementó el rendimiento de semilla, la fracción de energía utilizada en el cultivo de *J. curcas* L. se redujo y en forma proporcional se incrementó la energía utilizada en la biorefinería para transformar el aceite en biodiésel. Finalmente, en el Cuadro 10 también se observa que de toda la energía producida, el biodiésel produjo el 91 %, mientras que los productos secundarios produjeron el 9 % restante.

Cuadro 9.- Resultados de la evaluación del ciclo de vida del biodiésel de *Jatropha curcas* L. bajo las condiciones del Sureste de México. Biorefinería con capacidad para producir 50 millones de litros anuales de biodiésel.

Tratamientos Rendimiento de semilla ( t ha <sup>-1</sup> )	Energía		Emisión de GEI		
	CEN (A dimensional)	RUEN (MJ ha <sup>-1</sup> )	Netas del ciclo (t CO <sub>2</sub> -eq)	Intensidad (g CO <sub>2</sub> -eq MJ <sup>-1</sup> )	Reducción VS diesel fósil (%)
3.0	1.72	21,043	90,941	45.6	55
6.0	2.44	59,215	52,021	26.1	74
12.0	3.08	135,561	32,561	16.3	84

Fuente: Uresti-Gil *et al.* (2010).

Cuadro 10.- Partición de emisiones de GEI y partición del uso y producción de energía.

Tratamientos Rendimiento de semilla ( t ha <sup>-1</sup> )	Partición de emisiones de CO <sub>2</sub> -eq		Partición de energía utilizada			Partición de energía obtenida	
	Cultivo (%)	Refinería (%)	Total (TJ)	Cultivo (%)	Refinería (%)	Biodiésel (%)	Torta (%)
3.0	72	28	1,278	59	41	91	9
6.0	57	43	902	42	58	91	9
12.0	42	58	715	26	74	91	9

Fuente: Uresti-Gil *et al.* (2010).

#### 5.4. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Un Sistema de Información Geográfico (SIG) es una poderosa tecnología de mapeo computacional que permite ingresar, almacenar, integrar, manejar y mostrar información integrando datos geográficos (espaciales) con datos no geográficos

(Ventura y Kim, 1993; Tsihrintzis *et al.*, 1996; Simms, 2002), procesando y mostrando operaciones que produzcan nuevos mapas que permitan realizar un análisis y/o un modelaje (Antenucci *et al.*, 1991; Levine *et al.*, 1993); esto se hace mediante la sobreposición de mapas almacenados en un sistema de coordenadas común, permitiendo verlos simultáneamente y entender mejor las relaciones espaciales entre estos (Vine *et al.*, 1997).

En los SIG existen dos estructuras básicas: vectorial y raster. La estructura de vectores utiliza (en coordenadas x, y) segmentos de puntos o líneas que representan objetos espacialmente explícitos como puntos, líneas o polígonos. La estructura raster subdivide el área en una red de celdas (filas y columnas), y estas celdas son usadas para representar puntos, líneas o polígonos. Generalmente la estructura vectorial es usada para inventarios, consultas descriptivas, gestión de datos espaciales y mapas. La estructura raster es usada para análisis prescriptivos, análisis espaciales y modelaje, en particular en aquellos trabajos relacionados con recursos naturales (Berry, 1993; Vine *et al.*, 1997; Afzal y Sibasaki, 2000).

Para Berry (1993) un SIG debe ser capaz de: (1) crear una abstracción digital del mundo real; (2) manejar efectivamente esa información; (3) proporcionar nuevos conocimientos sobre las relaciones de, o entre las variables espaciales; (4) para crear resúmenes de estas relaciones.

Las aplicaciones de SIG proporcionan una visión de la calidad del entorno físico, así como la sostenibilidad de un recurso (Simms, 2002). Dentro de los agroecosistemas los SIG son de gran utilidad, pues proveen un interfaz relacionando los procesos hidrológicos y biológicos con su estructura espacial, además de identificar patrones

espaciales que controlan el funcionamiento de un área (Afzal y Sibasaki, 2000; Bel-Hassen y Prouz, 2001). El amplio uso de SIG y el desarrollo de más poderosos métodos estadísticos (Engler *et al.*, 2004; Cabeza *et al.*, 2004; Lehmann *et al.*, 2002) han permitido a los investigadores desarrollar nuevas técnicas para conocer las preferencias de edafoclimáticas de distintas especies (Gibson *et al.*, 2004; Jeganathan *et al.*, 2004; Johnson *et al.*, 2004; Wang y Wang, 2007).

La utilización de un SIG como parte de un proceso de decisión presenta las siguientes ventajas: (1) provee la capacidad de integrar, adaptar, organizar y manipular información espacial de diferentes fuentes; (2) la información puede ser almacenada, actualizada, extraída y mapeada eficientemente; (3) permiten análisis rápidos y repetidos de modelos que pueden ser usados para ayudar al proceso de decisión (Simms, 2002).

Existen numerosos *softwares* de SIG desarrollados por universidades (IDRISI, Clark University), instituciones públicas (IRIS, INEGI) o empresas privadas (ArcGIS, ESRI), con distintas características y aplicaciones pero estructura y función similar.

### **5.5. MODELOS DE SIMULACIÓN**

Un modelo es una abstracción de la realidad (Galagovsky y Aduriz-Bravo, 2001), y como tal trata de representarla y sobre todo de predecirla. En los últimos años se han desarrollado diferentes modelos de simulación que pretenden hacer predicciones y probar hipótesis para solucionar problemas bajo una situación particular, como calcular la humedad del suelo (Narasimhan *et al.*, 2005), simular la dinámica de fertilizantes y pesticidas (Du *et al.*, 2006) y en general la relación entre los factores ambientales y la productividad (Adejuwon, 2004), con el fin de mejorarla (Williams *et al.*, 1996; Leiva,

2008), en especial enfocados al cambio climático (Afzal y Shibasaki, 2000). Analizando la respuesta del sistema en varios escenarios (Guzmán y Matamoros, 2004), permite orientar la toma de decisiones y reducir los costos de una investigación, lo cual resulta particularmente útil en países en desarrollo (Matthews y Stephen, 2002). La modelación puede entenderse como la aplicación de métodos predictivos para analizar problemas complejos del mundo (Hernández *et al.*, 2009). Por otra parte, la simulación es el resultado de aplicar el modelo bajo una condición particular, de manera que se pueda predecir el resultado de diferentes acciones, siendo validada posteriormente con información del mundo real (Matthews *et al.*, 2002). El uso de modelos de producción de cultivos generalmente requiere la integración de métodos numéricos y uso de computadoras.

Los modelos de simulación ayudan a la comprensión de las interacciones fisiológicas y ambientales, permite realizar la planeación del cultivo y así contribuir de manera significativa a la toma de decisiones; con algunos de estos es posible evaluar impactos ambientales y definir estrategias para reducirlos (Leiva, 2008; Carvalho-Lopes y Steidle-Neto, 2011).

En general, los principales objetivos de un modelo son: mejorar el entendimiento de un sistema o probar hipótesis, predecir el resultado de una combinación de situaciones en un sistema en un momento determinado, controlar el sistema estudiado y producir resultados anticipados (Bowen *et al.*, 1998). Por lo anterior, la modelación del crecimiento y producción de cultivos es una herramienta importante para la planeación del manejo sostenible (Bowen *et al.*, 1993). Krishna-Murthy (2003) divide los modelos de simulación según varios criterios como se muestra en el Cuadro 11.

Cuadro 11.- Clasificación de modelos de simulación por distintos criterios.

Tipos de modelo	Características
Modelos estadísticos	Expresan una relación entre el rendimiento y parámetros climáticos
Modelos mecánicos	Explican los mecanismos de acción entre clima y rendimiento
Modelos determinísticos	Tienen coeficientes definidos
Modelos estocásticos	Incluyen elementos probabilísticos
Modelos dinámicos	Incluyen el tiempo como variable
Modelos estáticos	No incluyen el tiempo como variable
Modelos basados en procesos	Representaciones matemáticas del mundo real, estiman la producción como función del suelo, clima y manejo
Modelos descriptivos	Consisten en ecuaciones que ayudan a determinar el rendimiento
Modelos explicativos	Una descripción cuantitativa de mecanismos y procesos cuantificadas por separado, integrándolos y teniendo como resultado el crecimiento de cultivo

Fuente: Krishna-Murthy (2003).

### 5.5.1. ESTRUCTURA GENERAL DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN

Los modelos deben incluir los efectos del clima, la disponibilidad de agua, el manejo de la fertilidad de los suelos y el comportamiento fisiológico de los cultivos (Thorp *et al.*, 2007; Leiva, 2008; Singh *et al.*, 2008; Richards *et al.*, 2008; Lenz-Wiedemann *et al.*, 2010). Con tales datos deben ser capaces de simular procesos biológicos generales, como fotosíntesis y absorción de nitrógeno, usando los parámetros fisiológicos de cada especie, para lograr estimativos de rendimiento que permitan evaluar y ajustar estrategias de manejo agronómico, en aras de un mejor aprovechamiento de los recursos (Keating *et al.*, 2003; Pereyra-Irujo y Aguirrezabar, 2007; Singh *et al.*, 2008; Ko *et al.*, 2009; Lenz-Widermann *et al.*, 2010). Por tanto, la técnica de modelación contribuye en forma importante al manejo de la agricultura acorde con la oferta ambiental y las posibilidades técnicas del cultivo (Sudduth *et al.*, 1998).

Algunos modelos están formados por la integración de varios modelos, sumando sus capacidades y logrando realizar evaluaciones que van más allá del rendimiento del cultivo (Neitsch, 2005; Carvalho-Lopes y Steidle-Neto, 2011). Otros han integrado SIG

para hacerlos espacialmente explícitos, logrando realizar zonificaciones de acuerdo al potencial productivo (Priya y Shibasaki, 2001; Price *et al.*, 2002; Tan y Shibasaki, 2003; Liu *et al.*, 2007; Liu, 2009; Evans *et al.*, 2010; Laux *et al.*, 2010; Carvalho-Lopes y Steidle-Neto, 2011).

La mayoría de los modelos de simulación utilizan los mismos parámetros fisiológicos de los cultivos con la finalidad de conocer cuánta radiación son capaces de interceptar, la eficiencia para transformarla a biomasa, las unidades calor necesarias para madurez, su forma de acumularlas, capacidad para absorber agua y nutrientes del suelo e índice de cosecha. Algunos además necesitan factores óptimos de crecimiento para calcular el estrés cuando las condiciones edafoclimáticas se alejan de estos.

Cuatro de los modelos de simulación basados en procesos más utilizados son Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC), Crop Grow (CROPGRO), Agricultural Production System Simulator (APSIM) y Soil Water Assessment Tool (SWAT). Estos modelos utilizan básicamente los siguientes parámetros fisiológicos de cultivos para calcular su rendimiento potencial: a) índice de área foliar (LAI); b) eficiencia en el uso de la radiación (RUE); c) temperatura base ( $T_b$ ); d) temperatura óptima ( $T_o$ ); e) índice de cosecha (HI); f) altura del dosel de la planta y g) profundidad de raíces (Sharpley y Williams, 1990; McCown, 1996; Neitsch *et al.*, 2005; Deligios, 2009).

### **5.5.2. USO DE MODELOS DE SIMULACIÓN**

Se han aplicado modelos de simulación basados en procesos en varias oleaginosas y para distintos fines, algunos de ellos con la finalidad de evaluar la relación entre la disponibilidad del agua y el desarrollo del cultivo. Mercau (2007) evaluó el desempeño del CROPGRO para soya, con énfasis en la demanda de agua y producción de

biomasa bajo condiciones limitantes de agua en las pampas argentinas, mientras que Putto (2009) lo usó para simular el rendimiento de cacahuate en zonas de Tailandia con distintos regímenes de lluvia. Sadras *et al.* (2003) usaron APSIM para comparar la cantidad de agua del suelo simulada con la medida en el cultivo de canola; Chauhan (2010), ocupando el mismo modelo, evaluó el potencial productivo y requerimientos de agua en una rotación de cultivos maíz-cacahuate en condiciones semiáridas con clima tropical de Australia. Ko *et al.* (2009) utilizaron el EPIC como un soporte para la toma de decisiones en irrigación de algodón en el sur de Texas, E.U.A., evaluando la relación entre el rendimiento y el uso de agua; de igual forma, Rinaldi (2001) lo usó para calendarizar las fechas de riego en girasol en el sur de Italia.

Otro aspecto importante es evaluar el impacto que tiene la actividad agrícola en el medio ambiente. En este tema, Anothai *et al.* (2009) realizaron una evaluación ambiental usando el CROPGRO, concluyendo que un reducido número de datos de campo pueden ser utilizados para estudios de este tipo. Malone *et al.* (2007) realizaron modificaciones al APSIM para calcular lixiviación de nitratos bajo condiciones de drenaje subterráneo artificial con y sin cultivo de trigo.

Debido a la problemática del cambio climático, también se han realizado simulaciones con el fin de predecir el rendimiento de cultivos básicos para la alimentación humana bajo las condiciones atmosféricas previstas Williams *et al.* (1992) adecuaron el EPIC para evaluar la respuesta en el rendimiento de maíz, soya, sorgo, trigo y heno como respuesta al cambio climático y a los efectos directos en el CO<sub>2</sub>, en los estados de Missouri, Iowa, Nebraska y Kansas, E.U.A., y posteriormente Williams *et al.* (1996) simularon el rendimiento de maíz y sorgo en condiciones de secano e irrigación,



tomando 20 años de información climática (1971-1990) en el este de Nebraska, y concluyeron que el EPIC es capaz de simular el rendimiento de cultivos bajo condiciones extremas.

Por lo general estos modelos son elaborados para una zona específica, sin embargo, es posible modificarlos para realizar trabajos en otras regiones. Adejuwon (2004) adecuó el EPIC con la finalidad de simular el rendimiento de cinco cultivos: maíz, mijo, sorgo, arroz y yuca en África del Oeste. Mientras que Licon-Santana *et al.* (2005) realizaron un trabajo de estimación del rendimiento de maíz (*Zea mays*) en Texcoco, Estado de México, su objetivo fue validar y calibrar el modelo EPIC para esta zona ajustando algunos parámetros fisiológicos (RUE, LAI y HI).

En el uso de modelos de simulación es necesario realizar una calibración y una posterior validación con datos medidos, debido a las variaciones espaciales, temporales y de variedad de cultivo. Para este fin se utilizan datos de rendimiento de cultivo, datos de estaciones hidrométricas y datos de estaciones de drenaje (Adejuwon, 2004; Licon-Santana *et al.*, 2005; Dogan *et al.*, 2007; Bathia *et al.*, 2008; Carvalho-Lopes y Steidle-Neto, 2011).

#### **5.6. EL MODELO SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL)**

El SWAT es un modelo matemático de simulación basado en procesos (Neitsch *et al.*, 2005; Ng *et al.*, 2010), espacial y temporalmente explícito (Narasimhan *et al.*, 2005; Neitsch *et al.*, 2005; Garg *et al.*, 2011), gracias a una versión con interfaz en SIG (Narasimhan *et al.*, 2005; Winchell *et al.*, 2007; Garg *et al.*, 2011), que trabaja a nivel de cuenca (Guzmán *et al.*, 2004; Narasimhan *et al.*, 2005; Neitsch *et al.*, 2005; Garg *et al.*, 2011). 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), permitiendo predecir el impacto de prácticas de manejo sobre los recursos naturales (Guzmán *et al.*, 2004; Neitsch *et al.*, 2005; Luo *et al.*, 2008; Garg *et al.*, 2011). Los mayores componentes del modelo son: a) clima; b) hidrología; c) erosión; d) temperatura del suelo; e) crecimiento de cultivos; f) nutrientes; g) plaguicidas; h) manejo; i) bacterias y patógenos (Arnold *et al.*, 1998; Narasimhan *et al.*, 2005; Neitsch *et al.*, 2005; Gassman *et al.*, 2007; Garg *et al.*, 2011).

Para la asignar parámetros que sean espacialmente explícitos, el SWAT divide las cuencas en subcuencas basado en la topografía, y estas posteriormente son divididas en Unidades de Respuesta Hidrológica (URH), que son áreas geográficas que pertenecen a la misma subcuenca y comparten tipo de suelo, uso actual del suelo y pertenecen a un mismo intervalo de pendiente (Guzmán *et al.*, 2004; Narasimhan *et al.*, 2005; Du *et al.*, 2006; Akhavan *et al.*, 2010; Garg *et al.*, 2011). El modelo SWAT calcula el rendimiento de cultivo basado en una simplificación del modelo EPIC (Narasimhan *et al.*, 2005; Neitsch *et al.*, 2005; Akhavan *et al.*, 2010). Utiliza un solo modelo para simular tanto cultivos anuales como perennes. El desarrollo fenológico está basado en el acumulamiento diario de unidades calor, y la biomasa acumulada está basada en la radiación interceptada por el área foliar y la eficiencia del cultivo en el uso de esta; el rendimiento está dado por la cantidad de esa biomasa que se destina al órgano de interés económico del cultivo, llamado índice de cosecha (HI) (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, los cuales reducen el rendimiento potencial (Luo *et al.*, 2008; Garg *et al.*, 2011). Por lo tanto, para hacer

estos cálculos el modelo requiere de una base de datos con los parámetros fisiológicos de cada cultivo, la cual heredó del EPIC (Luo *et al.*, 2008). La base de datos de la versión 2009 de ArcSWAT incluye 73 cultivos, además de ser posible añadir manualmente los parámetros de un nuevo cultivo para su simulación (Ng *et al.*, 2010).

Las variables de suelo son: a) textura, b) densidad aparente, c) cantidad de agua disponible, d) conductividad hidráulica saturada y e) albedo del suelo. Las variables climáticas que requiere el modelo son: a) precipitación pluvial, b) temperaturas máxima y mínima, c) velocidad del viento, e) humedad relativa y f) radiación solar (Guzmán *et al.*, 2004; Narasimhan *et al.*, 2005). El clima para cada subcuenca es asignado de la estación meteorológica más cercana (Narasimhan *et al.*, 2005).

La calibración y validación del SWAT se ha realizado comparando los resultados simulados del escurrimiento superficial, sedimentos y nutrientes, contra los medidos en las estaciones de salida de las cuencas (Garg *et al.*, 2001; Du *et al.*, 2006; Luo *et al.*, 2008; Akhavan *et al.*, 2010).

### **5.6.1. RESULTADOS OBTENIDOS CON SWAT**

Hasta el año 2007 se habían realizado más de 150 publicaciones utilizando el modelo SWAT según Gassman *et al.* (2007). Al ser un modelo versátil las aplicaciones han sido muy variadas. Ng *et al.* (2010) lo usaron para estimar el efecto potencial en la carga de nitratos fluviales, como resultado de sustituir los cultivos convencionales por *Miscanthus giganteus*, logrando simular el desarrollo del cultivo con razonable precisión y mostrando una reducción en las cargas de nitratos, que depende del porcentaje de cambio de uso del suelo y la cantidad de nitrógeno aplicado. De la misma forma, Akhavan *et al.* (2010) modelaron con SWAT la cantidad y dinámica de lixiviación del

nitrógeno en los cultivos de papa y trigo en la cuenca Hamadan-Bahar en Irán en el periodo de 1997-2008, las variaciones espaciales en el nitrógeno lixiviado fueron razonablemente aceptables.

A partir de la simulación es posible detectar áreas de oportunidad para implementar mejoras en el manejo. Garg *et al.* (2011) utilizaron el SWAT para medir la producción de agua en zonas agrícolas en Upper Bhima Catchment, India, y obtuvieron resultados que sugieren que suplementando la irrigación y mejorando las prácticas de manejo pueden mejorar la producción de agua.

Otra de las ventajas del SWAT es que es susceptible a ciertas modificaciones para adecuarlo a las condiciones de la zona en estudio. Du *et al.* (2006) evaluaron una versión modificada del SWAT (SWAT-M), específico para zonas con depresiones superficiales, simulando satisfactoriamente la dinámica de nitratos y atrazina, así como la producción de maíz y soya dentro de la cuenca Walnut Creek, E.U.A. Por su parte Luo *et al.* (2007) modificaron los parámetros para ajustarlos a las variedades locales de trigo y maíz; sin embargo, la comparación de resultados simulados con los observados mostraron resultados deficientes en el LAI debido a una simplificación del modelaje; en predicciones de rendimiento por índice de cosecha inadecuado, en estimaciones de agua en el suelo por cálculos erróneos en la evapotranspiración.

Lo anterior es un ejemplo de que la veracidad de lo simulado depende de la calidad de la información de entrada. Acorde con esto, Guzmán *et al.* (2004) aplicaron el modelo SWAT en la cuenca del Rio Chaguana en Ecuador para predecir caudales y sedimentos, pero obtuvieron resultados deficientes debido a la poca información meteorológica con la que contaban.

Sin embargo, existen formas de superar las limitantes en la falta de información, como lo muestran Narasimhan *et al.* (2005), quienes usaron el SWAT para desarrollar un registro del agua en el suelo para el estado de Texas, E.U.A., generando los datos climáticos con el WXGEN del EPIC (Sharpley y Williams, 1990), dada la falta de información medida, compararon los resultados con imágenes satelitales, obteniendo una amplia correlación.

