

Changes in temperature and rainfall caused by three crops in the state of Veracruz, Mexico

Cambios en la temperatura y precipitación causados por tres cultivos en el estado de Veracruz, México

Fernando Salas-Martínez¹; Ofelia A. Valdés-Rodríguez^{1*}; Matías Méndez-Pérez²

¹El Colegio de Veracruz. Carrillo Puerto núm. 26. C. P. 91000. Xalapa, Veracruz, México.

²Universidad Veracruzana, Facultad de Instrumentación Electrónica. Circuito Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria. C. P. 91090. Xalapa, Veracruz, México.

*Corresponding author: valdesandrea@yahoo.com.mx.

Abstract

Introduction: The establishment of new crops may cause climatic alterations at the local or regional level.

Objective: To analyze temperature and rainfall variation by simulated replacement of current vegetation through the introduction of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.), jatropha (*Jatropha curcas* L.) and moringa (*Moringa oleifera* Lam.) in the central region of the state of Veracruz, Mexico.

Materials and methods: Simulations of environmental temperature and rainfall for each crop and the control (current conditions: mixed crop, perennial trees, mixed forest and irrigated agriculture) were made with the Regional Climate Model (RegCM4). The model was evaluated by comparative analysis between simulations and observed data, using the mean square error and the root-mean-square error as measures of dispersion.

Results and discussion: Regions with soils devoid of natural vegetation, such as agricultural soils, would have greater climatic variability. In these soils, the displacement of current vegetation by sugarcane would generate the greatest thermal alterations with a decrease of 0.7 °C, while with jatropha and moringa, the decrease would be 0.3 °C. Regarding rainfall, the RegCM4 bias increases when there are high variations in elevation, thus other models should be explored.

Conclusions: The introduction of moringa or jatropha for bioenergy purposes would be a low climatic impact alternative, while sugarcane is not considered suitable for these purposes due to the greater climatic impact that it would have in the region.

Keywords: Regional Climate Model; climatic variability; *Saccharum officinarum*; *Jatropha curcas*; *Moringa oleifera*.

Resumen

Introducción: El establecimiento de nuevos cultivos puede causar alteraciones climáticas a nivel local o regional.

Objetivo: Analizar la variación de temperatura y precipitación mediante la sustitución simulada de la vegetación actual por la introducción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), jatropha (*Jatropha curcas* L.) y moringa (*Moringa oleifera* Lam.) en la región central del estado de Veracruz, México.

Materiales y métodos: Las simulaciones de temperatura ambiente y precipitación para cada cultivo y el control (condiciones actuales: cultivo mixto, árboles perennes, bosque mixto y agricultura de riego) se hicieron con el modelo climático regional (RegCM4). El modelo se evaluó mediante análisis comparativo entre simulaciones y datos observados, usando el error cuadrático medio y la raíz cuadrada del error cuadrático medio como medidas de dispersión.

Resultados y discusión: Las regiones con suelos desprovistos de su vegetación natural, como los suelos de uso agrícola, tendrían mayor variabilidad climática. En estos suelos, el desplazamiento de la vegetación actual por caña de azúcar generaría las mayores alteraciones térmicas con un decremento de 0.7 °C, mientras que con jatropha y moringa, el decremento sería de 0.3 °C. Con respecto a la precipitación, el sesgo del RegCM4 incrementa cuando hay altas variaciones altitudinales, por lo que deben explorarse otros modelos.

Conclusiones: La introducción de moringa o jatropha con fines bioenergéticos sería una alternativa de bajo impacto climático, mientras que la caña de azúcar no se considera apta para estos fines debido a la mayor afectación climática que provocaría en la región.

Palabras clave:

modelo climático regional; variabilidad climática; *Saccharum officinarum*; *Jatropha curcas*; *Moringa oleifera*.

Introduction

Environmental damage, caused by the extraction and use of fossil fuel processes, has generated the need to use less harmful energies such as renewable sources, among which are bioenergetics. These products can be obtained from energy crops, wood from forests, residues from agricultural and forestry processes, and human or animal waste (Hernández-Rodríguez & Hernández-Zárate, 2008).