## **6. MARCO CONCEPTUAL**

En este apartado se describe el bagaje conceptual con base en el cual se realizó este trabajo de tesis, y se trata de explicar de manera breve el concepto de sistema, agroecosistema e intensificación agroecológica

### **6.1. SISTEMA Y PENSAMIENTO SISTÉMICO**

Un sistema es un todo que está definido por la(s) función(es) que realiza como parte de uno o varios sistemas mayores. Consiste en dos o más partes esenciales que interaccionan entre sí actuando sobre el comportamiento o las propiedades del todo, permitiendo cumplir con dicha(s) función(es), de tal manera que al separar un sistema en sus partes este pierde sus propiedades, y el mejorar cada una de ellas por separado no significa mejorar el funcionamiento general del mismo (Ackoff, 2003). Sin embargo, Herrscher (2003) afirma que es el observador quien crea el sistema, al decidir considerar un grupo de elementos como integrantes de una categoría que tiene ciertas propiedades, y asevera que todos los sistemas forman parte de uno mayor y a su vez están formados por subsistemas, por lo que la selección de la unidad de estudio depende del análisis que se quiera hacer y a la conveniencia del analista.

El pensamiento sistémico comprende desde la parte filosófica de la teoría general de sistemas, hasta las más concretas aplicaciones cuantitativas a las organizaciones, las comunidades y los individuos, representando desde una forma de entender por qué pasan las cosas, hasta una nueva manera de relacionarnos con la realidad y actuar frente a ella (Herrscher, 2003). Se refiere a un nuevo modo de ver, hacer y estar en el mundo, una forma de ser, una manera de pensar a través del caos y la complejidad (Gharajedaghi, 2003).

Esta corriente, a diferencia del enfoque analítico que permaneció intacto por más de 400 años, ya pasó por tres generaciones de cambio: a) la primera trataba de la interdependencia en sistemas mecánicos; b) la segunda considera, además de la interdependencia, la autoorganización propia de los sistemas vivientes; y c) la tercera, además de las dos anteriores, toma en cuenta la libertad de elección en los sistemas socioculturales. En contraste con la visión mecánica y biológica que se ocupan de la eficiencia y del crecimiento, respectivamente, el concepto central de esta tercera generación es el desarrollo, que es una transformación intencional hacia niveles superiores de integración y diferenciación al mismo tiempo, un proceso de aprendizaje colectivo (Gharajedaghi, 2003).

## **6.2. AGROECOSISTEMAS**

Según Parra (1984) “La agricultura es un fenómeno complejo, en el que ocurren las diferentes formas de movimiento de la materia; es decir se presentan indisolublemente ligados los procesos físicos, químicos, biológicos y sociales, dejando ver, quizás de manera más clara que en ninguna otra actividad humana, que la realidad es una totalidad y como tal debe ser concebida”. Esta afirmación tiene un claro enfoque de pensamiento sistémico, además de ubicar a la agricultura como un sistema social.

Para tratar de explicar la complejidad de este fenómeno real surge el modelo conceptual del agroecosistema (AES). Vilaboa (2011) realizó una revisión de la evolución del concepto de agroecosistemas que se reporta en el Cuadro 12.

Cuadro 12.- Evolución histórica del concepto de agroecosistemas.

Harper	1974	Primera conceptualización
Hernández X.	1977	Ecosistemas modificados por el hombre para la utilización de los recursos naturales en los procesos de producción agrícola
Montaldo	1982	Acción en el ecosistema natural en forma sostenida para obtener productos agropecuarios
Odum	1985	Ecosistemas domesticados por el hombre con el fin de obtener productos y servicios
Hart	1985	Sistema formado por un grupo de especies de un ecosistema determinado que procesa entradas y producen salidas
Conway	1987	Ecosistema modificado por el hombre para obtención de productos
Marten y Rambo	1988	Complejo de recursos ambientales y otros factores que el hombre ha modificado para la producción agrícola
Hernández	1988	Actividad en la que el hombre maneja los recursos disponibles para producir los alimentos que satisfagan sus necesidades
Conway y McCracken	1990	Sistema ecológico modificado por el hombre para la producción de alimentos, fibras y otros productos agrícolas
Mariaca	1993	Un área de estudio con ciertas propiedades que la diferencian de otras por encima de lo que puede ser un ecosistema natural
Ruiz	1995	Unidad de estudio donde interactúan diversos factores para obtener productos que satisfagan las necesidades del hombre por un periodo de tiempo
Altieri	1995	El ente controlador modifica y define la producción ya que toma la decisión respecto a la finalidad del sistema
Martínez	1999	Modelo conceptual que prioriza el rol que desempeña el controlador en la toma de decisiones
Gliessman	2002	Ecosistemas transformados por el hombre para la producción de alimentos
Ruiz	2006	Sistema de relaciones entre los organismos coparticipes en la agricultura
Vilaboa <i>et al.</i>	2006	Sistema ecológico modificado por el hombre para la utilización de los recursos naturales en los procesos de producción agrícola
Martínez y Bustillos		El hombre es el sujeto-objeto de investigación en el AES
Vilaboa <i>et al.</i>	2009	Modelo abstracto y método de investigación que representa la unidad de estudio para interpretar la realidad agrícola
Bustillos <i>et al.</i>	2009	Unidades autopoiéticas donde existe un enganche estructural entre el hombre y el ambiente
Sandoval y Villanueva	2009	Unidad de estudio de los sistemas de producción agrícola en los que se ejerce el control humano en la interacción con los recursos naturales

Fuente: Vilaboa (2011).



### **6.3. SOSTENIBILIDAD E INTENSIFICACIÓN AGROECOLÓGICA**

La sostenibilidad puede definirse en términos elementales como:

$$V(O_{t+1}) \geq V(O_t)$$

Donde  $V$  es la función de valuación de salidas o productos representada por  $O$  y  $t$  es el tiempo. Entonces, un sistema es sostenible cuando el valor neto del producto obtenido no disminuye en el tiempo. Toda asignación de un valor específico entraña un fuerte componente subjetivo. A veces lo que interesa es la sostenibilidad del sistema en sí (como el caso de un ecosistema), mientras que en otras lo importante es mantener las salidas sin importar que el sistema se modifique, incluso llegando a propiciar dicha modificación de forma directa y consciente (agroecosistema) (Gallopín, 2003).

Para alcanzar la sostenibilidad dentro de un agroecosistema es importante reducir al máximo la dependencia de insumos externos; una forma de acercarse a esto es la intensificación agroecológica, que es una aproximación que busca cultivos que produzcan consistentemente cerca de sus potenciales de rendimiento genético bajo condiciones de riego, y cerca del rendimiento potencial limitado por agua en condiciones de secano, mientras que al mismo tiempo se provea a la protección de la calidad ambiental y la conservación de los recursos naturales (Cassman, 2007). Para esto un modelo de simulación de cultivos robusto y bien validado también provee una herramienta muy útil para la estimación de los rendimientos potenciales irrigados y limitados por agua (Yang, 2006).

### **6.4. ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA**

Los límites de la capacidad de producción de la tierra vienen determinados por el clima, las condiciones del suelo y la fisiografía, y por el uso y manejo aplicados a las tierras.

El manejo sostenible de los recursos de tierras requiere de políticas correctas y una planificación basada en el conocimiento de estos recursos, las demandas de los usos sobre esos recursos, y las interacciones entre las tierras y los usos de las mismas. (FAO, 1997).

EL concepto de zonificación según García (1979), es la selección de las mejores alternativas de uso de la tierra desde el punto de vista agroecológico y económico dentro de un proceso de planificación agrícola. Para la Comisión de Desarrollo y Medio Ambiente de América Latina y el Caribe (1991) la zonificación es un proceso ordenado de ocupación del espacio agrícola como manera de aprovechar racionalmente los recursos naturales existentes para alcanzar el desarrollo sustentable. La zonificación puede ser de dos tipos según Martínez (1984): agroclimática o agroecológica; la primera solo toma en cuenta el clima, mientras que la segunda incorpora factores edáficos.

El propósito de zonificar es separar áreas con similares potencialidades y limitaciones para el desarrollo delineando zonas agroecológicas que se definen como aquellas que tienen combinaciones similares de clima y características de suelo, y el mismo potencial biofísico para la producción agrícola (FAO, 1997).

Algunas de las ventajas de llevar a cabo una zonificación son el definir qué cultivos tienen mayor potencial de producción en una región determinada (Seeman *et al.*, 1979; Romo, 1985; Portilla-Pérez y Geissert-Kientz, 2006), y con esto programar las futuras tierras a cultivar y mejorar el uso de las ya cultivadas (Sánchez-Carrillo, 1999), así como definir épocas más adecuadas de siembra como forma de disminuir los efectos causados por la distribución de lluvias (Da Silva y Azevedo, 2000). La zonificación

permite realizar una explotación racional de acuerdo con la capacidad productiva de los recursos naturales, procurando el equilibrio y la conservación de ecosistemas y agroecosistemas (Rojas, 1985; SSSA, 1995).

La zonificación agroecológica puede ser de dos tipos: cualitativa o cuantitativa. La cualitativa es la que se realiza más comúnmente, y consiste en determinar los parámetros óptimos para el crecimiento de un cultivo: climáticos (temperatura, precipitación pluvial, etc.), edáficos (textura, pH, profundidad, capacidad de intercambio catiónico, etc.) y topográficos (pendiente y altura sobre el nivel del mar), para posteriormente, al sobreponer mapas del área con tales características, definir qué áreas son aptas para el desarrollo de dicho cultivo, y es comúnmente expresado en categorías (Domínguez-Castillo *et al.*, 1999; Tinoco *et al.*, 2002; Hernández-Cruz *et al.*, 2006; Ramalho-Filho, 2008; Hewson *et al.*, 2009; Wu *et al.*, 2010). En algunas de estas zonificaciones se incluye el uso actual del suelo (Ramalho-Filho, 2008) o la latitud (Hewson *et al.*, 2009) como factores limitantes.

En México este tipo de zonificación ha sido realizado por INIFAP para numerosos cultivos anexándola a sus libros técnicos (Tinoco *et al.*, 2002), incluyendo cultivos oleaginosos perennes como la palma de coco y palma africana (Domínguez-Castillo *et al.*, 1999; Hernández-Cruz *et al.*, 2006).

Para el cultivo de *J. curcas* L., Wu *et al.* (2010) realizaron una zonificación en el suroeste de China tomando en cuenta cuatro factores: temperatura, calidad del suelo, humedad del suelo y pendiente, dividiendo cada mapa en tres categorías: apto, moderadamente apto y no apto, para finalmente sobreponer los cuatro mapas y generar uno nuevo en donde se identifiquen las áreas aptas para este cultivo con base

en los factores edafoclimáticos mencionados. En México Solís-Guzmán *et al.* (2011) realizaron una zonificación del estado de Chiapas siguiendo la metodología de sobreposición de mapas.

La zonificación cuantitativa, en cambio, se realiza mediante el uso de modelos de simulación, ya sea estáticos (Price *et al.*, 2004; Evans *et al.*, 2010; Gómez *et al.*, 2010; Trabucco *et al.*, 2010) o dinámicos (Tan y Shibasaki, 2003; Liu *et al.*, 2007; Liu, 2009; Faramarzi *et al.*, 2010; Hughes *et al.*, 2010; Laux *et al.*, 2010; Srinivasan *et al.*, 2010).

Dentro de estas zonificaciones con modelos dinámicos se han realizado algunas utilizando el modelo EPIC complementado con SIG Priya y Shibasaki (2001) desarrollaron el Spatial-EPIC con el cual simularon el rendimiento de maíz, trigo y arroz en India. Posteriormente, Tan y Shibasaki (2003) usaron el mismo modelo modificado para simular arroz, maíz, trigo y soya a una escala global, tanto con datos climáticos del año 2000 como con datos pronosticados por el IPCC para los años 2010, 2020, 2030, 2040, 2050. Liu *et al.* (2007) realizaron otra versión a la que llamaron GEPIC, y con esta simularon el rendimiento mundial de trigo para el año 2000. Posteriormente, con el mismo modelo Liu (2010) estimó la productividad de agua mundial para tres cultivos: maíz, arroz y trigo. El propio SWAT ha sido utilizado con la finalidad de realizar zonificaciones; Srinivastavan *et al.* (2010) estimaron el rendimiento de *Panicum virgatum* L. para la cuenca alta del río Mississippi, E.U.A., comparando los resultados simulados con los medidos. Faramarzi *et al.* (2010) zonificaron Irán de acuerdo con la productividad de trigo y su capacidad en la producción de agua.

## 7. MATERIALES Y METODOS

### 7.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprendió la superficie total del estado de Veracruz de 7.18 millones de hectáreas. Este se localiza entre los 17° 00' y 22° 20' latitud norte y los 93° 35' y 98 ° 34' longitud oeste, a lo largo del Golfo de México. La Figura 1 muestra la localización del estado de Veracruz, mientras que las Figuras 2, 3, 4 y 5 muestran mapas con la distribución geográfica de los climas, suelos, topografía y uso del suelo, respectivamente. Esta información fue obtenida a partir de los mapas temáticos digitales escala 1:250000 adquiridos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

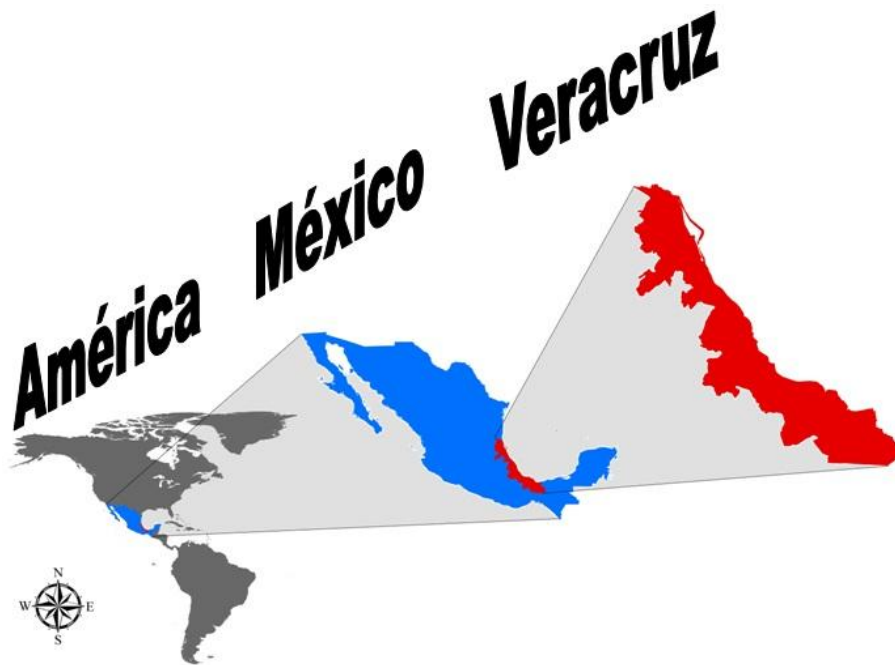


Figura 1.- Localización del estado de Veracruz.

La Figura 2 muestra que en la mayor parte de la superficie del estado de Veracruz (86 %) predominan los climas tropicales cálidos húmedos (Am y Af) y cálidos subhúmedos ( $Aw_0$ ,  $Aw_1$  y  $Aw_2$ ). En el 14 % restante de la superficie predominan los climas semicálido húmedo y subhúmedo, templado húmedo y subhúmedo, y clima árido y semiárido.

El 78 % de la superficie del estado es plano con pendientes menores del 8 %, mientras que el 16 % de la superficie presenta pendientes entre 8 % y 30 %, y el 6 % restante presenta pendientes mayores de 30 % en las zonas montañosas (Figura 3). Existe una estrecha relación entre el clima y la topografía del estado: en las zonas planas predominan los climas cálidos húmedos y subhúmedos, mientras que en las zonas de transición predominan los climas semicálidos húmedos y subhúmedos, y en las áreas montañosas los climas templados húmedos y subhúmedos (Figura 2).

El clima y la topografía se relacionan estrechamente con los tipos de suelos presentes en el estado, como se muestran en las Figuras 3 y 4. Los suelos arcillosos pesados como los vertisoles y gleysoles, que ocupan el 33 % del estado, se distribuyen principalmente en las partes norte y centro-sur del estado, en las zonas planas con pendientes menores de 8 %, bajo clima cálido subhúmedo principalmente. Los suelos francos, más fértiles, como los feozems, luvisoles, castañozems, etc., que ocupan otro 33 % de la superficie, se distribuyen en las zonas planas con pendientes menores de 15 % bajo climas cálidos húmedos y subhúmedos. Los suelos ácidos, como los acrisoles y andosoles que ocupan el 14 % de la superficie, se localizan en zonas de clima cálido húmedo y semicálido húmedo en zonas planas y de montaña. Los suelos arenosos ocupan el 12 % de la superficie y se localizan en dos áreas compactas en las

zonas norte y sur a lo largo de la costa, bajo clima cálido subhúmedo. Los suelos someros se localizan principalmente en las zonas montañosas.

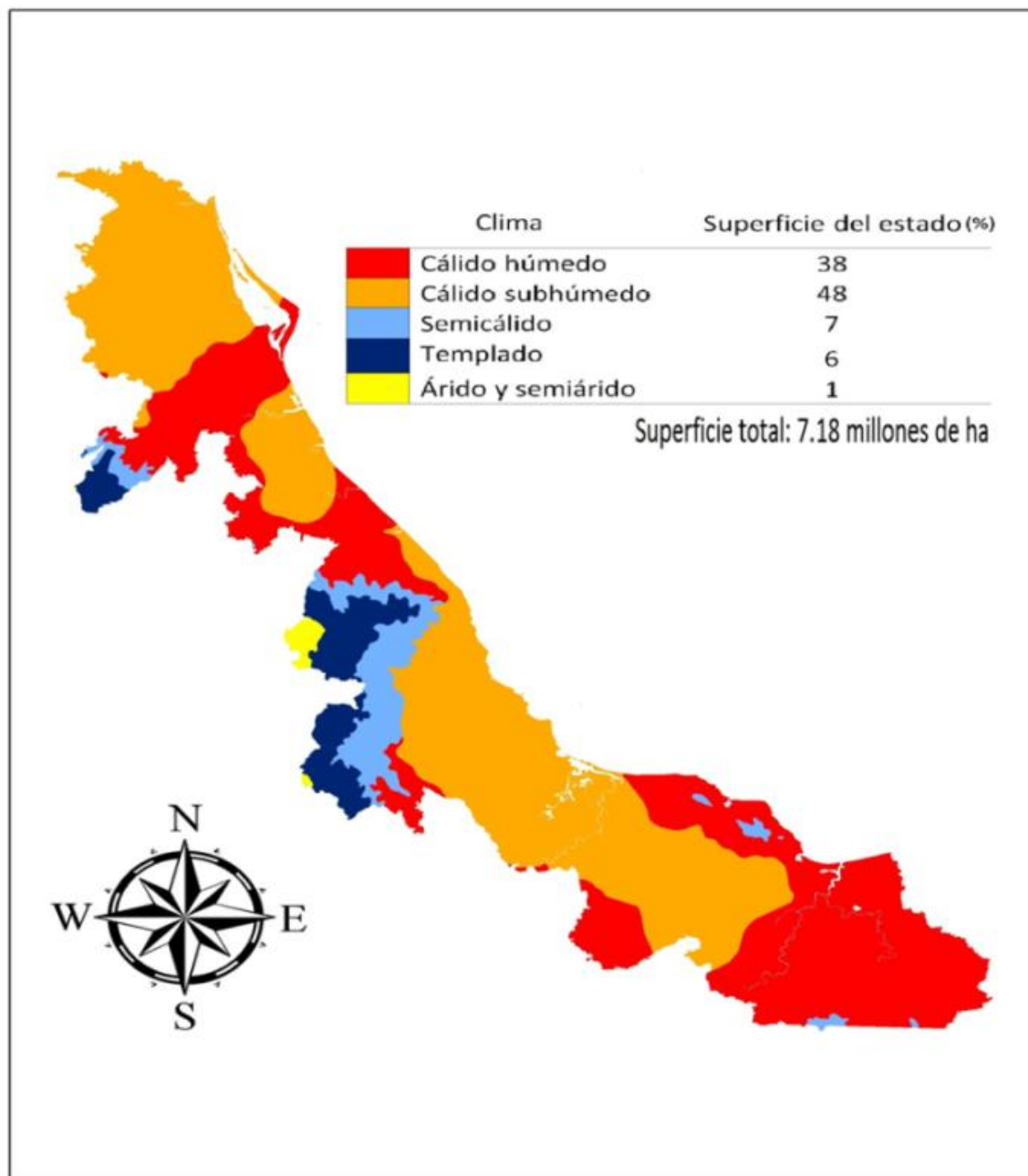


Figura 2.- Climas del estado de Veracruz.  
Fuente: Adaptado de CONABIO.