In Mexico, in the central area of the state of Veracruz, there is potential demand for sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) production for bioenergy purposes (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA], 2009); likewise, oilseeds such as jatropha (*Jatropha curcas* L.) and moringa (*Moringa oleifera* Lam.), which do not compete with food security and can be grown in this area, are recommended for such purposes (Noda-Leyva, Pérez-Vázquez, & Valdés-Rodríguez, 2015). However, the expansion of agriculture for bioenergy production in Mexico and the world is a controversial issue because modifications in plant cover and land-use can alter climatic systems at the local or regional level. For this reason, such modifications are taken as a reference for environmental monitoring, planning programs and climate change assessment (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática [INEGI], 2015).

Assessing environmental variables at local, regional and global levels requires numerical models applied to the climate system in order to estimate the possible effects that human activities would have on the environment's current state (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014). As a reference, there are studies that use numerical models to estimate the effects generated by the planting of bioenergy crops, and they demonstrate that the introduction of crops can modify the climatic conditions of the sites where they are established (Caiazza et al., 2014; Georgescu, Lobell, & Field, 2009; Georgescu, Lobell, Field, & Mahalov, 2013; Hallgren et al., 2013; Khanal, Anex, Anderson, & Daryl, 2013).

In this context, the objective of this study was to analyze the climatic variables of temperature and rainfall through the simulated replacement of the current vegetation with three bioenergy crops (sugarcane, jatropha and moringa) in the central region of the state of Veracruz, Mexico. The analysis was made with the Regional Climate Model (RegCM) version 4 (RegCM4). This model is important in climate study, since it has a regional focus; in addition, it has the advantage of being free-to-access and is feasible to install in medium level computer equipment, thus it can be used in developing countries or countries with limited economic resources (Elguindi et al., 2013).

Introducción

Los daños al medio ambiente, provocados por los procesos de extracción y utilización de combustibles fósiles, han generado la necesidad de implementar energías menos dañinas como las fuentes renovables, dentro de las cuales se encuentran los bioenergéticos. Estos productos pueden obtenerse de cultivos energéticos, madera de los bosques, residuos de procesos agrícolas y forestales, y desechos humanos o animales (Hernández-Rodríguez & Hernández-Zárate, 2008).

En México, en la zona centro del estado de Veracruz, existe demanda potencial para la producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) con fines bioenergéticos (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SAGARPA], 2009); asimismo, las especies oleaginosas como la jatropha (*Jatropha curcas* L.) y la moringa (*Moringa oleifera* Lam.), que no compiten con la seguridad alimentaria y que pueden cultivarse en este sitio, son recomendables para dichos fines (Noda-Leyva, Pérez-Vázquez, & Valdés-Rodríguez, 2015). No obstante, la expansión de la agricultura para la producción de bioenergéticos en México y en el mundo es un tema controversial, debido a que las modificaciones en la cobertura vegetal y el uso del suelo pueden alterar los sistemas climáticos a nivel local o regional. Por tal razón, dichas modificaciones se toman como referencia para el monitoreo ambiental, los programas de planeación y la evaluación del cambio climático (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática [INEGI], 2015).

Las evaluaciones de las variables ambientales a nivel local, regional y global requieren modelos numéricos aplicados al sistema climático con el fin de estimar los posibles efectos que las actividades humanas ocasionarían sobre el estado actual del medio ambiente (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014). Como referencia, existen estudios que utilizan modelos numéricos para estimar los efectos generados por la siembra de bioenergéticos, y demuestran que la introducción de cultivos sí puede modificar las condiciones climáticas de los sitios donde se establecen (Caiazza et al., 2014; Georgescu, Lobell, & Field, 2009; Georgescu, Lobell, Field, & Mahalov, 2013; Hallgren et al., 2013; Khanal, Anex, Anderson, & Daryl, 2013).

En tal contexto, el objetivo de este estudio fue analizar las variables climáticas de temperatura y precipitación mediante la sustitución simulada de la vegetación actual por la introducción de tres cultivos bioenergéticos (caña de azúcar, jatropha y moringa) en la región central del estado de Veracruz, México. El análisis se hizo con el modelo climático regional (RegCM, por sus siglas en inglés) versión 4 (RegCM4). Dicho modelo es importante en el estudio climático, ya que tiene un enfoque regional; además, tiene la ventaja de ser de uso libre y factible para su instalación en equipos de cómputo de

Materials and methods

Study area

The study area is located between geographical coordinates 18.6° and 19.8° N and 97.4° and 96.0° W. It covers an area of 20328 km² in the central mountainous region of the state of Veracruz, Mexico. Twelve sugar mills and four alcohol plants are located in the area (Figure 1). The four alcohol plants produce ethanol for sale as fuel in the Veracruz-Boca del Río urban area (Agüero-Rodríguez, Tepetla-Montes, & Torres-Beristaín, 2015). Based on the above, it is deduced that the study area has a potential demand for sugarcane, jatropha and moringa production for bioenergy purposes, which in turn could also encourage the production of biodiesel, as has been proposed by SAGARPA (2009).