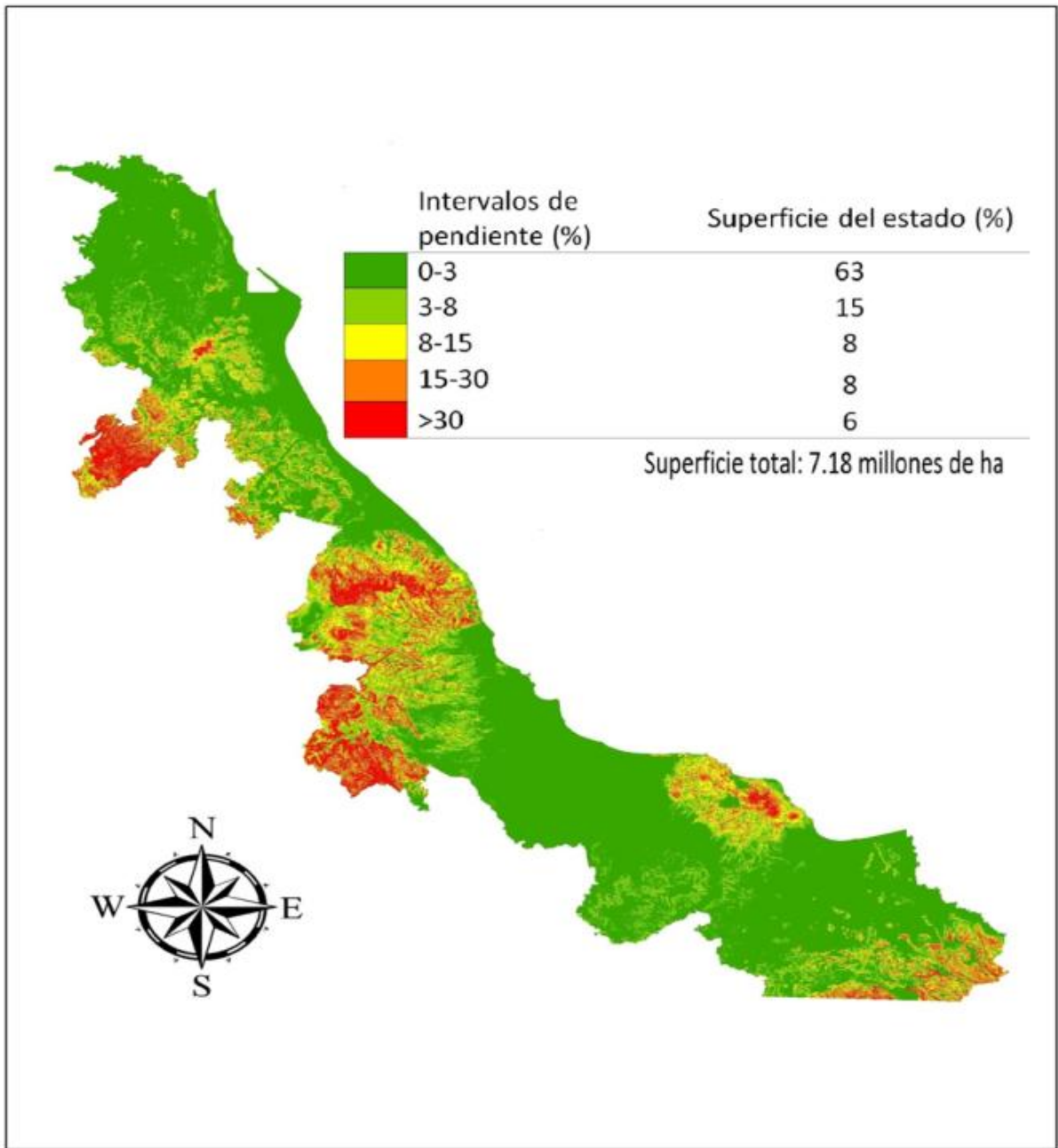


Figura 3.- Topografía y pendiente del terreno en el estado de Veracruz.  
Fuente: Adaptado de INEGI



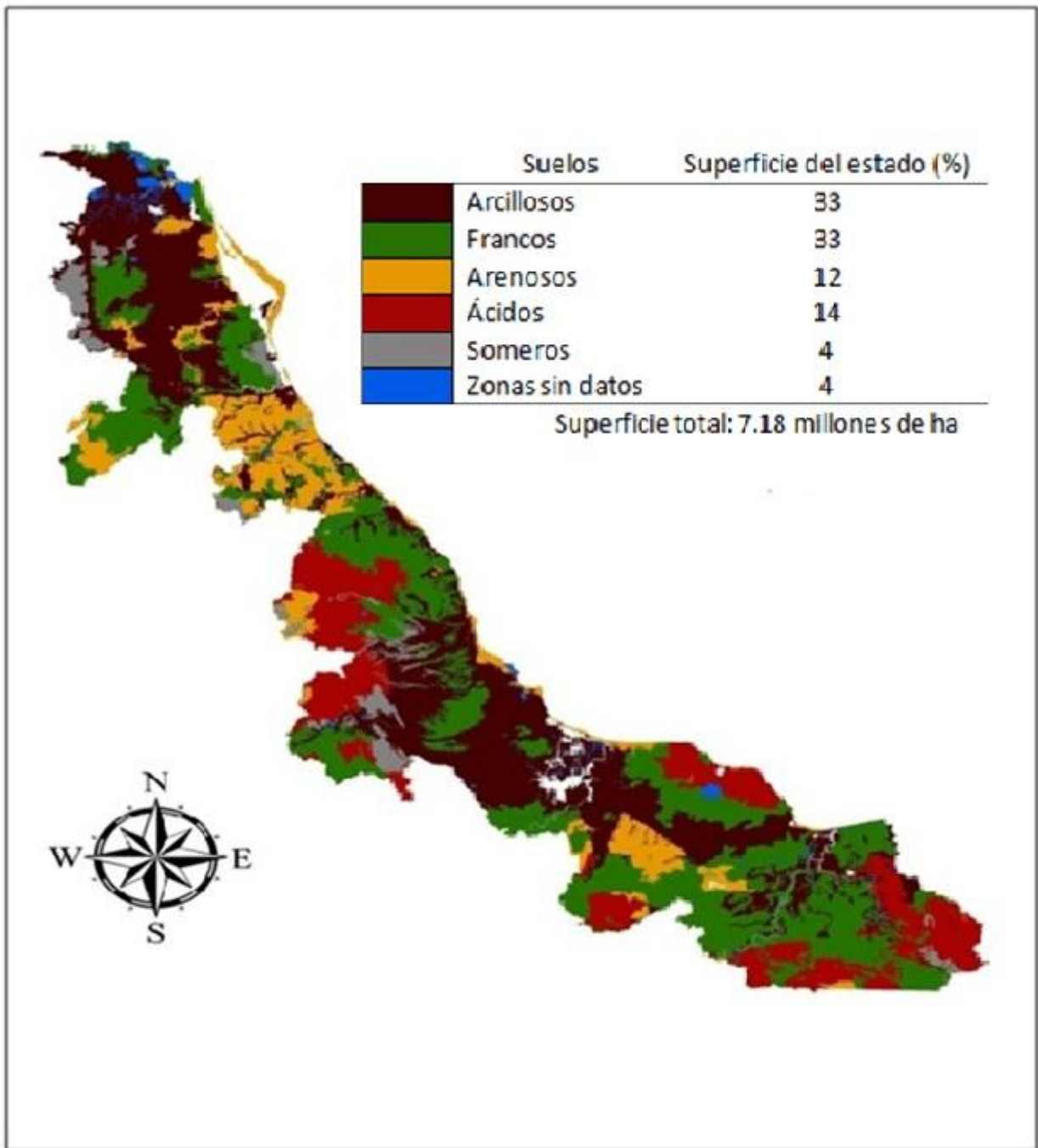


Figura 4.- Suelos del estado de Veracruz.  
Fuente: Adaptado de CONABIO.

En la Figura 5 se muestra el uso del suelo forestal, agrícola, pecuario, zonas urbanas y cuerpos de agua en el estado de Veracruz. Las zonas forestales con selvas y bosques ocupan el 18 % de la superficie, y se distribuyen principalmente en áreas montañosas con pendientes mayores del 15 %, en suelos ácidos y francos de buena fertilidad, y bajo climas cálidos húmedos y semicálidos húmedos y subhúmedos. Los pastizales ocupan el 53 % de la superficie y se localizan a lo largo y ancho del estado, sin embargo, las mayores superficies se encuentran en los extremos norte y sur del mismo, ocupando principalmente suelos arcillosos y francos; en la zona centro se encuentran principalmente en suelos arcillosos. Los pastizales se localizan casi en su totalidad en los climas cálidos húmedos y subhúmedos. Las áreas agrícolas en Veracruz ocupan el 25 % de su superficie y se localizan sobre suelos arcillosos, francos y arenosos, principalmente. Los cultivos anuales se localizan en las zonas con pendientes menores de 15 %, mientras que los cultivos perennes como el café y los cítricos se localizan en terrenos con pendientes entre 8 % y 30 %. Cultivos especializados, como la piña, se localizan en suelos ácidos.

## **7.2. GENERACIÓN DE ARCHIVOS REQUERIDOS POR EL MODELO**

Para la simulación del rendimiento de semilla *J. curcas* L. usando el SWAT, fueron requeridos tres diferentes tipos de archivos: a) mapas que contienen la distribución espacial de los factores edafoclimáticos, b) bases de datos con la información numérica correspondiente a cada factor y c) catálogos de archivos de texto que permiten relacionar los mapas con dicha información.

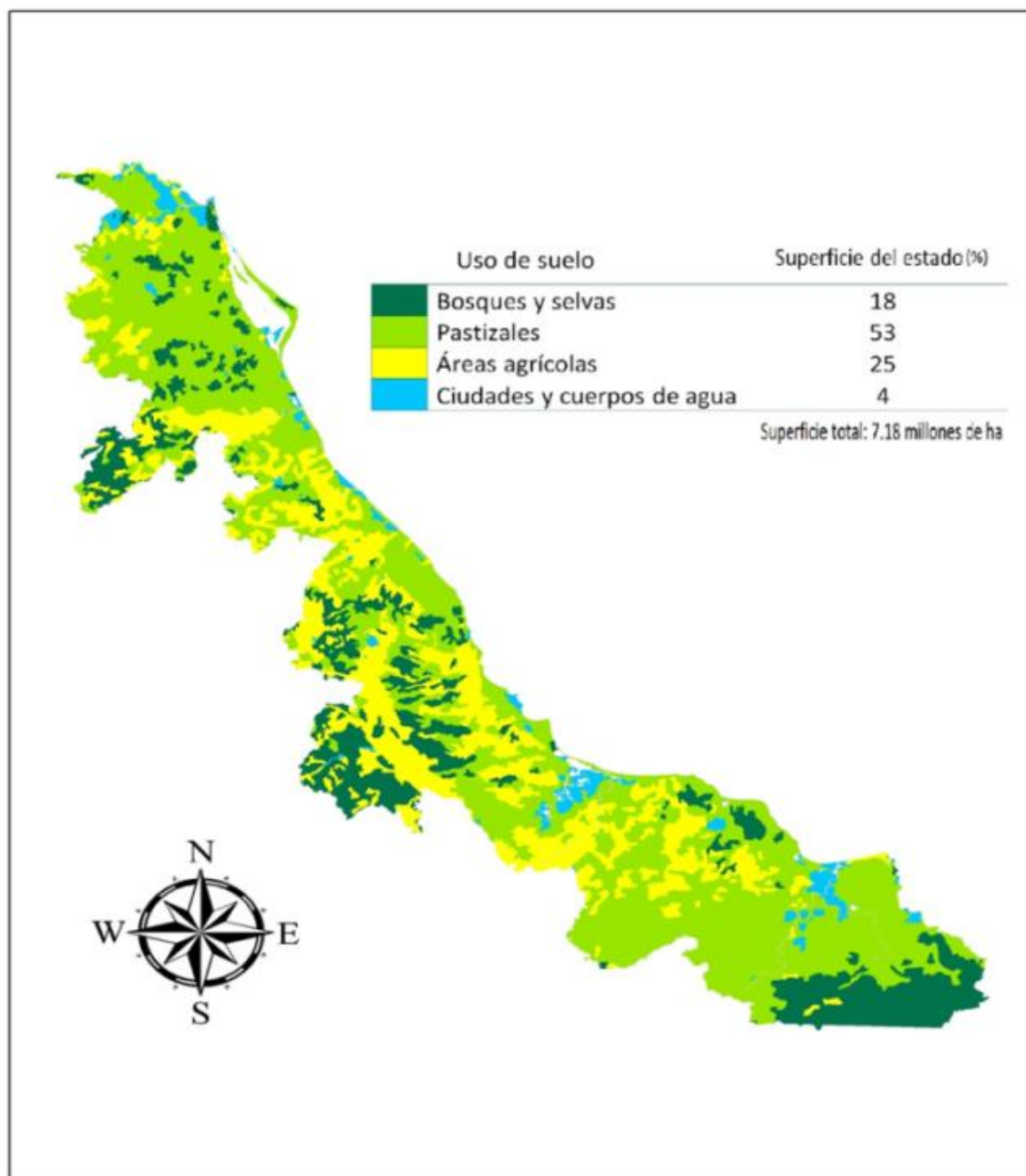


Figura 5.- Uso del suelo en el estado de Veracruz.  
Fuente: Adaptado de CONABIO.

### **7.2.1. MAPAS**

Todos los mapas se usaron en formato “grid” (requerimiento del *software*), con cuadrícula de 90 m y se les asignó una proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) en zona 14 de hemisferio norte; con base en el elipsoide WGS84 se eligió esta proyección por ser la que más se ajusta a la superficie de Veracruz, pese al hecho de que cierta superficie de la entidad se localiza sobre la zona 15 del mismo hemisferio. Se utilizaron cuatro mapas: a) el modelo de elevación digital (DEM), que fue elaborado a partir del mapa de curvas de nivel de INEGI; b) el mapa de edafología, que se elaboró a partir del mapa de edafología 1:250000 serie 3 de INEGI, separando los suelos que presentaban fase lítica en nuevas categorías; c) el mapa de ríos de INEGI y d) un mapa de uso de suelo, el cual debido a los objetivos del trabajo, se elaboró considerando toda la superficie del estado como área potencial para la siembra de *J. curcas* L.

### **7.2.2. BASES DE DATOS Y CATÁLOGOS**

El programa incluye un archivo que contiene todas las bases de datos necesarias para realizar las simulaciones y los cálculos que este efectúa. Algunas de esas bases de datos tuvieron que ser modificadas para incluir nuevas categorías o adaptar las existentes de acuerdo a las condiciones locales. Las bases de datos modificadas fueron edafología, parámetros fisiológicos del cultivo, clima, manejo y fertilizantes.

#### **7.2.2.1. EDAFOLOGÍA**

Se elaboró un perfil típico para cada una de las 58 clases de suelo (46 subunidades FAO mas 13 nuevas clases creadas por presentar fase lítica), de acuerdo a la descripción de la subunidad y a los datos analíticos de 829 perfiles de suelo

presentados por INEGI en cartas edafológicas para los siete estados (Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintana Roo, Chiapas y Oaxaca) de la zona tropical del sureste de México. Los datos no presentados por INEGI y requeridos por el modelo fueron estimados de diferentes formas y a partir de diferentes fuentes, como se describe en el Cuadro 13. A manera de ejemplo, el Cuadro 14 presenta los datos ingresados al programa para el perfil típico del suelo Cambisol calcárico.

Cuadro 13.- 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.)

Cuadro 14.- Características del perfil típico del suelo Cambisol calcárico.

Horizonte	Prof	Text	DA	HD	CO	CHS	CR.	Alb	USLE K	CE
A	153	28-30-42	1.37	0.13	3.36	4.1	0	0.05	0.18	1
B1	362	28-31-41	1.36	0.13	1.76	3.9	0	0.1	0.26	1
B2	455	25-37-38	1.37	0.14	0.41	5.6	0	0.2	0.26	1

**Prof:** Profundidad en mm; **Text:** textura en porcentajes de suelo total y en el siguiente orden arcilla-limo-arena; **DA:** Densidad aparente en g cm<sup>-3</sup>; **HD:** Humedad disponible en mm mm<sup>-1</sup>; **CO:** Carbono orgánico en porcentaje de suelo total; **CHS:** Conductividad hidráulica saturada en mm hr<sup>-1</sup>; **CR:** Contenido de rocas en porcentaje de suelo total; **Alb:** Albedo adimensional; **USLE K:** Factor “K” de la ecuación universal de pérdida de suelo; **CE:** Conductividad eléctrica en dS m<sup>-1</sup>.

### 7.2.2.2. PARÁMETROS FISIOLÓGICOS DE *JATROPHA CURCAS* L.

Los parámetros fisiológicos de *J. curcas* L. utilizados en el modelo de simulación se muestran en el Cuadro 15, y fueron obtenidos en su mayoría de una simulación de *J. curcas* L. usando el SWAT, realizada por el Instituto Indio de Tecnología Delhi (IITD) (2009). En el caso de los parámetros más importantes, fueron corroborados en otras fuentes, y algunos otros menos importantes se tomaron del modelo a partir de la cobertura “bosque deciduo”.

Cuadro 15.- Parámetros fisiológicos de *Jatropha curcas* L. utilizados por SWAT para simular el rendimiento de semilla.

Parámetro fisiológico	Unidad	Valor
Eficiencia en el uso de la radiación (RUE) <sup>a, c</sup>	Kg ha <sup>-1</sup> (MJm <sup>-2</sup> ) <sup>-1</sup>	15
Índice de cosecha para óptimas condiciones de crecimiento (HI) <sup>a, e</sup>	Kg ha <sup>-1</sup> (Kg ha <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup>	0.2
Índice máximo de área foliar potencial (BLAI) <sup>a, d</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>a</sup>	Fracción	0.05
Fracción del área foliar máxima correspondiente al primer punto de la curva de desarrollo óptimo de área foliar (LAIMX1) <sup>a</sup>	Fracción	0.05
Altura máxima del dose <sup>a, f</sup>	m	5
Profundidad máxima de las raíces <sup>a, g</sup>	m	2.5
Fracción del total unidades calor correspondientes al primer punto de la curva de desarrollo óptimo de área foliar (FRGW2) <sup>a</sup>	Fracción	0.4
Fracción del área foliar máxima correspondiente al primer punto de la curva de desarrollo óptimo de área foliar (LAIMX2) <sup>a</sup>	Fracción	
Fracción del crecimiento donde el área foliar comienza a declinar (DLAI) <sup>a</sup>	(unidades calor)(unidades calor) <sup>-1</sup>	0.3
Temperatura óptima (To) <sup>a</sup>	°C	30
Temperatura base (Tb) <sup>a</sup>	°C	10
Fracción de nitrógeno en la cosecha (CNYLD) <sup>b</sup>	Kg N(Kg rendimiento) <sup>-1</sup>	0.035
Fracción de fósforo en la cosecha (CPYLD) <sup>b</sup>	Kg P(Kg rendimiento) <sup>-1</sup>	0.0139
Fracción de nitrógeno en la emergencia(BN1) <sup>a</sup>	Kg N(Kg rendimiento) <sup>-1</sup>	0.0035
Fracción de nitrógeno a la mitad del ciclo (BN2) <sup>a</sup>	Kg N(Kg rendimiento) <sup>-1</sup>	0.002
Fracción de nitrógeno en la madurez (BN3) <sup>a</sup>	Kg N(Kg rendimiento) <sup>-1</sup>	0.001
Fracción de fósforo en la emergencia (BP1) <sup>a</sup>	Kg P(Kg rendimiento) <sup>-1</sup>	0.0007
Fracción de fósforo a la mitad del ciclo (BP2) <sup>a</sup>	Kg P(Kg rendimiento) <sup>-1</sup>	0.0004
Fracción de fósforo a la madurez (BP3) <sup>a</sup>	Kg P(Kg rendimiento) <sup>-1</sup>	0.0003
Límite menor de índice de cosecha (WSYF) <sup>a</sup>	Kg ha <sup>-1</sup> (Kg ha <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup>	0.02

Parámetro fisiológico	Unidad	Valor
Valor mínimo para el factor de erosión hídrica de la cobertura del suelo (USLE_C) <sup>a</sup>	A dimensional	0.001
Conductancia estomática máxima a alta radiación solar y bajo déficit de presión de vapor (GSI) <sup>a</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>b</sup>	kPa	4
Fracción de la máxima conductancia estomática correspondiente al segundo punto de la curva de conductancia estomática (FRGMAX) <sup>b</sup>	Fracción	0.75
Tasa de disminución en la eficiencia del RUE por unidad incrementada en el déficit de presión de vapor (WAVP) <sup>a</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>a</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>a</sup>	Proporción	30
Coefficiente de descomposición de los residuos del cultivo (RSDCO) <sup>a</sup>	Fracción	0.05
Índice de área foliar mínimo para la planta durante el periodo de dormancia (ALAI_MIN) <sup>b</sup>	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>	0.75
Fracción de la biomasa de acumulada del árbol que se transforma en residuo durante la dormancia (BIO_LEAF) <sup>b</sup>	Fracción	0.5
Número de años requeridos para que la especie alcance su máxima madurez (MAT_YRS) <sup>a</sup>	Años	4
Máxima biomasa para un bosque (BMX_TREES) <sup>b</sup>	t ha <sup>-1</sup>	1000
Coefficiente de extinción de la luz (EXT_COEF) <sup>b</sup>	A dimensional	0.65
Fracción de mortandad de la biomasa (BM_DIEOFF) <sup>b</sup>	A dimensional	0.1

Fuentes: a.- IITD (2010); b.- SWAT "forest deciduous"; c.- Rusmayandi *et al.* (2008); d.- Behera *et al.* (2009); e.- Achten *et al.* (2010) y Jongschaap (2007); f.- Franken y Nielsen (2010); g.- Reubens *et al.* (2011).

### 7.2.2.3. 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 simularon los datos faltantes para el periodo 1960-2010 de temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación pluvial, así como todos los de radiación solar y humedad relativa;

además, se obtuvieron los datos estadísticos requeridos por SWAT. En el Cuadro 16 se presentan a manera de ejemplo los datos para los 12 meses de la estación 30100.

Cuadro 16.- Datos estadísticos de la estación meteorológica 30100.

Parámetros	Meses											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Tmax	21.5	22	25.7	26.1	26.6	23.7	22.4	22.5	23	22.5	22.1	21.4
Tmin	6.5	6.9	9.4	10.7	12.3	12.5	11.4	11.4	11.8	10.3	8.6	7.2
DETmax	4.8	5	5.2	4.7	4.3	3.6	3.5	3.4	3.5	3.7	4.1	4.1
DETmin	2.7	3.3	3.1	2.6	2.7	1.9	2.2	2.2	2.4	2.4	2.9	2.9
PPM	8.8	8.8	12.2	21.1	50.1	147.7	143.2	140.3	148.4	77.6	23.1	10.7
DEPPM	2.27	3.09	3.99	3.4	4.96	8.73	7.35	7.52	11.04	5.86	3.37	2.24
CAPPM	4.27	1.75	1.7	1.36	1.19	1.54	1.56	1.62	3.39	1.69	1.67	1.36
PDHDS	0.09	0.05	0.06	0.14	0.17	0.34	0.41	0.42	0.38	0.27	0.17	0.1
PDHDH	0.27	0.32	0.35	0.28	0.47	0.63	0.64	0.6	0.67	0.49	0.35	0.15
PDPM	30.4	2	2.5	5	7.6	14.6	16.6	15.7	16	10.8	6.2	3.3
PMMH	40.8	8.1	10.2	9.3	13.3	18	15.8	16	19.6	13	7.2	5.9
RS	16	18	22	23	23	21	21	21	20	19	18	16

**Tmax:** Temperatura máxima; **Tmin:** Temperatura mínima; **DETmax:** Desviación estándar de la temperatura máxima; **DETmin:** Desviación estándar de la temperatura mínima; **PPM:** Precipitación pluvial promedio mensual; **DEPPM:** Desviación estándar de la precipitación pluvial promedio mensual; **CAPPM:** Coeficiente de asimetría de la precipitación pluvial promedio mensual; **PDHDS:** Probabilidad de un día húmedo después de un día seco; **PDHDH:** Probabilidad de un día húmedo después de un día húmedo; **PDM:** Promedio de días con precipitación pluvial al mes; **PMMH:** Precipitación pluvial máxima en media hora; **RS:** Radiación solar.

Debido a que el modelo asigna a la subcuenca el clima de la estación más cercana a su centroide, no todas las estaciones trabajadas fueron utilizadas. En la Figura 6 se presenta la distribución de las 95 estaciones usadas.

#### 7.2.2.4. MANEJO AGRONÓMICO Y FERTILIZANTES

El manejo agronómico de *J. curcas* L. fue diseñado para obtener alto rendimiento de semilla bajo condiciones de temporal y se obtuvo a partir de lo reportado por Franken y Nielsen (2010). En el Cuadro 17 se presenta el manejo general dado al cultivo. Los fertilizantes propuestos por el manejo fueron añadidos a la base realizando los cálculos



correspondientes de su contenido de nitrógeno y fósforo. El potasio no es considerado por el modelo.

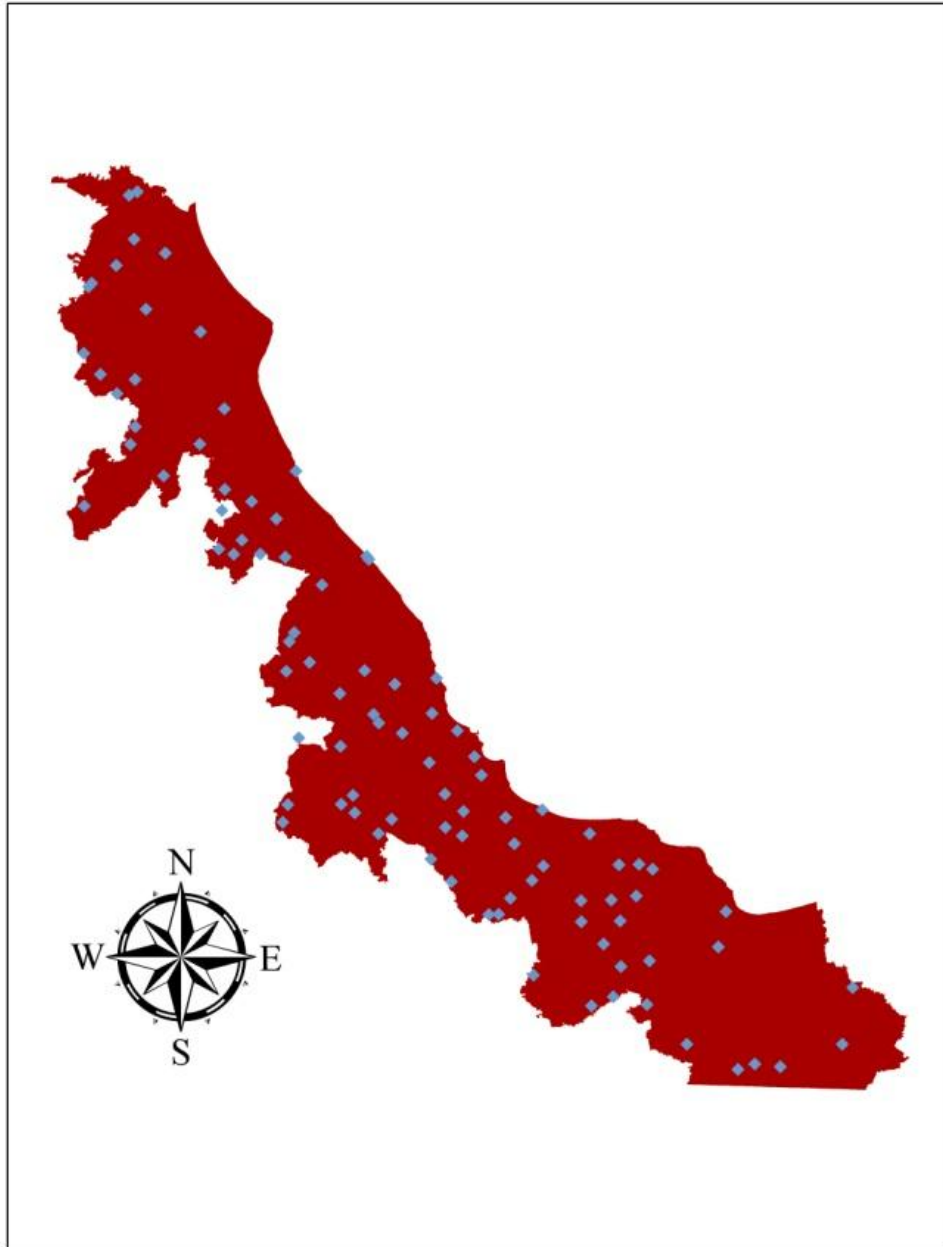


Figura 6.- Ubicación de las 95 estaciones climáticas usadas por SWAT

### **7.2.2.5. CATÁLOGOS**

Se elaboraron cuatro catálogos: uno para relacionar el mapa edafológico con los parámetros de cada tipo de suelo, y otros tres para indicarle al modelo qué información climática (estadísticas mensuales, precipitación pluvial y temperatura) usar.

### **7.3. PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN**

Mediante este procedimiento el modelo delimitó la cuenca y las subcuencas tomando como base el DEM, con la opción de aumentar la precisión añadiendo el mapa de ríos para indicarle dónde se presentan corrientes fluviales. Como primer paso, el modelo calcula la dirección y acumulación de flujo, posteriormente crea la red de drenaje y marca los puntos en donde existen salidas o desembocaduras de una corriente de flujo a otra. Finalmente, se le indica al modelo crear las subcuencas considerando todas las desembocaduras existentes, obteniendo un total de 224 subcuencas que se muestran en la Figura 7.

La creación de las URH consiste en una sobreposición de mapas para identificar áreas que pertenecen a una misma subcuenca y presentan características únicas de uso de suelo, edafología y pendiente. Se añadió el mapa de uso de suelo y edafología descritos anteriormente y se seleccionaron cinco intervalos de pendiente: 1) de 0 % a 3 %; 2) de 3 % a 8 %; 3) de 8 % a 15 %; 4) de 15 % a 30 % y 5) mayores de 30 %. no es necesario añadir los mapas de pendientes y subcuencas ya que el modelo los elabora a partir del DEM. Como resultado de este proceso se crearon 4053 URH; sin embargo, tras discriminar área por exceder el límite de altura sobre el nivel del mar adecuado para *J. curcas* L. permanecieron únicamente 3381 URH, como se muestra en la Figura 8.

Finalmente, se le asignó al modelo un manejo agronómico para *J. curcas* L. en el estado de Veracruz, que se muestra en el Cuadro 17, y se procedió a correr el modelo para el periodo 2000-2010, obteniendo el rendimiento promedio de semilla de *J. curcas* L. para cada URH y mapeando el resultado mediante el establecimiento de intervalos.

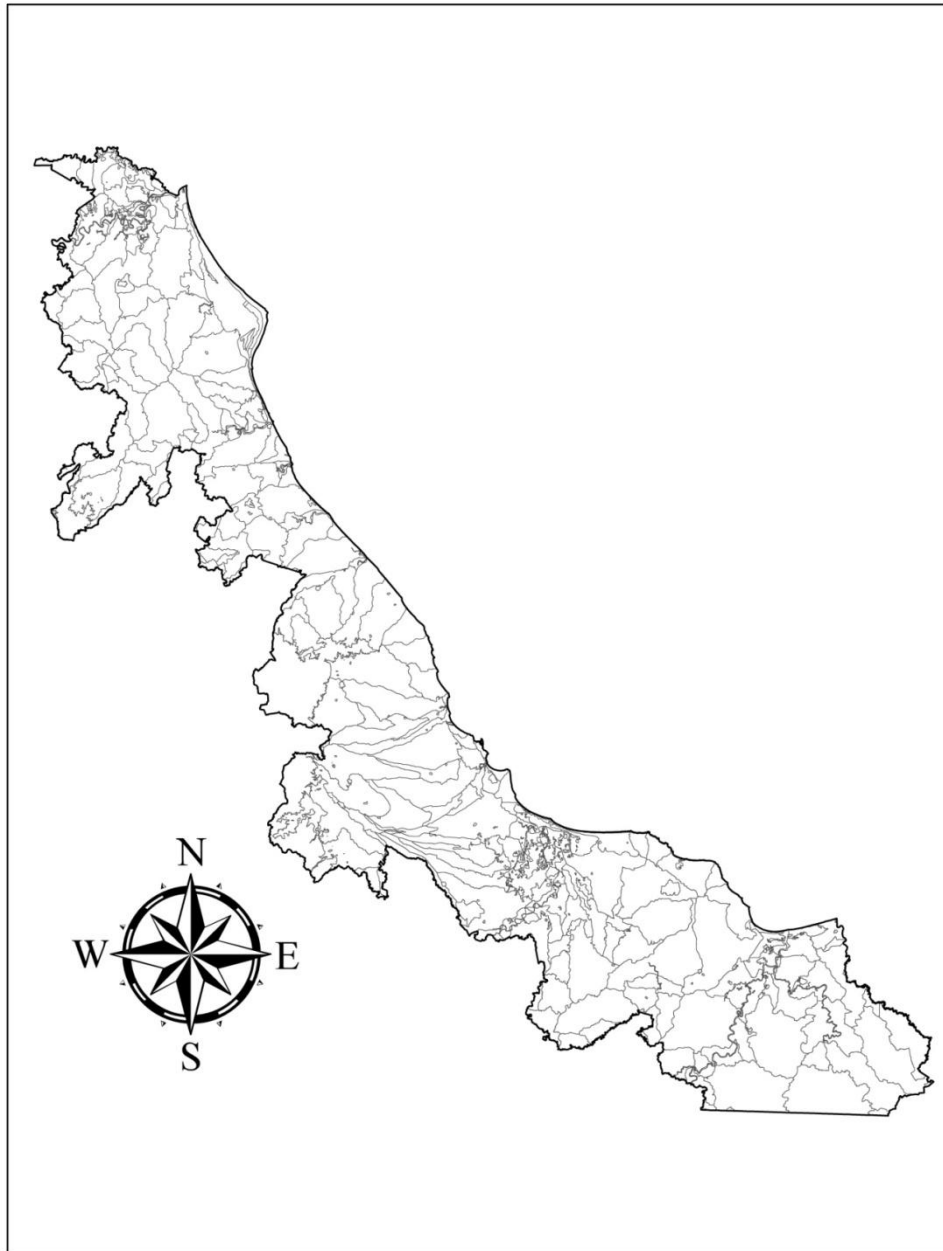


Figura 7.- Estado de Veracruz dividido en las 224 subcuencas generadas por SWAT.

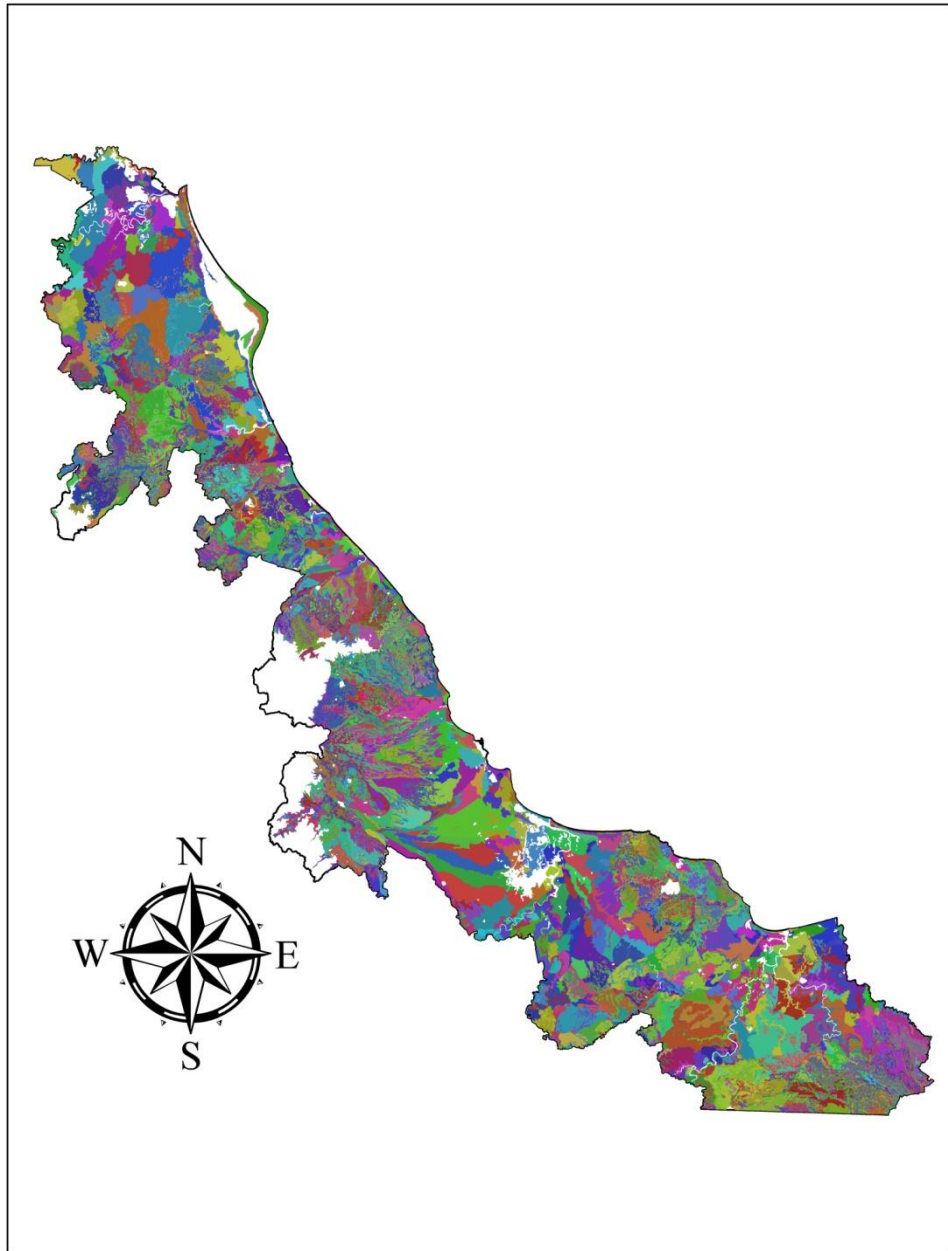


Figura 8.- Estado de Veracruz dividido en las 3381 URH generadas por SWAT

Cuadro 17.- Manejo agronómico de *Jatropha curcas* L. utilizado para simular el rendimiento de semilla con el modelo SWAT.

Fecha	Año 1		
	Actividad	Insumo	
		Tipo	Cantidad
01-may	Chapeo	-----	-----
16-may	Subsoleo	-----	-----
28-may	Rastreo	-----	-----
29-may	Trazado	-----	-----
30-may	Hoyado	-----	-----
01-jun	Siembra	Plántula	1666
01-jun	Aplicación micorrizas	Micorrizas (g)	333.2
01-jun	Aplicación de composta	Composta	833
21-jun	Aplicación de herbicida	Glifosato (L)	2
21-ago	Aplicación de herbicida	Glifosato (L)	2
21-oct	Aplicación de herbicida	Glifosato (L)	2
15-jun	Fertilización	23-07-34 (Kg)	100
23-dic	Poda	-----	-----
Cuando sea necesario	Aplicación de insecticida	Dursban (g)	3.4
Cuando sea necesario	Aplicación de fungicida	Captan 80 (g)	4
Cuando sea necesario	Aplicación de fungicida	Cupravit (g)	1
Cuando sea necesario	Aplicación de insecticida	Rogor (L)	0.26
30-dic	Cosecha	-----	-----
Fecha	Año 2		
	Actividad	Insumo	
		Tipo	Cantidad
21-jun	Aplicación de herbicida	Glifosato (L)	2
21-ago	Aplicación de herbicida	Glifosato (L)	2
21-oct	Aplicación de herbicida	Glifosato (L)	2
15-jun	Fertilización	34-11-50 (Kg)	100
23-dic	Poda	-----	-----
Cuando sea necesario	Aplicación de insecticida	Dursban (g)	3.4
Cuando sea necesario	Aplicación de fungicida	Captan 80 (g)	4
Cuando sea necesario	Aplicación de fungicida	Cupravit (g)	1
Cuando sea necesario	Aplicación de insecticida	Rogor (L)	0.26
30-ago	Cosecha	-----	-----
30-sep	Cosecha	-----	-----
30-oct	Cosecha	-----	-----
30-nov	Cosecha	-----	-----
30-dic	Cosecha	-----	-----

Año 3				
Fecha	Actividad	Insumo		
		Tipo	Cantidad	
21-jun	Aplicación de herbicida	Glifosato (L)	2	
21-ago	Aplicación de herbicida	Glifosato (L)	2	
21-oct	Aplicación de herbicida	Glifosato (L)	2	
15-jun	Fertilización	69-21-101 (Kg)	100	
23-dic	Poda	-----	-----	
Cuando sea necesario	Aplicación de insecticida	Dursban (g)	3.4	
Cuando sea necesario	Aplicación de fungicida	Captan 80 (g)	4	
Cuando sea necesario	Aplicación de fungicida	Cupravit (g)	1	
Cuando sea necesario	Aplicación de insecticida	Rogor (L)	0.26	
30-ago	Cosecha	-----	-----	
30-sep	Cosecha	-----	-----	
30-oct	Cosecha	-----	-----	
30-nov	Cosecha	-----	-----	
30-dic	Cosecha	-----	-----	
Año 4-10				
Fecha	Actividad	Insumo		
		Tipo	Cantidad	
21-jun	Aplicación de herbicida	Glifosato (L)	2	
21-ago	Aplicación de herbicida	Glifosato (L)	2	
21-oct	Aplicación de herbicida	Glifosato (L)	2	
15-jun	Fertilización	103-32-151 (Kg)	100	
23-dic	Poda	-----	-----	
Cuando sea necesario	Aplicación de insecticida	Dursban (g)	3.4	
Cuando sea necesario	Aplicación de fungicida	Captan 80 (g)	4	
Cuando sea necesario	Aplicación de fungicida	Cupravit (g)	1	
Cuando sea necesario	Aplicación de insecticida	Rogor (L)	0.26	
30-ago	Cosecha	-----	-----	
30-sep	Cosecha	-----	-----	
30-oct	Cosecha	-----	-----	
30-nov	Cosecha	-----	-----	
30-dic	Cosecha	-----	-----	

Fuente: Franken y Nielsen (2010)

Para correr la simulación se pusieron a disponibilidad del modelo los archivos de datos diarios de temperatura y precipitación pluvial de las 137 estaciones climáticas generados con anterioridad, añadiendo los catálogos correspondientes.

#### **7.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Para el análisis de los resultados se correlacionaron el suelo y el clima con el rendimiento simulado de semilla de *J. curcas* L. Para esto se categorizaron tres variables de suelos y tres de clima, que de acuerdo a la literatura son determinantes para el rendimiento.

Para el factor suelo se usaron la profundidad, el contenido de materia orgánica de la primera capa (MO) como un sinónimo de la fertilidad y la textura general de todo el perfil. La información de textura estaba ordenada por horizontes del suelo, por esta razón se unificó la textura para todo el perfil, considerando dicha proporción de tamaño de partículas, la profundidad del perfil y su densidad aparente. La categorización de suelos por profundidad, MO y textura, se muestra en el Cuadro 18.