RegCM4

Mexico currently has no information related to the implementation of RegCM4 for assessing land-use changes; however, at the international level, there are studies on future scenarios in Africa, in the region known as the Greater Horn of Africa (Otieno & Anyah, 2012), in three Himalayan glaciers (Zaman, Waqas, & Rasul, 2011) and in China (Hua, Chen, & Li, 2015).

RegCM4 is a regional climate model developed and distributed by the International Centre for Theoretical Physics (ICTP). RegCM4 was the first limited area model for studying long-term climate, which is why this methodological approach was used in this study.

The model is mainly composed of three stages: pre-processing, numerical integration and post-processing. The land-surface characteristics and processes are represented by a biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS), which consists of describing the vegetation-soil interaction in the energy, momentum and water transfers between the surface and the atmosphere (Dickinson, Henderson-Sellers, & Kennedy, 1993). With the BATS scheme, a land cover type is assigned to each point of the model mesh. Currently, RegCM4 considers 22 land-use and vegetation classes (Table 1), taken from BATS modifications and updates, although two types have also been added, which are urban and suburban environments. This is because such environments modify not only the albedo and the surface energy balance, but also create impermeable surfaces with large effects on runoff and evapotranspiration (Elguindi et al., 2013).

Sequence for land-use allocation and simulations

Step 1

Current land-use and vegetation of the study area were obtained from series V land-use and vegetation map

nivel medio, por lo que se puede utilizar en países en vías de desarrollo o con recursos económicos limitados (Elguindi et al., 2013).

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio se encuentra entre las coordenadas geográficas 18.6° y 19.8° LN y 97.4° y 96.0° LO, tiene una superficie de 20328 km² y representa la región montañosa central del estado de Veracruz, México. En la zona se encuentran 12 ingenios azucareros y cuatro alcoholeras (Figura 1). Estas cuatro empresas producen etanol para consumo y venta como combustible en la zona conurbada Veracruz-Boca del Río (Agüero-Rodríguez, Tepetla-Montes, & Torres-Beristaín, 2015). Con base en lo anterior, se deduce que en la zona de estudio existe demanda potencial para la producción de caña de azúcar, jatropha y moringa con fines bioenergéticos, lo que a su vez podría incentivar también la producción de biodiesel, tal como lo ha planteado la SAGARPA (2009).

Modelo RegCM4

Actualmente, en México no hay información relacionada con la implementación del modelo RegCM para la evaluación de los cambios de uso de suelo; sin embargo, a nivel internacional, hay estudios sobre escenarios futuros en África, en la región conocida como el Gran Cuerno de África (Otieno & Anyah, 2012), en tres glaciares del Himalaya (Zaman, Waqas, & Rasul, 2011) y en China (Hua, Chen, & Li, 2015).

El RegCM4 es un modelo climático regional, actualmente en su versión 4, desarrollado y distribuido por el Centro Internacional de Física Teórica (ICTP, por sus siglas en inglés). El RegCM4 fue el primer modelo de área limitada para el estudio del clima a largo plazo, razón por la cual se utilizó esta aproximación metodológica en el presente estudio.

El modelo está compuesto principalmente por tres etapas: preprocesamiento, integración numérica y posprocesamiento. Las características y los procesos en superficie son representados por un esquema de transferencia biosfera-atmósfera (BATS por sus siglas en inglés), el cual consiste en describir la interacción de la vegetación y el suelo en los intercambios de energía, momento y agua entre la superficie y atmósfera (Dickinson, Henderson-Sellers, & Kennedy, 1993). Con el esquema BATS se asigna un tipo de cobertura de suelo a cada punto de la malla del modelo. Actualmente, el modelo RegCM4 reconoce 22 clases de uso de suelo y vegetación (Cuadro 1), tomadas de las modificaciones y actualizaciones de BATS, aunque también se han agregado dos tipos, que son entornos urbanos y