Como se mencionó anteriormente, el modelo asigna el clima de una estación a una cuenca y por consiguiente a todas las URH que están dentro de esa cuenca. Dentro de esos elementos climáticos se encuentran la temperatura, la precipitación pluvial y la radiación solar. Se dividieron las URH en intervalos de: a) temperatura media anual, b) precipitación pluvial media anual y c) radiación media anual. Las categorías y su distribución en el estado se muestran en la Figura 9.

Cuadro 18.- Clasificación de suelos por textura, profundidad y materia orgánica (MO).

Profundidad	Intervalo(cm)	Suelo
Delgados	< 30	I, E,
Someros	30-70	Vp(L), Hc(L), Hh(L), Lc(L), Lo(L), Bk(L), Bh(L), Re(L), Rd(L), Rc(L), To(L), Tm, Kh, We, Zo, Zg
Profundos	70-123	Rd, Vc, Bc, Gm, Bd, Hh, Th, Bg, Qc, Bk, Bf, Lc, To, Ao, Hc, Je, Be, Lg, Re, Rc, Hl, Gv, Gp, Lp, Ah, Bv,
Muy profundos	> 123	Ap, Lf, La, Lo, Ge, Jg, Kl, Kk, Lv, Jc, Vp, Nd

tura	Suelo
Arcillo arenoso	Gp
Arcilloso	Ah, Ao, Ap, Gv, La, Lc, Lc(L), Lf, Lg, Lo, Lo(L), Lp, Lv, Nd, Vc, Vp, Vp(L)
Arena franca	Bd, Hh, Rc, Rd(L), Re, Re(L), Th, Zo
Franco	Be, Bg, Bk, Gm, Hv, I, Jc, Je, To, To(L)
Franco arcillo arenoso	Bc, Bf, Ge, Hc(L), Hh(L), Jg, Qc, Rc(L), We
Franco arcilloso	Bh(L), Bk(L), Bv, E, Hl, Kh, Kk, Kl, Rd, Zg
Franco arenoso	Tm

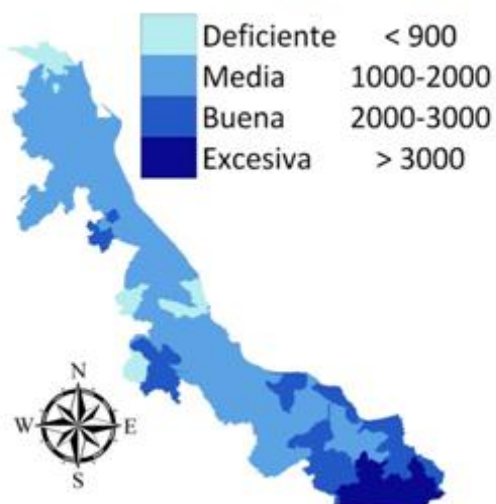
  

Materia orgánica	Intervalo(%)	Suelo
Bajo	< 3	We, Re, Vp(L), Re(L), Bf, Hc(L), Bg, Rd(L), Vc, Kl, Kk, Gp, Hl, Ao, Gv, Qc, Hh(L), Rc, Lv, Vp, Hh, Hc, Bk(L), Ap, Rd, Lg, Ge, Jg, Zg, Jc, Be, Je, Bv, Rc(L), Gm, To(L), To, Lo, Bh(L), La, Nd
Adecuado	> 3	Lf, Bk, Lc, Bc, Lp, Bd, Ah, Tm, Lc(L), Lo(L), Zo, E, Th, Kh, I

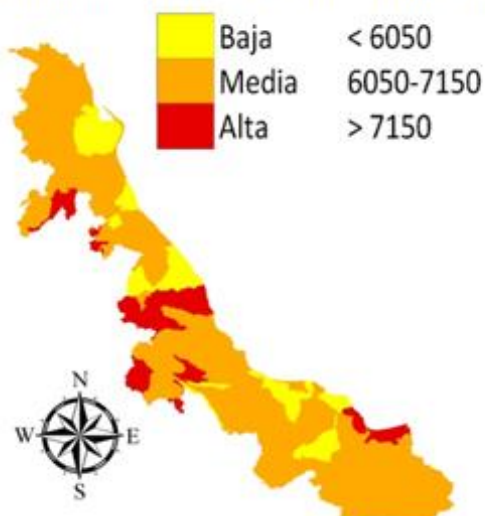
Los límites de los intervalos fueron corregidos mediante un análisis discriminante del programa Statistica 7.1®, y se comprobó que fueran estadísticamente distintos mediante una prueba de Fisher con el mismo *software*.



### Clasificación por precipitación pluvial (mm)



### Clasificación por radiación (MJ·m<sup>-2</sup>)



### Clasificación por temperatura (°C)

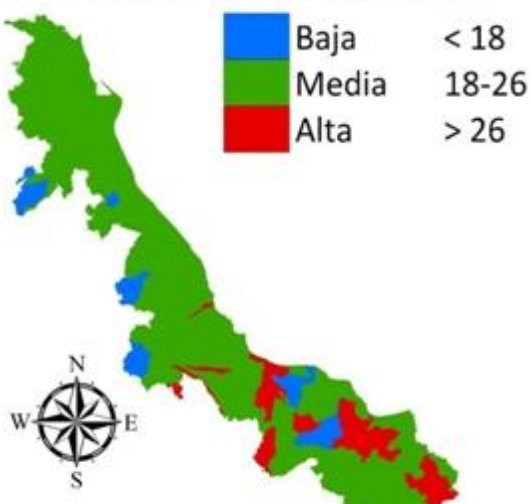


Figura 9.- Distribución de las categorías de precipitación pluvial, radiación y temperatura en el estado de Veracruz.

Fuente: Asignación de climas a URH basada en las 95 estaciones meteorológicas usadas.

## 8. RESULTADOS

### 8.1. SIMULACIÓN Y CARTOGRAFÍA

Los rendimientos simulados de semilla de *J. curcas* L. variaron de 0.16 a 5.73 t ha<sup>-1</sup> y fueron divididos en cinco intervalos de acuerdo con “Jenks” (método de clasificación de datos desarrollado por George Jenks, diseñado para determinar el mejor arreglo de un grupo de datos en diferentes clases, buscando reducir la varianza dentro de las clases y maximizarla entre ellas [Jenks, 1967]): excelentes (>4.57 t ha<sup>-1</sup>), buenos (3.63 a 4.56 t ha<sup>-1</sup>), regulares (2.94 a 3.62 t ha<sup>-1</sup>), malos (1.85 a 2.93 t ha<sup>-1</sup>) y marginales (<1.84 t ha<sup>-1</sup>), como se muestra en la Figura 10. 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. Se descartó la superficie del estado (10 %) que presentaba una altura sobre el nivel del mar mayor a los 1800 m por sobre pasar el límite de tolerancia del cultivo (Foidl *et al.*, 1996).

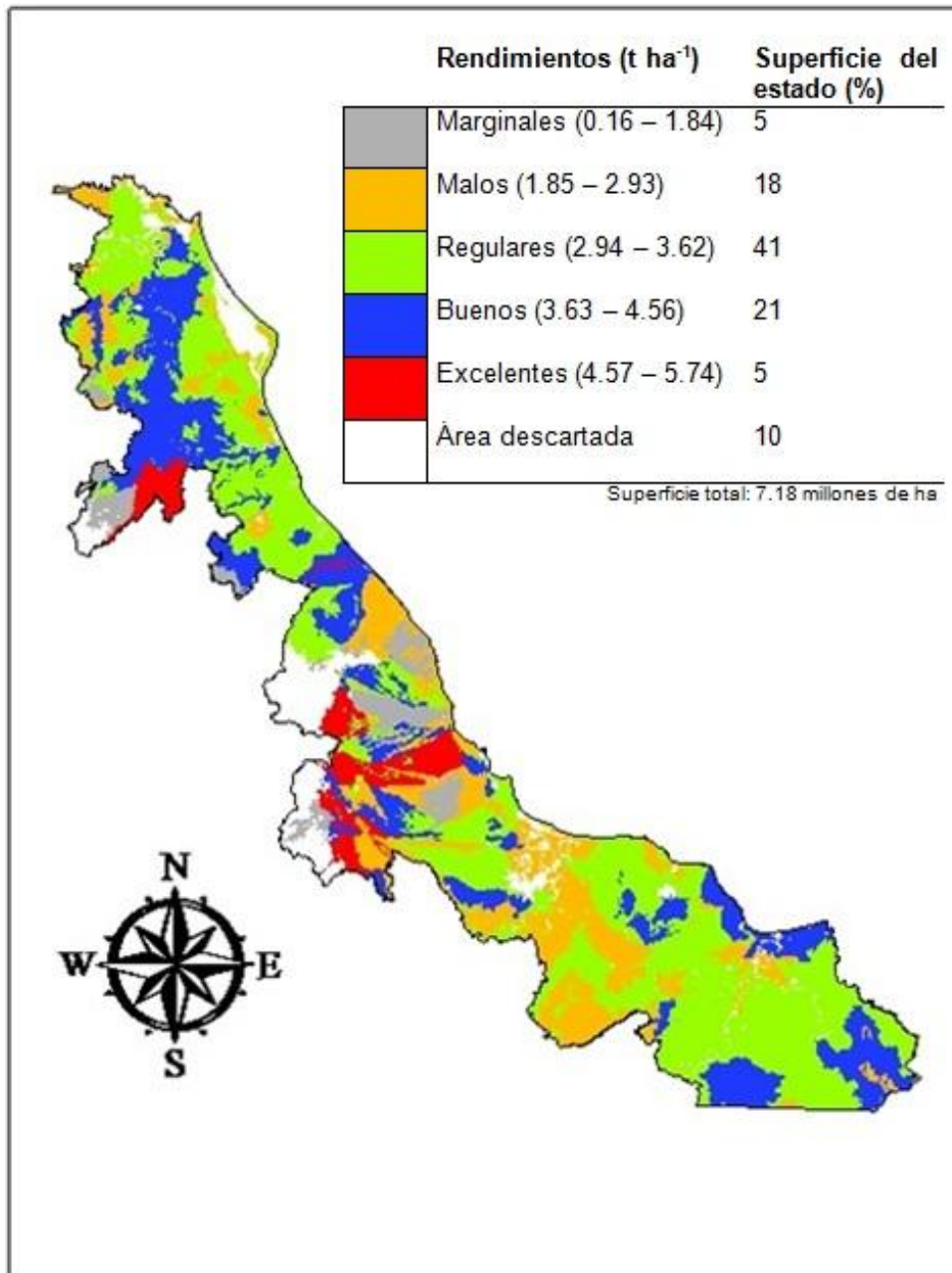


Figura 10.- Rendimiento de semilla de *Jatropha curcas* L. simulada por SWAT en el estado de Veracruz, México.

Trabucco *et al.* (2010) realizaron un trabajo con la finalidad de mapear el rendimiento mundial simulado de *J. curcas* L. como respuesta al clima presente y futuro usando el

modelo MaxEnt. Para esto, caracterizaron las condiciones climáticas de 325 localidades donde colectaron *J. curcas* L. en México, Centroamérica, Sudamérica y el este de África. Dicha caracterización climática se hizo usando la base de datos de WorldClim que contiene datos actuales y proyectados para el escenario A2 del IPCC con una resolución de 1 km. La pendiente fue calculada a partir de un DEM de 90 m; este sirvió para calcular procesos hidrológicos de inundación o infiltración.

Usaron el mapa digital de clasificación de suelos FAO y estos se caracterizaron usando una base de datos de propiedades derivadas del suelo. Finalmente, la explicación del rendimiento simulado se realizó con ocho variables climáticas; las variables de suelo no fueron consideradas por la poca precisión de estos datos. Los datos simulados fueron validados con rendimientos medidos en Centroamérica, África, India y Oceanía.

Los rendimientos simulados que se obtuvieron 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* L. presentó la mejor aptitud en temperaturas medias de entre 18 °C y 29 °C, con un óptimo entre 26 °C y 27 °C, lo cual es similar a lo encontrado en este estudio, donde el mejor rendimiento fue obtenido en las URH con temperatura entre 18 °C y 26 °C. Con respecto a la precipitación pluvial anual *J. curcas* L. presentó 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 900 y 2000 mm. Por último, relacionaron los rendimientos con la clasificación climática de Köppen, señalando que en las categorías Am, Aw y Cf, se ubican los más altos rendimientos de semilla de *J. curcas* L.; 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* L. en México. Primero determinaron la distribución natural de *J. curcas* L. y estimaron patrones climáticos usando el programa Floramap, el cual basado en SIG elabora mapas de distribución potencial de acuerdo a la adaptación climática de especies silvestres. Posteriormente con base en esos patrones climáticos, usaron el programa DIVA-GIS y delimitaron las zonas adecuadas para el establecimiento de *J. curcas* L., acorde con el clima actual (modelo WorldClim) y futuro que considera afectaciones originadas por el cambio climático (modelo CCM3). De acuerdo con sus resultados, *J. curcas* L. puede ser ampliamente distribuida en las regiones tropicales y subtropicales, por lo que Veracruz presenta potencial climático en la mayor parte de su territorio. En la Figura 11 se muestra una comparación entre el mapa generado por estos autores usando el clima actual y el mapa generado 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* L. en México, sus resultados se aprecian en la Figura 12. En este se observan pocas áreas con potencial medio y alto para producir semilla de *J. curcas* L. 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.

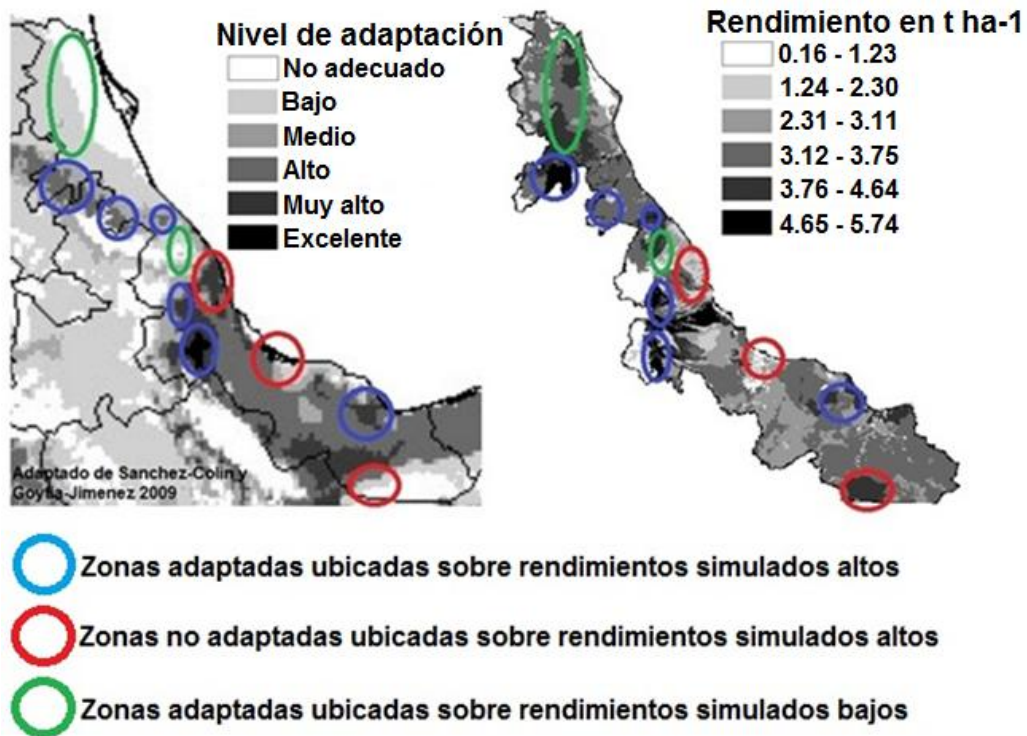


Figura 11.- Comparación entre nivel de adaptación climática (Sánchez-Colín y Goytia-Jiménez, 2009) y rendimiento simulado de semilla de *Jatropha curcas* L. en Veracruz.

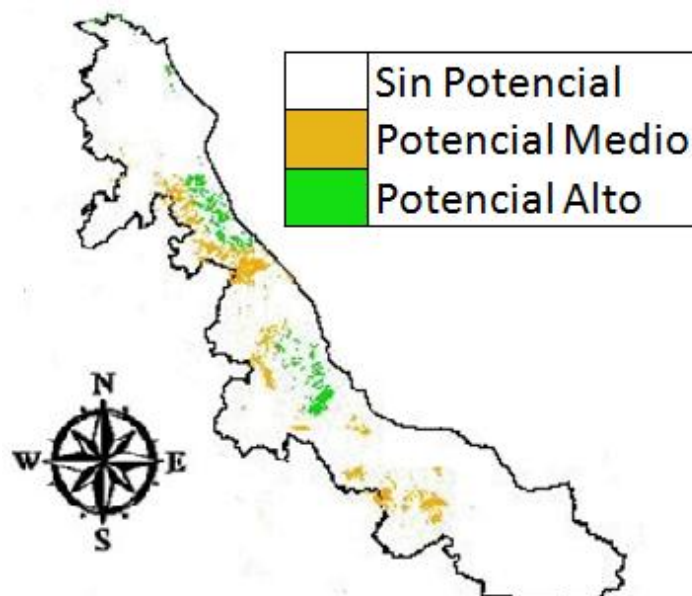


Figura 12.- Potencial productivo de *Jatropha curcas* L. Fuente: Laboratorio de Agromapas Digitales (INIFAP)

## **8.2. UBICACIÓN DE LAS ZONAS CON LOS DISTINTOS INTERVALOS DE RENDIMIENTO SIMULADO DE SEMILLA DE *JATROPHA CURCAS* L. EN EL 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, es pertinente ubicar el área cartografiada en el mapa de uso actual del suelo. Para esto se realizó una sobreposición de mapas unificando el de uso actual del suelo en cuatro categorías: a) áreas agrícolas; b) selvas y bosques; c) pastizales y d) ciudades y cuerpos de agua, además del área que se descartó por exceder el límite de altura sobre el nivel del mar establecido. El Cuadro 19 muestra el resultado de esta sobreposición en hectáreas, 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 la competencia con cultivos alimenticios y áreas forestadas.

## **8.3. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE RENDIMIENTO SIMULADO DE SEMILLA DE *JATROPHA CURCAS* L. Y VARIABLES DE SUELO Y CLIMA**

El rendimiento de semilla de *J. curcas* L. fue influenciado principalmente por el clima y el suelo, así como por la subcuenca, pues URH que presentaban el mismo suelo y fueron afectadas por la misma estación meteorológica, tuvieron rendimientos diferentes por encontrarse en distintas subcuencas, lo cual probablemente se deba al balance hidrológico de estas. La pendiente al parecer no tuvo influencia sobre el rendimiento de las diferentes URH.

Cuadro 19.- Superficie (ha x 1000) de los intervalos de rendimiento de *Jatropha curcas* L. 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 %)				

### 8.3.1. PROFUNDIDAD

El rendimiento de semilla de *J. curcas* L. 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 13. El Cuadro 20 muestra algunos datos estadísticos básicos de la clasificación de las URH por profundidad de suelo, donde el rendimiento promedio varió entre 1.97 y 3.58 t ha<sup>-1</sup>, para los suelos someros y muy profundos, respectivamente. Los Cuadros 21 y 22 presentan distintos niveles de rendimiento simulado de semilla de *J. curcas* L. en diferentes interacciones entre la profundidad del suelo, con la textura y materia orgánica y elementos del clima. Existen diversos niveles de interacción, pero destacan algunos patrones interesantes; por ejemplo, solo existieron rendimientos altos y medios en suelos muy profundos y textura media, y los mayores rendimientos en todas las clases de profundidad de suelo



se presentaron con temperatura media, radiación alta y buena precipitación. La relación entre rendimiento de semilla de *J. curcas* L. 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* L.

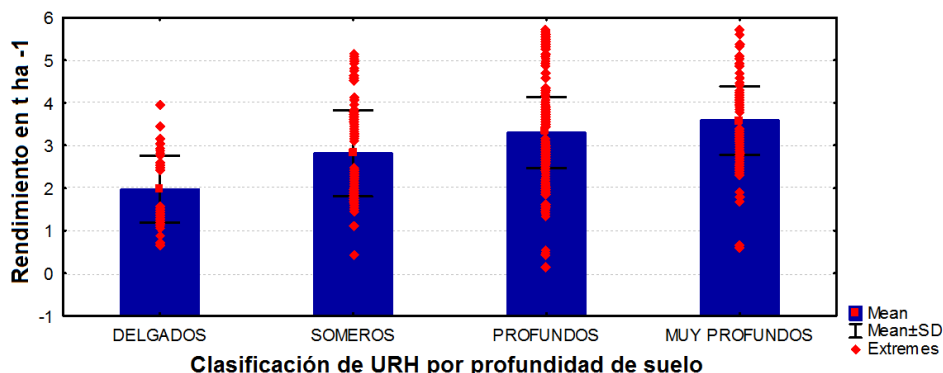


Figura 13.- Relación entre la profundidad del suelo y el rendimiento simulado de semilla de *Jatropha curcas* L.

Cuadro 20.- Datos estadísticos básicos de la clasificación de URH por profundidad de suelo.