Table 1. Land-use and vegetation of the regional climatic model RegCM4.**Cuadro 1. Usos de suelo y vegetación del modelo climático regional RegCM4.**

Class/ Clase	Land-use and vegetation/ Uso de suelo y vegetación	Class/ Clase	Land-use and vegetation/ Uso de suelo y vegetación
1	Agriculture/mixed crops/ Agricultura/cultivos mixtos	12	Ice cap/glaciers/Capa de hielo/glaciares
2	Grasslands/Pastizales	13	Bog/Pantano
3	Perennial needleleaf tree/ Árbol perenne de hoja acicular	14	Inland water/Cuerpos de agua
4	Deciduous needleleaf tree/ Árbol caducifolio de hoja acicular	15	Ocean/Océano
5	Deciduous broadleaf tree/ Árbol caducifolio de hoja ancha	16	Evergreen shrub/Arbusto de hoja perenne
6	Perennial broadleaf tree/ Árbol perenne de hoja ancha	17	Deciduous shrub/Arbusto caducifolio
7	Tall grass/Hierba alta	18	Mixed woodland/Bosque mixto
8	Desert/Desierto	19	Forest/Field mosaic/Bosque/campo mosaico
9	Tundra/Tundra	20	Water and land mixture/Mezcla de agua y tierra
10	Irrigated agriculture/Agricultura de riego	21	Urban area/Área urbana
11	Semi-desert/Semidesierto	22	Suburban area/Área suburbana

(LUVM) (INEGI, 2015), which represents the spatial distribution of natural and induced vegetation types, and agricultural areas. This map has more than 60 classes of land-use for the Mexican territory; it was developed from remote sensing and supported with field verification between 2011 and 2013. Using data from the BATS cartographic information of the RegCM, the study region areas contained in the LUVM were reclassified into the classes considered by the model (Table 1).

Step 2

The selection of the period is a requirement to be able to start with the future scenarios. The period covered from 2000 to 2010 and was selected on the basis of the availability of both climate (temperature and rainfall) and cartographic (LUVM) information, the latest updates of which are only available up to 2010.

Step 3

The first approach, known as the mother domain (Figure 1), consists of a domain that covers a large part of Mexico and simulates the atmospheric conditions of the selected period (2000-2010); the spatial resolution was 27 km and the temporal resolution every three hours. Initial and boundary conditions were provided through ERA-Interim reanalysis data with a 1.5° x 1.5° spatial resolution and a six-hourly temporal resolution. These data were selected because they present a considerable improvement in the hydrological cycle description, atmospheric circulation quality and meteorological fields (Dee et al., 2011).

suburbanos. Esto debido a que dichos entornos modifican no solo el albedo y el equilibrio energético de la superficie, sino que también crean superficies impermeables con grandes efectos en escorrentía y evapotranspiración (Elguindi et al., 2013).

Secuencia para la asignación del uso de suelo y simulaciones

Paso 1

El uso de suelo y la vegetación actual de la región de estudio se obtuvieron de la carta de uso de suelo y vegetación serie V (CUSV) del INEGI (2015), la cual representa la distribución espacial de los tipos de vegetación natural e inducida y las áreas agrícolas. Dicha carta cuenta con más de 60 clases de usos de suelo para el territorio nacional, fue elaborada a partir de percepción remota y respaldada con verificación de campo entre los años 2011-2013. Con los datos de la información cartográfica BATS del modelo RegCM, las zonas de la región de estudio contenidas en la CUSV se reclasificaron por las clases que el modelo considera (Cuadro 1).

Paso 2

La selección del periodo es un requisito para poder iniciar con los escenarios futuros. El periodo comprendió los años 2000 al 2010 y se seleccionó a partir de la disponibilidad de información tanto climática (temperatura y precipitación) como cartográfica (CUSV), cuyas últimas actualizaciones solo se encuentran al 2010.