Intervalos de profundidad del suelo	Cantidad de URH	Intervalo de rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento promedio (t ha <sup>-1</sup> )	Desviación estándar	Error estándar
Delgados	208	0.64-3.97	1.97	0.78	0.05
Someros	523	0.40-5.16	2.81	1.01	0.04
Profundos	1880	0.16-5.74	3.30	0.84	0.02
Muy profundos	770	0.59-5.74	3.58	0.80	0.03
GLOBAL	3381*	0.16-5.74	3.21	0.94	0.02

\*Expresa el número total de URH delimitadas en Veracruz.

Cuadro 21.- Niveles de rendimiento de semilla de *Jatropha curcas* L. en diferentes interacciones entre la profundidad del suelo y otros factores edáficos.

		Suelo			
		Delgados	Someros	Profundos	Muy profundos
Textura	Fina	N/P	A M B	A M B	A M B
	Media	A M B	A M B	A M B	A M
	Gruesa	N/P	A M B	A M B	N/P
MO	Alta	A M B	A M B	A M B	M B
	Baja	N/P	A M B	A M B	A M B

**N/P**= No se presentó; **A**= Altos; **M**= Medios; **B**=Bajos.

Cuadro 22.- Niveles de rendimiento de semilla de *Jatropha curcas* L. en diferentes interacciones entre la profundidad del suelo y elementos del clima.

		Suelos			
		Delgados	Someros	Profundos	Muy profundos
Temperatura	Baja	M	M B	M B	M B
	Media	A M B	A M B	A M B	A M B
	Alta	M B	M	M B	M
Radiación	Baja	M	M B	M B	M
	Media	A M B	A M B	A M B	A M B
	Alta	A M B	A M B	A M B	A M
Precipitación	Deficiente	M B	M B	M B	M B
	Media	A M B	A M B	A M B	A M B
	Buena	A M B	A M B	A M B	A M
	Excesiva	M	M	M	M

**A**= Altos; **M**= Medios; **B**=Bajos.

### 8.3.2. TEXTURA

Considerando los valores extremos del rendimiento simulado de semilla de *J. curcas* L. clasificado por textura, se observó que no existe ningún patrón, por lo que consideramos que el tipo de textura del suelo no mostró ninguna relación con el rendimiento simulado de semilla de *J. curcas* L.; esto se muestra con mayor claridad en la Figura 14. Lo anterior contradice a la literatura, que reporta que *J. curcas* L. 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 *J. curcas* L. no presente limitantes en suelos con textura fina, si estos tienen cierta pendiente.

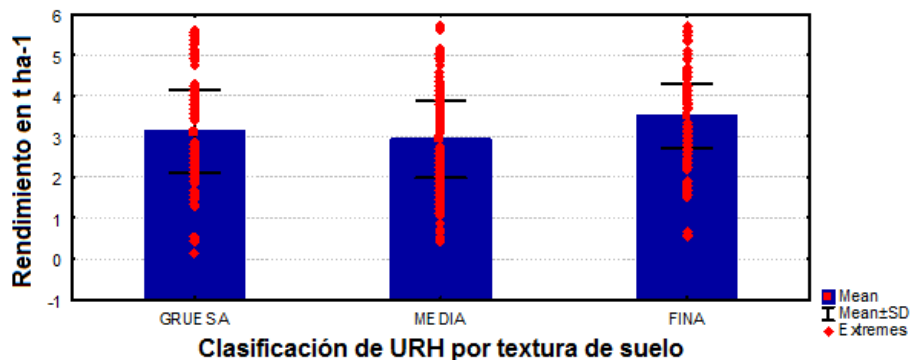


Figura 14.- Relación entre la textura del suelo y el rendimiento simulado de semilla de *Jatropha curcas* L.

### 8.3.3. MATERIA ORGÁNICA

Se encontraron prácticamente todos los tipos de rendimiento simulado de semilla de *J. curcas* L. en las dos clases de MO, por lo que se considero que no existe correlación entre estos dos factores, tal y como se aprecia en la Figura 15. El hecho de que la simulación reporte rendimientos similares de *J. curcas* L. en suelos con baja o alta MO 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) y b) que *J. curcas* L. tenga una baja necesidad de nutrientes (Heller, 1996; Fairless, 2007; Kehira y Atta, 2009; Ndong *et al.*, 2010; Pompelli *et al.*, 2010).

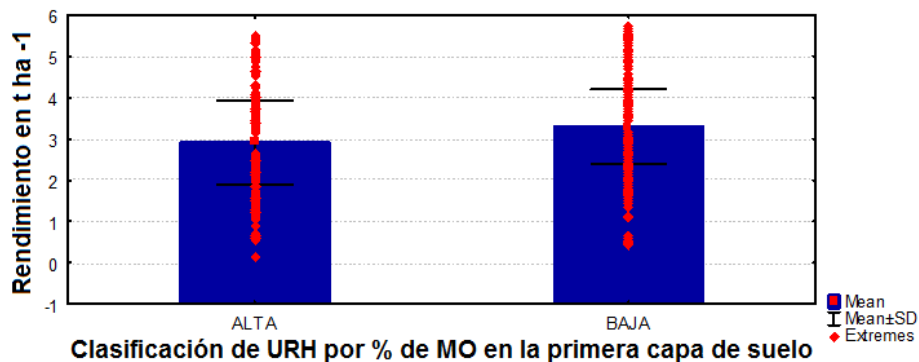


Figura 15.- Relación entre el porcentaje de materia orgánica en la primera capa de suelo y el rendimiento simulado de semilla de *Jatropha curcas* L.

### 8.3.4. TEMPERATURA

La temperatura considerada por las URH mostró una correlación positiva con el rendimiento simulado de *J. curcas* L. de  $r= 0.38$ , donde tanto las temperaturas bajas como las altas ocasionaron que el rendimiento decreciera, como se aprecia en la Figura 16. El Cuadro 23 muestra algunos datos estadísticos básicos de la clasificación de URH por temperatura media anual, donde el rendimiento promedio de semilla varió entre 2.04 y 3.36 t ha<sup>-1</sup>, para temperaturas bajas y medias, respectivamente. Los Cuadros 24 y 25 presentan distintos niveles de rendimiento de semilla de *Jatropha curcas* L. en diferentes interacciones entre la temperatura, otros elementos del clima y factores edáficos, donde se aprecian algunos patrones; por ejemplo, ninguna categoría de temperatura tuvo rendimientos altos en suelos someros y se presentaron rendimientos altos para todas las categorías de temperatura cuando la precipitación pluvial fue buena. El que la temperatura media resultara la de mayor productividad coincide con lo reportado por Achten *et al.* (2008), quienes afirman que esta planta es originaria de lugares que presentan una temperatura media entre 20 °C y 28 °C, de la misma forma, en un estudio realizado por Maes *et al.* (2009) reportan 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).

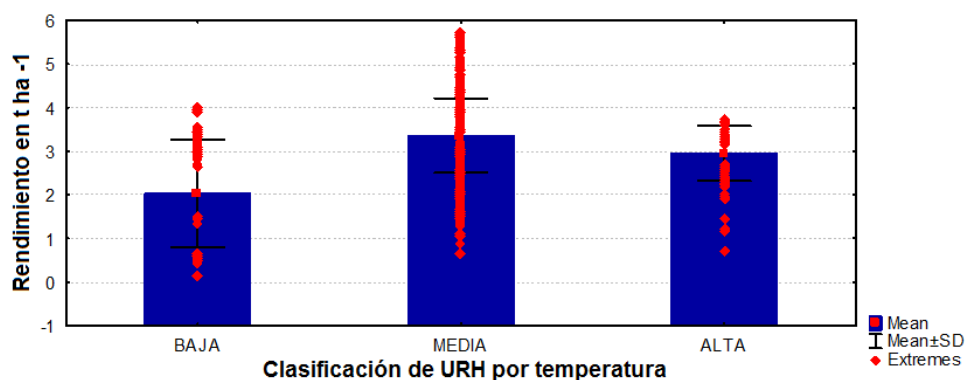


Figura 16.- Relación entre la temperatura y el rendimiento simulado de semilla de *Jatropha curcas* L.

Cuadro 23.- Datos estadísticos básicos de la clasificación de URH por temperatura.

Intervalos de temperatura	Cantidad de URH	Intervalo de rendimientos (t ha <sup>-1</sup> )	Promedio de rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	Desviación estándar	Error estándar
Baja	269	0.16-4.03	2.04	1.24	0.03
Media	2745	0.64-5.74	3.36	0.85	0.02
Alta	367	0.70-3.74	2.95	0.63	0.08
GLOBAL	3381*	0.16-5.74	3.21	0.94	0.02

\*Expresa el número total de URH delimitadas en Veracruz.

Cuadro 24.- Niveles de rendimiento de semilla de *Jatropha curcas* L. en diferentes interacciones entre la temperatura y factores edáficos.

		Temperatura		
		Baja	Media	Alta
Profundidad del suelo	Delgados	M	M B	M B
	Someros	M B	A M B	A M B
	Profundos	A M B	A M B	A M B
	Muy profundos	A M B	A M B	A M
Textura	Fina	A M B	A M B	A M B
	Media	A M B	A M B	A M B
	Gruesa	A M B	A M B	M B
MO	Alta	A M B	A M B	M B
	Baja	A M B	A M B	M B

**A=** Altos; **M=** Medios; **B=**Bajos.

Cuadro 25.- Niveles de rendimiento de semilla de *Jatropha curcas* L. en diferentes interacciones entre la temperatura y otros elementos del clima.

		Temperatura		
		Baja	Media	Alta
Radiación	Baja	A M B	M B	M B
	Media	A M B	A M B	A M B
	Alta	M	A M B	A M B
Precipitación pluvial	Deficiente	M B	M B	N/P
	Media	M B	A M B	M B
	Buena	A	A M B	A M B
	Excesiva	N/P	M	A M B

**N/P**= No se presentó; **A**= Altos; **M**= Medios; **B**=Bajos.

### 8.3.5. PRECIPITACIÓN PLUVIAL

La cantidad de precipitación pluvial que consideraron las URH mostró una correlación positiva ( $r=0.27$ ) con el rendimiento simulado de semilla de *J. curcas* L., donde los mejores rendimientos se encontraron en las categorías intermedias de precipitación pluvial, como se muestra en la Figura 17. El Cuadro 26 muestra algunos datos estadísticos básicos de la clasificación de URH por régimen de precipitación pluvial total anual, donde el rendimiento promedio de semilla varió entre 1.99 y 3.47 t ha<sup>-1</sup>, para las precipitaciones deficiente y buena, respectivamente. Los Cuadros 27 y 28 presentan distintos niveles de rendimiento de semilla de *Jatropha curcas* L. en diferentes interacciones entre la precipitación pluvial, otros elementos del clima y factores edáficos. En ellos se identifican patrones claros, por ejemplo, que con precipitaciones buenas se alcanzaron rendimientos altos, solo cuando los suelos no fueron delgados, y que solo no se presentaron rendimientos altos en temperaturas medias, con precipitación pluvial excesiva. Con base en estos resultados Se puede decir que *J. curcas* L. requiere un precipitación pluvial anual superior a la considerada deficiente (>900 mm), lo cual es similar a lo reportado por Maes *et al.* (2009), quienes ubican el límite inferior en 1200 mm. En contraste con esto, Pompelli *et al.* (2010) y

Trabucco *et al.* (2010) consideran que *J. curcas* L. requiere una cantidad mucho menor de lluvia (250 mm). En cuanto al límite superior, este estudio consideró que precipitaciones pluviales superiores a los 3000 mm son limitantes en el rendimiento, en concordancia con Pompelli *et al.* (2010) y Trabucco *et al.* (2010), pero superando los 2000 mm reportados por Maes *et al.* (2009).

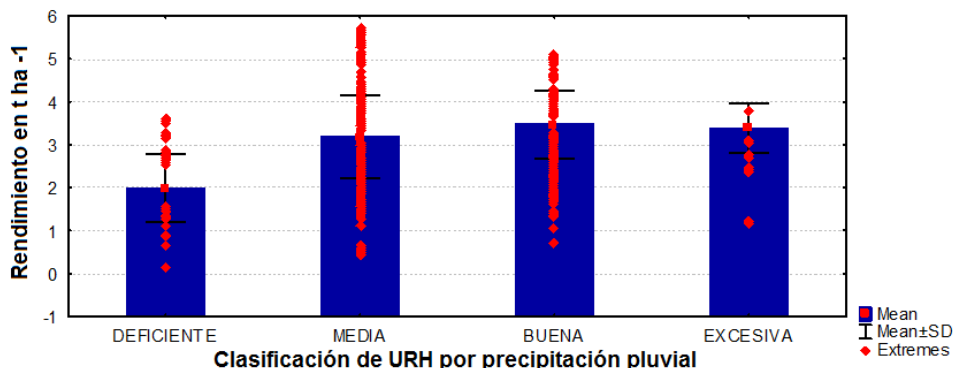


Figura 17.- Relación entre la precipitación pluvial y el rendimiento simulado de semilla de *Jatropha curcas* L.

Cuadro 26.- Datos estadísticos básicos de la clasificación de URH por precipitación.

Intervalos de precipitación pluvial	Cantidad de URH	Intervalo de rendimientos (t ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento promedio (t ha <sup>-1</sup> )	Desviación estándar	Error estándar
Deficiente	179	0.16-3.60	1.99	0.79	0.06
Media	2120	0.40-5.74	3.19	0.96	0.02
Buena	866	0.70-5.08	3.47	0.79	0.03
Excesiva	216	1.19-3.78	3.38	0.57	0.04
GLOBAL	3381*	0.16-5.74	3.21	0.94	0.02

\*Expresa el número total de URH delimitadas en Veracruz.

Cuadro 27.- Niveles de rendimiento de semilla de *Jatropha curcas* L. en diferentes interacciones entre la precipitación pluvial y factores edáficos.

		Precipitación pluvial			
		Deficiente	Media	Buena	Excesiva
Profundidad del suelo	Delgados	M B	M B	M B	B
	Someros	M B	A M B	A M B	M B
	Profundos	A M B	A M B	A M B	M
	Muy profundos	A M	A M B	A M B	M
Textura	Fina	A M	A M B	A M B	M
	Media	A M B	A M B	A M B	M B
	Gruesa	M B	A M B	A M B	M B
MO	Alta	A M B	A M B	A M B	M B
	Baja	A M B	A M B	A M B	M B

**A=Altos; M=Medios; B=Bajos.**

Cuadro 28.- Niveles de rendimiento de semilla de *Jatropha curcas* L. en diferentes interacciones entre la precipitación pluvial y otros elementos del clima.

		Precipitación pluvial			
		Deficiente	Media	Buena	Excesiva
Radiación	Baja	B	M B	M B	B
	Media	A M B	A M B	A M B	M B
	Alta	A M	A M B	M B	N/P
Temperatura	Baja	M B	B	M B	N/P
	Media	A M B	A M B	A M B	M B
	Alta	N/P	M B	M B	M B

**N/P= No se presentó; A= Altos; M= Medios; B=Bajos.**

### 8.3.6. RADIACIÓN

La radiación solar incidente considerada por las URH presentó una correlación muy baja con el rendimiento simulado de semilla de *J. curcas* L., como se aprecia en la Figura 18.



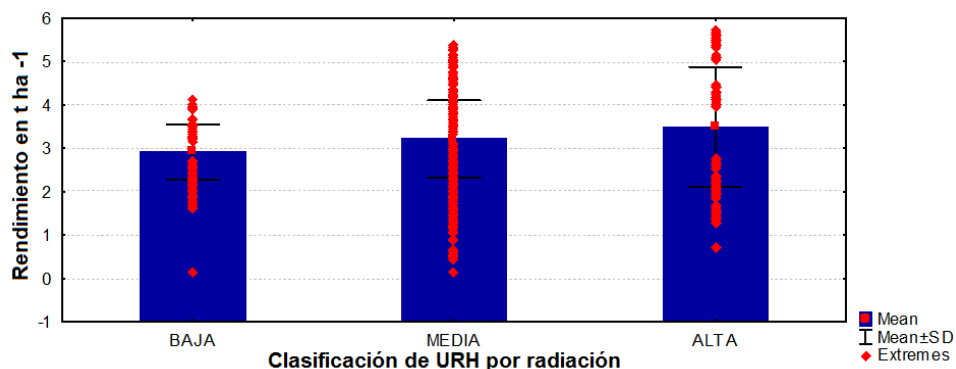


Figura 18.- Relación entre la radiación y el rendimiento simulado de semilla de *Jatropha curcas* L.

#### 8.4. ANÁLISIS GENERAL DE RENDIMIENTO SIMULADO DE SEMILLA DE *JATROPHA CURCAS* L.

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 °C a 26 °C (media); c) lluvia anual entre 1000-3000 mm (media y buena) y d) radiación anual superior a 6050 MJ m<sup>-2</sup>(media y alta). Esto se muestra con mayor claridad en los Cuadros 29 y 30.

Lo anterior se puede interpretar con una visión sistémica considerando la complejidad de interacciones (Herrscher, 2003) que ocurren incluso en 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.

Cuadro 29.- Presencia de factores de suelo en intervalos de rendimiento.

		Intervalos de rendimiento				
		Marginales	Malos	Regulares	Buenos	Excelentes
Profundidad del suelo	Delgados	X	X	X	X	
	Someros	X	X	X	X	X
	Profundos	X	X	X	X	X
	Muy profundos	X	X	X	X	X
% de MO	Baja	X	X	X	X	X
	Alta	X	X	X	X	X
	Fina	X	X	X	X	X
Textura	Media	X	X	X	X	X
	Gruesa	X	X	X	X	X

Cuadro 30.- Presencia de factores de clima en intervalos de rendimiento.

		Intervalos de rendimiento				
		Marginales	Malos	Regulares	Buenos	Excelentes
Temperatura	Baja	X	X	X	X	
	Media	X	X	X	X	X
	Alta	X	X	X	X	
Radiación	Baja	X	X	X	X	
	Media	X	X	X	X	X
	Alta	X	X	X	X	X
Precipitación pluvial	Deficiente	X	X	X		
	Media	X	X	X	X	X
	Buena	X	X	X	X	X
	Excesiva	X	X	X	X	

## 9. CONCLUSIONES

- El rendimiento simulado de *J. curcas* L 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. Esto permite aceptar la hipótesis 1.
- El estado de Veracruz se cartografió agrupando las URH en cinco intervalos de rendimiento simulado de semilla de *J. curcas* L. Se cuantificó la superficie correspondiente a cada intervalo y su relación con el uso actual del suelo, agrupado en agrícola, forestal y pastizales. Se ubicaron 872 mil hectáreas con rendimientos superiores a 3.63 t ha<sup>-1</sup> localizadas sobre pastizales. Esto permite aceptar la hipótesis 2, que considera la existencia de áreas con distinto potencial para producir *J. curcas* L. en Veracruz.
- El orden de los factores que más influyeron sobre el rendimiento simulado de semilla de *J. curcas* L fueron: a) profundidad de suelo, b) temperatura, c) precipitación pluvial. Con esto se acepta la hipótesis 3, que expresa el diferente impacto de las variables edafoclimáticas sobre el rendimiento simulado de semilla de *J. curcas* L.
- El modelo SWAT simuló el rendimiento de semilla de *J. curcas* L. con razonable precisión, por lo que se considera que la información generada puede ser utilizada en forma confiable por los tomadores de decisiones para producir *J. curcas* L. como materia prima para biodiésel.

## 10.RECOMENDACIONES

- Se recomienda medir *in situ* los parámetros fisiológicos de *J. curcas* L. requeridos por el modelo SWAT, con la finalidad de aumentar la precisión en el rendimiento simulado.
- Validar los resultados que se obtuvieron con el modelo de simulación en condiciones de campo.
- Elaborar mapas edafológicos a una menor escala y aumentar el número de estaciones meteorológicas para futuros trabajos de esta naturaleza.

## 11. LITERATURA CITADA.

- Abou K. A. A., and N. M. M. Atta. 2009. Response of *Jatropha curcas* L. to water deficit: Yield, water uses efficiency and oilseed characteristics. *Biomass and Bioenergy* 33: 1343-1350.
- 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 and Bioenergy* 32: 1063-1084.
- Achten W. M. J., W. H. Maes, B. Reubens, E. Mathijs, V. P. Singh, L. Verchot and B. Muys. 2010. Biomass production and allocation in *Jatropha curcas* L. seedlings under different levels of drought stress. *Biomass and Bioenergy* 34:667-676.
- Ackoff R. L. 2003. Definiendo "Sistema". En: Herrscher E. G. (ed). *Pensamiento sistémico caminar el cambio o cambiar el camino*. Granica, Buenos Aires, Argentina. pp: 217-219.
- Adejuwon J. O. 2004. Assessing the suitability of the EPIC Crop Model for use in the study of impacts of climate variability and climate change in West Africa. *Publicación electrónica. AIACC working papers*. 20 p.
- Afzal A., and R. Shibasaki. 2000. Climate change and agricultural food production of Bangladesh: an impact assessment using GIS-based biophysical crop simulation model. In: *Proceedings of 21<sup>st</sup> Asian Conference on Remote Sensing*. December 4-8. Taipei, Taiwan. p: 4.
- Akhavan S., L. Abedi-Koupai, S. F. Mousavi, M. Afyuni, S. S. Eslamianand K. C. Abbaspour. 2010. Applications of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar Watershed, Iran. *Ecosystems and Environment* 139: 675-688.
- Anothai J., A. Patanothai, K. Pannangpetch, S. Jogloy, K. J. Boote, and G. Hoogenboom. 2009. Multi-environment evaluation of peanut lines by model simulation with the cultivar coefficients derived from reduced set of observed field data. *Field Crops Research* 110: 111-122.
- Antenucci J. C., K. Brown, P. L. Croswell, and M. J. Kevany. 1991. *Geographic information Systems: A Guide to the Technology*. Van Nostrand Reinhold, New York., U.S.A. p: 73.
- Aponte H. C. 1978. Estudio de *Jatropha curcas* L. como recurso biótico. Tesis de licenciatura. Universidad Veracruzana. Xalapa de Enríquez, Ver., México. 70p.
- Arnold J. G., R. Sirinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment -Part 1.-Model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34: 73-89.
- Asselbergs B., J. Bokhorst, R. Harms, J. Van Hemert, L. Van der Noort, C. Ten Velden, R. Velvuurt, L. Wijnen, and L. Van Zon. 2006. Size does matter. The possibilities of cultivating *Jatropha curcas* for biofuel production in Cambodia. Technical report. University of Amsterdam, Deutschland. 63 p.
- Azam M. M., A. Waris, and N. M. Nahar. 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.

- Barker T., I. Bashmakov, L. Bernstein, J. E. Bogner, P. R. Bosch, R. Dave, O. R. Davidson, B. S. Fisher, S. Gupta, K. Halsnaes, G. J. Heij, S. Kahan-Robeiro, S. Kobayashi, M. D. Levine, D. L. Martino, O. Masera, B. Metz, L. A. Meyer, G. J. Naburrs, A. Najam, N. Nakicenovic, H. H. Rogner, J. Roy, J. Sathaye, R. Schock, P. Shukla, R. E. H. Sims, P. Smith, D. A. Tirpak, D. Urge-Vorsatz, and D. Shou. 2007. Technical Summary. In: Climate Change 2007. Mitigation: Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. B. Metz, O. R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer. (eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. pp: 25-93.
- Basha S. D., G. Francis, H. P. S. Makkar, K. Becker, and M. Sujatha. 2009. A comparative study of biochemical traits and molecular markers for assessment of genetic relationships between *Jatropha curcas* L. germplasm from different countries. *Biomass and Bioenergy* 176: 812-823.
- Basha S. D., and M. Sujatha. 2007. Inter and intra-population variability of *Jatropha curcas* (L.) characterized by RAPD and ISSR markers and development of population-specific SCAR markers. *Euphytica* 156: 375-386.
- Basha S. D., and M. Sujatha. 2009. Genetic analysis of *Jatropha* species and interspecific hybrids of *Jatropha curcas* using nuclear and organelle specific markers. *Euphytica* 168: 197-214.
- 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 and Bioenergy* 34:30-41.
- Bel-Hassen M., and J. Prouz. 2001. A GIS-based assessment of potential aquacultural nonpoint source loading in an Atlantic bay (France). *Ecological Applications* 11: 800-814.
- Berry J. K. 1993. Beyond mapping –Concepts, algorithms and issues in GIS. J. Wiley, Fort Collins, U.S.A. 246 p.
- Bhatia V. S., P. Singh, S. P. Wani, G. S. Chauhan, A. V. R. Kesava-Rao, A. K. Mishra, and K. Srinvas. 2008. Analysis of potential yields and yield gaps of rainfed soybean in India using CROPGRO-Soybean model. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 1252–1265.
- Biswas S., N. Kaushik, G. Srikant. 2006. Biodiésel: technology and business opportunities- an insight. In: Singh B., R. Swaminathan, V. Ponraj. (eds). Proceedings of the biodiésel conference toward energy independence-focus on *Jatropha*. June 9-10. New Delhi, India. pp: 303-330.
- Bowen W., J. W. Jones, and P. Torton. 1993. Crop simulation as a potential tool for evaluating sustainable land management. In: Kimble J. M. (ed) Proceedings of the Eight International Soil Management Workshop: Utilization of soil survey information for sustainable land use. Soil Conservation Service USDA. Oregon, California and Nevada U.S.A. pp: 15-21.
- Bowen W., P. Torton, and G. Hoogenboom. 1998. The simulation of cropping sequences using DSSAT. Understanding options for agricultural production. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Deutschland. pp: 89-94.

- Brittaine R., and N. Litaladio. 2010. *Jatropha*: A Smallholder Bioenergy Crop: The Potential for Pro-Poor Development. Integrated Crop Management Vol. 8. FAO, Rome, Italy. 114 p.
- Cabeza M., M. B. Araujo, R. J. Wilson, C. D. Thomas, M. J. R. Cowley, and A. Moitanen. 2004. Combining probabilities of occurrence with spatial reserve design. *Journal of Applied Ecology* 41: 252-262.
- Cano A. L. M. 1992. El piñoncillo (*Jatropha curcas* L.): Una especie oleaginosa con potencial de uso agroindustrial. *Revista la Ciencia y el Hombre* 10: 131-138.
- Carvalho-Lopes D., and A. J. Steidle-Neto. 2011. Simulation models applied to crops with potential for biodiesel production. *Computers and Electronics in Agriculture* 75: 1-9.
- Cassman K. G. 2007. Biocombustibles, seguridad alimentaria e intensificación ecológica de los sistemas agrícolas. International Plant Nutrition Institute. 8 p.
- Centro de Validación y Transferencia de Tecnología-Fundación Produce de Sinaloa (CVTTS-FPS). 2009. Potencial de producción de *Jatropha curcas* en Sinaloa, como una alternativa más para la producción de biodiesel. Informe Técnico. 10 p.
- Chauhan Y. S. 2010. Potential productivity and water requirements of maize-peanut rotations in Australian semi-arid tropical environments — crop simulations study. *Agricultural Water Management* 97: 457–464.
- Comisión de Desarrollo y Medio Ambiente de América Latina y el Caribe. 1991. Nuestra propia agenda sobre desarrollo y medio ambiente. Banco Interamericano de desarrollo, programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y Fondo de Cultura Económica. México D.F., México. 72 p.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2009. *Jatropha curcas*, El motor del bosque. Revista electrónica de la Comisión Nacional Forestal. Núm. 109. 4 p.
- Da Silva G. B., and P. V. Azevedo. 2000. Potencial edafoclimático da “Chapada Diamantina” no estado da Bahia para cultivo de Cítrus. *Revista Brasileira de Agrometeorología* 8: 133-139.
- Deligios P. A. 2009. Adaptation of CROPGRO model to simulate growth and yield of rape seed (*Brassica napus* L var. oleifera D.C.). PhD thesis. Universidad degli Studi di Sassari, Sassari, Italy. 104 p.
- Dogan E., H. Kirnak, and O. Copur. 2007. Effect of seasonal water stress on soybean and site specific evaluation of CROPGRO-soybean model under semi-arid climatic conditions. *Agricultural Water Management* 90: 56-62.
- Domínguez C. E., J. I. López, R. Castillo, y P. Ruiz. 1999. EL COCOTERO *cocos nucifera* L. Manual para la producción en México. INIFAP. CIRGOC. Campo Experimental Huimanguillo. Libro Técnico Núm. 6. Tabasco, México. 132 p.
- Doornbosch R., and R. Steenblik. 2007. Biofuels: is the cure worse than the disease? Round Table on Sustainable Development. OECD paper SG/SD/RT. 11-12 September 2007. Paris, France. 57 p.
- DoveBiotech. 2010. *Jatropha curcas* L. An international botanical answer to biodiesel production & renewable energy. Consultado en línea el 14 de noviembre del 2011 en <http://www.dovebiotech.com/pdf/JATROPHA%20CURCAS%20L.pdf>

- Du B., A. Saleh, D. B. Jaynes, and J. G. Arnold. 2006. Evaluation of SWAT in Simulating Nitrate Nitrogen and Atrazine Fates in a Watershed with Tiles and Potholes. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 49: 949-959.
- Easterling W. E., P. K. Aggarwal, P. Batima, K. M. Brander, L. Erda, S. M. Howden, A. Kirilenko, J. Morton, J. F. Soussana, J. Schmidhuber and F. N. Tubiell. 2007. Food, fiber and forest products. *Climate Change 2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Parry, M. L., O.F. Canziani, J. P. Plutikof, P.J. van der Linden and C. E. Hanson. (eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. pp: 273-313.
- Engler R., A. Guisan, and L. Rechsteiner. 2004. An improved approach for predicting the distribution of rare and endangered species from occurrence and pseudo-absence data. *Journal of Applied Ecology* 41: 263-274.
- Euler H., and D. Gorriz. 2004. Case Study “*Jatropha curcas*”. Technical report. Global Facilitation Unit for underutilized Species. Frankfurt, Germany. 63 p.
- Evans, J. M., R. J. Fletcher, and J. Alavalapati. 2010. Using species distribution models to identify suitable areas for biofuel feedstock production. *GCB Bioenergy* 2: 63-78.
- Fairless D. 2007. Biofuel: the little shrub that could-maybe. *Nature* 449:652-655.
- FAO. 1997. Zonificación agroecológica, Guía general. Boletín de suelos de la FAO 73. Servicio de Recursos, Manejo y Conservación de Suelos Dirección de Fomento de Tierras y Aguas, FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 96 p.
- FAO. 2008a. The State of Food and Agriculture: Biofuels: prospects, risks and opportunities. Rome, Italy. 129 p.
- FAO. 2008b. Assessment of the world food security and nutrition situation. Committee on world food security. Thirty-fourth session. October 14-17, 2008. Rome, Italy. 18 p.
- Faramarzi M., M. Yang, R. Schulin, and K.C. Abbaspour. 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., G. Foidl, M. Sanchez, M. Mittelbach, and S. Hackel. 1996. *Jatropha curcas* L. as a source for the production of biofuel in Nicaragua. *Bioresource Technology* 58:77-82.
- Francis G., R. Endinger, K. A. Becker. 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., and F. Nielsen. 2010. Plant establishment and management. In: Van der Putten E., Y. J. Franken, F. Nielsen, J. de Jongh, W. Rijsenbeek, P. Beerens, J. Van Eijck, T. Galema, G. Groeneveld, N. Ansø, M. Wijnker, T. Adriaans, P. Moers. (eds). *The Jatropha Handbook. From cultivation to application. Fuels from Agriculture in Communal Technology (FACT)*, Eindhoven, Deutschland. 174 p.



- Galagovsky L., and A. Aduriz-Bravo. 2001. Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales el concepto de modelo didáctico analógico. *Enseñanza de las Ciencias* 19: 231-242
- Galvao A., G. R. Pérez, and R. O. Oliveria. 2008. Analysis, design and implementation of biodiésel projects in Brazil. In: *Proceedings of the 110th EAAE Seminar: System Dynamics and Innovation in Food Networks*. February 18-22. Innsbruck, Igl., Austria. pp: 54-64.
- Gharajedaghi J. 2003. Prólogo del libro “Pensamiento sistémico caminar el cambio o cambiar el camino”. Herrscher E.G. (ed). Granica, Buenos aires, Argentina. pp: 15-23.
- García B. J. 1979. Estructura metodológica para la caracterización agroecológica de áreas por procedimientos cuantitativos de análisis y posterior zonificación. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados, Texcoco, Edo. de México, México. 451 p.
- Garg K. K., L. Bharati, A. Gaur, B. George, S. Acharya, K. Jella, and B. Narasimhan. 2011. Spatial mapping of agricultural water productivity using the SWAT model in Upper Bhima Catchment, India. *Irrigation and Drainage*. Publicado en línea en Wiley On line Library.
- Gassman P., M. Reyes, C. H. Green, and J. G. Arnold. 2007. The soil water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50: 1211-1250.
- Giampietro M., and K. Mayumi. 2009. The biofuel delusion. The Fallacy of large scale agro-biofuel production. Earthscan, London, United Kingdom. 320 p.
- Gibson L. A., B. A. Wilson, D. M. Cahill, and J. Hill. 2004. Spatial prediction of rufous-bridled bird habitat in a coastal heath land: A GIS based approach. *Journal of Applied Ecology* 41: 213-223.
- Ginwal H., P. Rawat, and R. Srivastava. 2004. Seed source variation in growth performance and oil yield of *Jatropha curcas* L. in central India. *Silvae Genetica* 53: 186-192.
- Gómez A., M. Rodríguez, C. Montañés, C. Dopazo, and N. Fueyo. 2010. The potential for electricity generation from crop and forestry residues in Spain. *Biomass and Bioenergy* 34: 703-719.
- Gour V. K. 2006. Production practices including post-harvest management of *Jatropha curcas*. In: Singh B., R. Swaminathan, V. Ponraj. (eds). *Proceedings of the biodiésel conference toward energy independence –focus of Jatropha*. New Delhi India. June 9-10. pp: 223-251.
- Gush M. B. 2008. Measurement of water-use by *Jatropha curcas* L. using the heat-pulse velocity technique. *Water SA* 34: 579-584.
- Gush M. B., and J. Hallows. 2007. *Jatropha curcas* literature review. In: Holl M., M. B. Gush, J. Hallows, D. B. Versfeld (eds). *Jatropha curcas* in South Africa: An assessment of its water use and bio-physical potential. Water Research Commission. Pretoria, RSA, WRC. Report 1497/1/07. Chapter 2. pp: 7-33.
- Guzman E., J. Bonini, D. Matamoros. 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. 66 p.
- Henning R. K. 2003. *Jatropha curcas* L. in Africa: Assessment of the impact of the dissemination of the *Jatropha* system on the ecology of the rural areas and the social and economic situation of the rural population (target group) of selected countries in Africa. Global Facilitation Unit for underutilized Species. Weissensberg, Germany. 49 p.
- Hernández C. J. M., A. Olivera, A. Palacios, A. Sandoval, M. Grajales, J. D. Estrada, E. Domínguez, M. Alonso, E. Ortiz, L. N. Ávila, A. Alejo, M. A. Coutiño, y V. W. Gonzales. 2006. Tecnología para la producción de palma de aceite *Elaeis guineensis* Jacq. En México. 2° ed. INIFAP. Libro Técnico Núm. 14. México. 149 p.
- Hernández N., F. Soto, A. Caballero. 2009. Revisión bibliográfica. Modelos de simulación de cultivos. Características y usos. Cultivos Tropicales 30:73-82.
- Herrscher E. G. 2003. Pensamiento sistémico caminar el cambio o cambiar el camino. Granica, Buenos Aires, Argentina. 273 p.
- Hewson J., E. Ashkenazi, M. Steininger, and C. Dragisic. 2009. Using geospatial technology to map potential biofeedstock crop cultivation zones and identify potential conflict with areas of high biodiversity or ecosystem service value. Conservation International. US Department of Energy. 26 p.
- Hallowes J. 2007. Bio-physical potential of *Jatropha curcas*. In: Holl M., M. B. Gush, J. Hallowes and D. B. Versfeld (eds). 2007. *Jatropha curcas* in South Africa: an assessment of its water use and bio-physical potential. Water Research Commission, Pretoria, RSA, WRC Report. 1497/1/07, Chapter 3. pp: 34-57.
- Hughes J. K., A. J. Lloyd, C. Huntingford, W. Finch, and J. Harding. 2010. The impact of extensive planting of *Miscanthus* as an energy crop on future CO<sub>2</sub> atmospheric concentrations. GCB Bioenergy 2:79-88.
- Ibarra-Gómez A. X. 2011. Diseño de una planta productora de biodiésel a partir de *Jatropha curcas* L. Mediante una catálisis enzimática. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico de Veracruz, Veracruz, Ver., México. 172 p.
- Imagen del golfo. 2008. Inauguran Expo-Forestal: Cultivarán *Jatropha curcas* en Veracruz, 50,000 has. 4 de septiembre <http://www.imagendelgolfo.com.mx/resumen.php?id=73640>. Consultado en línea el 16 de octubre del 2008.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) 2007a. Atlas de la Bioenergía y los Biocombustibles en las Américas. I. Etanol. IICA, San José, Costa Rica. 181 p.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) 2007b. Atlas de la Bioenergía y los Biocombustibles en las Américas. II. Biodiésel. IICA, San José, Costa Rica. 346 p.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 2010. América Latina y el Caribe: Mapeo político-institucional y análisis de la competencia entre producción de alimentos y bioenergía. San José, Costa Rica. 96 p.
- Instituto Indio de Tecnología Delhi (IITD). 2006. Modelling Effect of *Jatropha* on Water Resources of Chhattisgarh. Fourth Report to European Union New Delhi, India. 43 p.

- 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. 70 p.
- 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 en línea el 7 de enero del 2012.
- International Crops Research Institute for the Semi-arid Tropics (ICRISAT). 2007. Pro-Poor Biofuels Outlook for Asia and Africa: ICRISAT's Perspective. A Working Paper-ICRISAT. India. 40 p.
- International Energy Agency (IEA). 2008. World Energy Outlook. Executive Summary. 5 p.
- IPCC. 2007b. Summary for Policymakers. In: Metz B., O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, y L. A. Meyer (eds). Climate Change 2007. Mitigation: Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. pp: 2-23.
- Jeganathan P., R. E. Green, K. Norris, I. N. Vogiatzakis, A. Bartsch, S. R. Wotton, C. G. R. Bowden, G. H. F. Griffiths, D. Pain, and A. R. Rahmani. 2004. Modeling habitat selection and distribution of the critically endangered Jerdon's courser *Rhinoptilus bitorquatus* in scrub jungle: An application of a new tracking method. *Journal of Applied Ecology* 41: 224-237.
- Jenks, G. F. 1967. The Data Model Concept in statistical Mapping. *International Yearbook of Cartography* 7: 186-190.
- Johnson C. J., D. R. Seip, and M. S. Boyce. 2004. A quantitative approach to conservation planning: Using resource selection functions to map the distribution of a mountain caribou at multiples spatial scales. *Journal of Applied Ecology* 41: 238-251.
- Jongschaap R. E. E., W. J. Corré, P. S. Bindraban, and W. A. Brandenburg. 2007. Claims and facts of *Jatropha curcas* L. Global *Jatropha curcas* evaluation, breeding and propagation program. Wageningen Plant Research International. Report 158. Deutschland. 66 p.
- Kaushik N., K. Kumar, S. Kumar, N. Kaushik, and S. Roy. 2007. Genetic variability and divergence studies in seed traits and oil content of *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.) accessions. *Biomass and Bioenergy* 31: 497-502.
- Keating B. A., P. S. Carberry, G. L. Hammer. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* 18: 267-288.
- Kehira A. A. A., N. M. M. Atta. 2009. Response of *Jatropha curcas* L. to water deficit: yield, water use efficiency and oilseed characteristics. *Biomass and Bioenergy* 33: 1343-1350.
- Ko J., G. Piccinni, and E. Steglich. 2009. Using EPIC model to manage irrigated cotton and maize. *Agricultural Water Management* 96: 1323–1331.

- Krishna-Murthy V. R. 2003. Crop growth modeling and its applications in agricultural. In: Sivakumar M. V. K., H. Donald. (eds). Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology. World Meteorological Organization. pp. 235-261.
- La Jornada Michoacán. 2007. Cultivo de higuierilla y *Jatropha*, innovación en la vocación agrícola de la entidad. 27 de agosto. <http://www.lajornadamichoacan.com.mx/2007/08/27>. Consultado el 17 de febrero del 2009.
- Laux P., G. Jackel, R. Munang-Tigem, and H. Kunstmann. 2010. Impact of climate change on agricultural productivity under rainfed conditions in Cameroon- A method to improve attainable crop yields by planting date adaptations. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 1258-1271.
- Lehman A., J. McOverton, and M. P. Austin. 2002. Regression models for spatial prediction: Their role for biodiversity and conservation. *Biodiversity and Conservation* 11:2085-2092.
- Leiva F. R., J. Y. Buitrago, J. Rodríguez, and L. Guerrero. 2008. Aproximación a la agricultura de precisión (AP) en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en Colombia. En: Leiva F.R. (ed). *Agricultura de precisión en cultivos transitorios*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. pp: 43-71.
- Lenz-Wiedemann V. I. S., C. W. Klar, K. Schneider. 2010. Development and test of a crop growth model for application within a Global Change decision support system. *Ecological Modelling* 221: 314-329.
- Levine D. A., C. T. Hunsaker, S. P. Timmins, and J. Beau-champ. 1993. A geographic information system approach to modeling nutrient and sediment transport. Environmental Sciences Division, Publication 3993. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. 182 p.
- Licona-Santana, J., M. R. Martínez-Menes, L. E. Mendoza-Onofre, B. Figueroa-Sandoval, D. S. y Fernández-Reynoso. 2005. Uso del modelo EPIC para estimar rendimientos de maíz en base en variables fisiotécnicas en el oriente del Estado de México. *Terra Latinoamericana* 24: 283-291.
- Liu J. 2009. A GIS-based tool for modeling large-scale crop-water relations. *Environmental Modeling & Software* 24: 411-422.
- Liu J., J. R. Williams, A. J. B. Zehnder, and H. Yang. 2007. GEPIIC-modeling wheat and crop water productivity with high resolution on a global scale. *Agricultural Systems* 94: 478-493.
- Luo Y., C. He, M. Sophocleous, Z. Yin, R. Hongrui, and Z. Ouyang. 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., A. Trabucco, W. M. J. Achten, and B. Muys. 2009. Climatic growing conditions of *Jatropha curcas* L. *Biomass and Bioenergy* 33:1481-1485.
- Makkar H. P. S., A. O. Aderibigbe, and K. Becker. 1998a. Comparative evaluation of non-toxic and toxic varieties of *Jatropha curcas* for chemical composition, digestibility, protein degradability and toxic factors. *Food Chemistry* 62: 207-215.

- Makkar, H. P. S., K. Becker, and B. Schmook. 1998b. Edible provenances of *Jatropha curcas* from Quintana Roo state of México and effect of roasting on anti nutrient and toxic factors in seeds. *Plant Foods for Human Nutrition* 52: 31-36.
- Makkar H. P. S., K. Becker. 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: Gübitz G. M., M. Mittelbach, M. Trabi, (eds). *Biofuel and industrial products of Jatropha curcas- Proceedings from the symposium "Jatropha 97,"* Managua, Nicaragua, February 23-27. Dbv-Verlag, Graz, Austria. pp: 190-205.
- Malone R. W., N. Huth, P. S. Carberry, L. Ma, T. C. Kaspar, D. L. Karlen, T. Meade, R. S. Kanwar, P. Heilman. 2007. Evaluation and predicting agricultural management effects under tile drainage using modified APSIM. *Geoderma* 140: 310–322.
- Martinez F. J. L. 1984. Zonificación agroecológica para los cultivos del naranjo (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) y limón mexicano (*Aurantifolia christm Swingle*) en el estado de Oaxaca, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. de México, México. 890 p.
- Martínez H. J. 2007. El Piñón mexicano: Una alternativa bioenergética para México. *Revista Digital Universitaria-UNAM* Vol. 8. 9 p.
- Martínez-Dávila J. P., y L. Bustillo-García. 2010. La autopoiesis social del desarrollo rural sustentable. *Interciencia* 35: 223-229.
- Masera O., M. Astier, y S. López-Ridaura. *Sustentabilidad y Manejo de Recursos Naturales. El Marco de Evaluación MESMIS.* 1999. Mundi-Prensa. 1ª edición. México, D.F., Mexico. 109 p.
- Matthews R., and W. Stephens. 2002. *Crop simulation models. Application in developing countries.* CABI publishing, London, United Kingdom. 304 p.
- Matthews R., W. Stephens, T. Hess, T. Middleton, and A. Graves. 2002. Applications of crop soil simulation models in tropical agricultural systems. *Advances in Agronomy* 76: 31-109.
- McCown R. L., G. L. Hammer, J. N. G. Hargreaves, D. P. Holzworth, and D. M. Freebairn. 1996. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural system research. *Agricultural Systems* 50: 255-271.
- Meehl G. A., T. F. Stocker, W. D. Collins, P. Friedlingstein, A. T. Gaye, J. M. Gregory, A. Kitoh, R. Kanutti, J. M. Murphy, A. Noda, S. C. B. Raper, I. G. Watterson, A. J. Weaver, and A. C. Zhao. 2007. Global Climate Projections. In: Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds). *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. pp: 747-845.
- Mercau J. L., J. L. Dardanelli, D. J. Collino, J. M. Andriani, A. Irigoyen, and E. H. Satorre. 2007. Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGROsoybean. *Field Crops Research* 100: 200–209.
- Ministerio del Ambiente y Energía. 2008. Programa Nacional de Biocombustibles. Resumen Ejecutivo. Costa Rica. 50 p.

- Narasimhan B., R. Srinivasan, J. G. Arnold, and M. Di Luzio. 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.
- Ndong R., M. Montrejaud-Vignolesk, O. Saint Girons, B. Gabrielle, R. Pirot, M. Domergue, and C. Sablayrolles. 2009. Life Cycle Assessment of Biofuels from *Jatropha curcas* in West Africa: A Field Study. *GCB Bioenergy* 1: 197–210.
- Neitsch S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams. 2005. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Backland Research Center. Texas, U.S.A. 494 p.
- Ng T. L., J. W. Eheart, X. Cai, F. Miguez. 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., and M. A. Goytia-Jiménez. 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.
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). 2007. A review of policy measures supporting production and use of bioenergy. Working Party on Agricultural Policies and Markets. Final Report. 51 p.
- Organization for Economic Co-Operation and Development (OECD). 2008. Economic assessment of biofuels support policies. Directorate for Trade and Agriculture, OECD. 119 p.
- Ouwens K. D., G. Francis, J. Franken, W. Rijssenbeek, A. Riedacker, N. Foidl, R. Jongschaap, and P. Bindraban. 2007. Position Paper on *Jatropha curcas*. State of the Art: Small and Large Scale Project Development. Fuels from Agriculture in Communal Technology (FACT). Deutschland. 7 p.
- Pant K. S., V. Khosla, D. Kumar, and S. Gairola. 2006. Seed oil content variation in *Jatropha curcas* L. in different altitudinal ranges and site conditions in H. P. India. *Lyonia* 11: 31-34.
- Parra M., M. Perales, F. Inzunza, C. Solano, E. Hernández, A. Santos. 1984. La regionalización socioeconómica: Una perspectiva agronómica. *Geografía Agrícola*. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. de México, México. pp: 5-6.
- Parry M. L., O. F. Canziani, and J. P. Plutikof. 2007. Technical Summary. Climate Change 2007. In: Parry, M. L., O. F. Canziani, J. P. Plutikof, P.J. van der Linden and C. E. Hanson, (eds). Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. pp: 23-78.
- Pecina-Quintero V., J. L. Anaya-López, A. Zamarripa-Colmenero, N. Montes-García, C. A. Núñez-Colín, J. L. Solís-Bonilla, M. R. Aguilar-Rangel, H. R. Gill-Langarica, and D. J. Mejía-Bustamante. 2011. Molecular characterization of *Jatropha curcas* L. genetic resources from Chiapas, México through AFLP markers. *Biomass and Bioenergy* 35: 1897-1905.

- Pereyra-Irujo G. A., L. A. N. Aguirrezábal. 2007. Sunflower yield and oil quality interactions and variability: Analysis through a simple simulation model. *Agricultural and Forest Meteorology* 143: 252-265.
- Pompelli M. F., R. Barata-Luis, H. S. Vitorino, E. R. Gonçalves, E. V. Rolim, M. G. Santos, J. S. Almeida-Cortez, V. M. Ferreira, E. E. Lemos, and L. Endres. 2010. Photosynthesis, photoprotection and antioxidant activity of purging nut under drought deficit and recovery. *Biomass and Bioenergy* 34: 1207-1215.
- Popluechai S., D. Breviario, S. Mulpuri, H. Makkar, M. Roarane, A. Reddy, E. Palchetti, A. Gatehouse, K. Syers, A. O'Donnell, and A. Kohli. 2009. Narrow genetic and apparent phenetic diversity in *Jatropha curcas*: initial success with generating low phorbol ester interspecific hybrids. Available from Nature Proceedings: <http://www.precedings.nature.com/documents/2782/version/1>. Consultado en línea el 18 de junio del 2009.
- Portilla-Pérez, E., y D. Geissert-Kientz. 2006. Zonificación agroecológica de sistemas agroforestales: el caso café (*Coffea arabica* L.)- palma camedor (*Chamaedorea elegans* Mart.). *Interciencia* 31: 556-562.
- Price L., M. Billard, H. Lyons, S. Anthony, and P. Nixon. 2002. Identifying the yield potential of *Miscanthus giganteus*: an assessment of spatial and temporal variability of M. x giganteus biomass productivity across England and Wales. *Biomass and Bioenergy* 26: 3-13.
- Priya S., R. Shibasaki. 2001. National spatial crop yields simulation using GIS-based crop production model. *Ecological Modelling* 135: 113-129.
- Probst O. 2007. Experiencias y perspectivas de la producción de biodiésel en México. *Agronegocios en un Nuevo Ambiente Global; Oportunidades y Retos*. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey. México. Presentación en Power Point. 44 transparencias. <http://fisica.mty.itesm.mx/>, <http://homepages.mty.itesm.mx/oprobst/>. Consultado en línea el 19 de junio del 2009.
- Putto C., A. Patanothai, S. Jogloy, K. Pannangpetch, K. J. Boote, and G. Hoogenboom. 2009. Determination of efficient test sites for evaluation of peanut breeding lines using the CSM-CROPGRO-peanut model. *Field Crops Research* 110: 272–281.
- Radakrishna P. 2007. Contribution of de-oiled cakes in carbon sequestration and as a source of energy, in Indian agriculture-need for a policy initiative. In: *Proceedings of the fourth international biofuels conference*. February 1-2. New Delhi, India. pp: 65-70.
- Raju A. J. S., and V. Ezradanam. 2002. Pollination ecology and fruiting behavior in a monoecious species, *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae). *Current Science* 83: 1395-1398.
- Ramalho-Filho A. 2008. Agro-ecological zoning for oil palm in deforested areas of Brazilian Amazon. *Bioenergy and Biodiversity Joint International Workshop on High Nature Value Criteria and potential sustainable use of degraded lands*. Paris France. 38 p.
- Ranade S. A., A. P. Srivastava, T. S. Rana, J. Srivastava, and R. Tuli. 2008. Easy assessment of diversity of *Jatropha curcas* L. Plants using two single-prime amplification reaction (SPAR) methods. *Biomass and Bioenergy* 32: 533-540.

- Reinhardt G., S. Gärtner, N. Rettenmaier, J. Münch, E. Von Falkenstein. 2007. Screening Life Cycle Assessment of *Jatropha* biodiésel. Final Report. IFEU-Institute for Energy and Environmental Research. Heidelberg, Germany. 62 p.
- Reubens B., W. M. J. Achten, W. H. Maes, F. Danjon, R. Aerts, J. Poesen, B. Muys. 2011. More than biofuel? *Jatropha curcas* root system symmetry and potential for soil erosion control. *Journal of Arid Environments* 75: 201-205.
- Richards C. E., C. L. Munster, D. M. Vietor, J. G. Arnold, R. White. 2008. Assessment of a turfgrass sod best management practice on water quality in a suburban watershed. *Journal of Environment Management* 86: 229-245.
- Rinaldi M. 2001. Application of EPIC model for irrigation scheduling of sunflower in Southern Italy. *Agricultural Water Management* 49: 185–196.
- Rivera-Lorca, J. A., and J. C. Ku-Vera. 1997. Chemical composition of three different varieties of *J. curcas* from México. In: Gübitz, G. M., M. Mittelbach, M. Trabi (eds) *Biofuel and industrial products of Jatropha curcas- Proceedings from the symposium "Jatropha 97"*, Managua, Nicaragua. February 23-27. Dbv-Verlag, Graz, Austria. pp: 190-205.
- Rojas E. O. 1985. Esquema metodológico para la zonificación agroecológica de cultivos de IICA. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Memoria Curso Internacional sobre la Agroclimatología. San Salvador, El Salvador. pp: 64-73.
- Rojas G. A. F., E. Girón-Gallegos, y H.G. Torres-Castañeda. 2009. Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales: una revisión - catálisis química. *Ingeniería e Investigación* 29:17-22.
- Romo J. R. 1985. Zonas con potencial agroclimático para la producción de cinco oleaginosas bajo temporal en la República Mexicana. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. de México, México. 181 p.
- Rusmayandi G., H. Yonny., D. Hadjar. 2008. Radiation use efficiency as basis the crops modeling of *Jatropha*. *Jurnal Agromet Indonesia* 22: 72-79.
- Sadras V., J. Baldock, D. Roget, and D. Rodriguez. 2003. Measuring and modeling yield and water budget components of wheat crops coarse-textured soils with chemicals constraints. *Field Crops Research* 84: 241–260.
- Sanchez O. J., C. A. Cardona. 2005. Producción biotecnológica de alcohol carburante: obtención a partir de diferentes materias primas. *Interciencia* 30: 671-678.
- Sánchez-Carrillo J. 1999. Agroclimatología .Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Universidad Central de Venezuela. Caracas Innovación Tecnológica, Caracas Venezuela. 147 p.
- Santa Barbara, J. 2007. The false promise of biofuels. A special report from the international forum on globalization and the institute for policy studies. E.U.A. 31 p.
- Saxton K. E., W. J. Rawls, J. S. Romberger, and R. I. Papendick. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal* 50: 1031-1036.



- Schmook B., L. Serralta-Peraza. 1997. *Jatropha curcas*: Distribution and uses in the Yucatán peninsula of México. In: Gübitz, G. M., M. Mittelbach, M. Trabi (eds) Biofuel and industrial products of *Jatropha curcas*- Proceedings from the symposium “*Jatropha 97*”, Managua, Nicaragua. February 23-27. Dbv-Verlag, Graz, Austria. pp: 53-57.
- 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. 9 p.
- 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. 42 p.
- Secretaría de Energía (SENER). 2006. Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y biodiésel para el transporte en México. Resumen Ejecutivo. Gobierno Federal, México, D. F., México. 7 p.
- Seeman J., Y. I. Chirkov, J. Lomas, and B. Primault. 1979. Agrometeorology. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society. Springer-Verlag, Berlin, Germany. 324 p.
- Severino L. S., L. S. Do Vale, N. E. De Macêdo-Beltrão. 2007. A simple method for measurement of *Jatropha curcas* leaf area. Revista Brasileira Ol Fibras, Campina Grande 11: 9-14.
- Sharma D. K., A. Pandey, K. Lata. 2009. Use of *Jatropha curcas* hull biomass for bioactive compost production. Biomass and Bioenergy 33: 159-162.
- Sharpley A. N., and J. R. Williams. 1990. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator. USDA. Agricultural Research Service, Technical Bulletin No. 1768, Washington, D.C. E.U.A. 235 p.
- Simms A. 2002. GIS and aquaculture: Assessment of soft-shell clam sites. Journal of Coastal Conservation 8: 35-47.
- Singh R. N., D. K. Vyas, N. S. L. Srivastava, and M. Narra. 2008. SPRERI experience on holistic approach to utilize all parts of *Jatropha curcas* fruit for energy. Biomass and Bioenergy 33: 1868-1873.
- Smith P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, B. Scholes, and O. Sirotenko. 2007: Agriculture. In: Metz B., O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds). Climate Change 2007: Mitigation: Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. pp: 25-93.
- Solis-Guzman B.F. 2011. Potencial de integración del piñón (*Jatropha curcas* L.) a agroecosistemas de la Región Centro Chiapas, México. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz. Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, México. 70 p.

- Solomon S., D. Qin, M. Mannering, R. B. Alley, T. Berntsen, N. L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J. M. Gregory, G. C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B. J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T. F. Stocker, P. Whetton, R. A. Wood and D. Wratt. 2007. Technical Summary. In: Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds). *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. pp: 19-91.
- Srinivanstan R., X. Zhang, and J. Arnold. 2010. SWAT ungauged: Hydrological budget and crop yield predictions in the upper Mississippi river basin. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 53: 1533-1546.
- Soil Science Society of America (SSSA).1995. Statement on soil quality. *Agronomy News* pp: 6-7.
- Sudduth K. A., C. W. Fraisse, S. T. Drummont, and N. R. Kitchen. 1998. Integrating spatial data collection, modeling and analysis for precision agriculture. First international conference on geospatial information in agriculture and foresting, Lake Buena Vista, Florida. E.U.A. pp: 29-36.
- Sukarin W., Y. Yamada, and S. Sakaguchi. 1987. Characterization of physic nut, *Jatropha curcas* L. as a new biomass crop in the tropics. *Japan Agricultural Research Quarterly* 20: 302-303.
- Sun Q., L. Li, Y. Li, G. Wo, and X. Ge. 2008. SSR and AFLP markers reveal low genetic diversity in the biofuel plant *Jatropha curcas* in China. *Crop Science* 48: 1865-1871.
- Sunil N., K. S. Varaprasad, N. Sivaraj, T. S. Kumar, B. Abraham, and R. B. N. Prasad. 2008. Assessing *Jatropha curcas* L. germplasm in-situ a case study. *Biomass and Bioenergy* 32: 198-202.
- Tan G., and R. Shibasaki. 2003. Global estimation crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration. *Ecological Modeling* 168: 357-370.
- Thorp K. R., R. W. Malone, and D. B. Jaynes. 2007. Simulating long-term effects of nitrogen fertilizer application rates on corn yield and nitrogen dynamics. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50: 1287–1303.
- Tinoco A. C., F. A. Rodríguez, J. A. Sandoval, S. Barrón, A. Palafox, V. A. Esqueda. 2002. Manual de producción de maíz para los estados de Veracruz y Tabasco. Libro Técnico No. 9. SAGARPA. INIFAP. CIRGOC. Campo Experimental Papaloapan. Veracruz, México. 113 p.
- Tiwari A. K., A. Kumar, H. Raheman. 2007. Biodiesel production from *Jatropha* (*Jatropha curcas*) with high free fatty acids: an optimized process. *Biomass and Bioenergy* 31: 569-575.
- Tollefson J. 2008. Not your father's Biofuels. *Nature* 451: 880-883.
- Trabucco A., W. M. J. Achten, C. Bove, R. Aerts, J. Van Orshoven, L. Norgroves, B. Muys. 2010. Global mapping of *Jatropha curcas* yield based on response of fitness to present and future climate. *GCB Bioenergy* 2: 139-151.
- Tsihrintzis A. V., R. Hamid, and H. R. Fuentes. 1996. Use of geographic information system (GIS) in water resources. *Water Resources Management* 10: 251-277.

- United Nations Department of Economic and Social Affairs (UNDESA). 2007. Small-scale production and use of liquid biofuels in Sub-Saharan Africa: Perspectives for sustainable development. Background paper No. 2. Energy and Transport Branch. Division for Sustainable Development. United Nations Department of Economic and Social Affairs. 51 p.
- United States of America-Department of Energy (USA-DOE). 2010. Biomass Energy Data Book. 3<sup>a</sup>. United States of America-Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy. Oak Ridge National Laboratory, E.U.A. 230 p.
- Uresti-Gil J., y D. Uresti-Duran. 2009. Análisis de investigaciones en *Jatropha curcas*: productividad, retorno energético y emisión de gases de efecto invernadero. Documento Interno de Trabajo. Campo Experimental Cotaxtla-CIRGOC-INIFAP. 48 p.
- Uresti-Gil. J., A. X. Ibarra-Gómez., and D. Uresti-Duran. 2010. Evaluación preliminar del biodiésel de *Jatropha (Jatropha curcas)* en el sureste de México. En: Memorias del Segundo Seminario Latinoamericano del Análisis del Ciclo de Vida. 1-4 de junio. Universidad Central "Marta Abreu" de la Villas Santa Clara, Cuba. 10 p.
- Ventura S. J., K. Kim. 1993. Modeling urban nonpoint source pollution with a geographic information system. *Water Resources Bulletin* 29: 189-198.
- Vilaboa J. 2011. Agroecosistemas: Una forma de entender la relación sociedad-naturaleza. *Agroentorno* 131: 27-30.
- Vine M. F., D. Degnan, and C. Hanchette. 1997. Geographic Information Systems: Their Use in Environmental Epidemiologic Research. *Environmental Health Perspective* 105: 598-605.
- Von Braun J. 2007. The world food situation. New driving forces and required actions. Food Policy Report. International Food Policy Research Institute (IFPRI). Washington, D. C., E.U.A. 18 p.
- Walker G. M. 2011. 125th Anniversary Review: Fuel Alcohol Current Production and Future Challenges. *Journal of the Institute of Brewing* 117: 3-22.
- Wang T., M. Li, and N. Wang. 2007. Protecting China Cedar (*Cryptomeria fortunei*) Habitat Using GIS-Based Simulation, Modeling of Existence Probability, and Function Zoning. *Mountain Research and Development* 27: 352-358.
- Whitaker M., and G. Heath. 2009. Life Cycle Assessment of the Use of *Jatropha* Biodiésel in Indian Locomotives. National Renewable Energy Laboratory. U. S. Department of Energy. Technical Report. 89 p.
- Williams E. E., N. J. Rosenberg, M. S. McKenney, C. A. Jones, P. T. Dyke, and J. R. Williams. 1992. Preparing the erosion productivity impact calculator (EPIC) model to simulate crop response to climate change and the direct effects of CO<sub>2</sub>. *Agricultural and Forest Meteorology* 59: 17-34.
- Williams E. E., X. Chen, C. Hays, J. R. Brandle, and H. Zhang. 1996. Improving the validation of model-simulated crop yield response to climate change: an application to the EPIC model. *Climate Research* 6: 263-273.
- Winchell M., R. Srinivasan, M. Di Luzio, and J. G. Arnold. 2007. ArcSWAT Interface for SWAT2005—User's Guide. Blackland Research Center, Texas Agricultural Station and Grassland, Soil and Water Research Laboratory, USDA Agricultural Research Service, Temple, Texas, E.U.A. 436 p.

- Wu W. G., J. K. Huang, and X. Z. Deng. 2010. Potential land for plantation of *Jatropha curcas* as feedstock for biodiésel in China. *Science China Earth Science* 53: 120-127.
- Yang H. S., A. Dobermann, K. Cassman, and D. Walters. 2006. Developing Crop Simulation Model to Suit Diverse Users: Example of Hybrid-Maize Software. In: Fourcaud T., and X. Zhang. (eds). *Proceedings of Plant growth modeling and applications*. pp: 175-180.
- Zahawi R. A. 2005. Establishment and growth of living fence species: an overlooked tool for the restoration of degraded areas in the tropics. *Restoration Ecology* 13: 92-102.
- Zavala I., E. García-Pérez, A. Pérez-Vázquez, C. Ávila-Reséndiz, D. Gonzales-Hernández 2010. Genetic diversity of *Jatropha curcas* L. in Veracruz state, Mexico using Microsatellite markers. *Abstracts of International Conference on Jatropha curcas 2010*. Groningen, Netherlands. pp: 32.