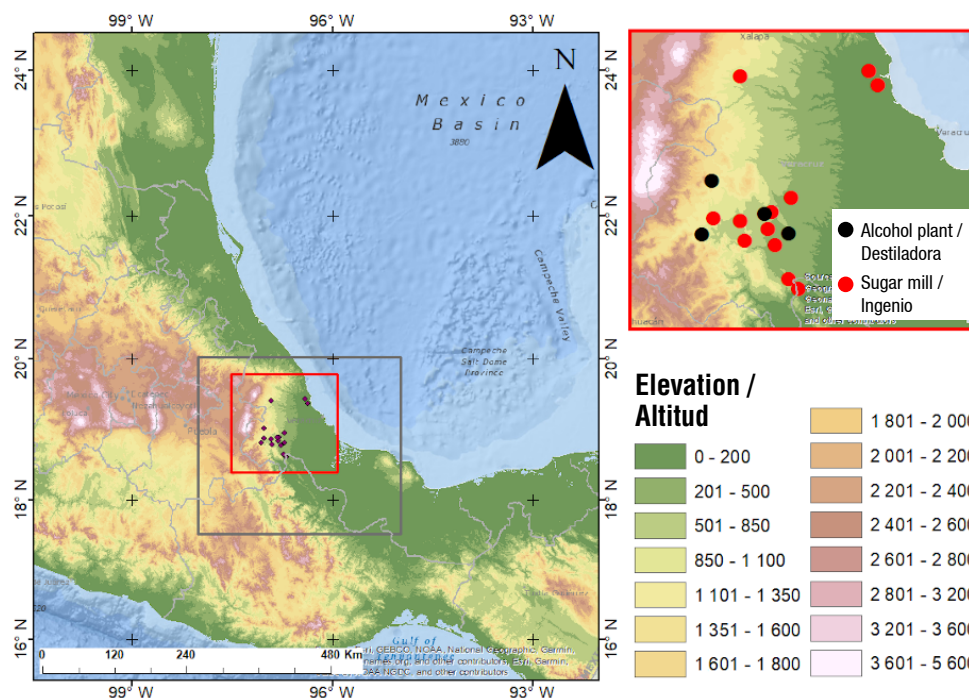


Figure 1. Orography of the areas of interest. A) Mother domain (resolution 27 km) covering a large part of the national territory; domain with a 9.0 km resolution (black line box). B) Area of interest (red line box) for the introduction of crops.

Figura 1. Orografía de las áreas de interés. A) Dominio madre (resolución 27 km) cubriendo gran parte del territorio nacional; dominio con resolución de 9.0 km (cuadro de línea negra). B) Área de interés (cuadro con línea roja) para la introducción de cultivos.

Step 4

After the simulation of the mother domain, the dynamic scale was downscaled (downscaling) to eliminate potential errors due to abrupt orographic changes and to allow the model to represent these changes more accurately (Önol, 2012). The downscaling technique consists of using the information generated by the mother domain to establish the initial and boundary conditions required by the simulations with sugarcane, jatropha and moringa crops, plus current land-use conditions, identified as the control. The control simulation was made with the land-use and vegetation that INEGI's mapping (2015) provides (step 1). All four new simulations had a spatial resolution of 9.0 km and the same simulated period as that of the mother domain. The process flow chart is shown in Figure 2.

Step 5

To simulate the introduction of the crops, it was necessary to reclassify the current land cover into the corresponding classes available in the RegCM (Table 1). For this purpose, the "irrigated agriculture" class was assigned to sugarcane, because in the study region, an irrigation system must be in place for sugarcane production during the November-April period, since in

Paso 3

La primera aproximación, conocida como dominio madre (Figura 1), consta de un dominio que cubre gran parte del territorio nacional y simula las condiciones atmosféricas del periodo seleccionado (2000-2010); la resolución espacial fue de 27 km y la temporal de cada tres horas. Las condiciones iniciales y de frontera fueron proporcionadas a través de los datos de reanálisis ERA-Interim con una resolución espacial de 1.5° x 1.5° y temporal de cada seis horas. Estos datos se seleccionaron debido a que presentan una mejora considerable en la descripción del ciclo hidrológico, calidad en la circulación atmosférica y campos meteorológicos (Dee et al., 2011).

Paso 4

Posterior a la simulación del dominio madre, la escala dinámica se redujo (*downscaling*) para la eliminación de errores potenciales debidos a cambios orográficos bruscos y para que el modelo pudiera representar estos cambios con mayor exactitud (Önol, 2012). La técnica *downscaling* consiste en utilizar la información generada por el dominio madre para establecer las condiciones iniciales y de frontera que requieren las simulaciones con los cultivos de caña de azúcar,

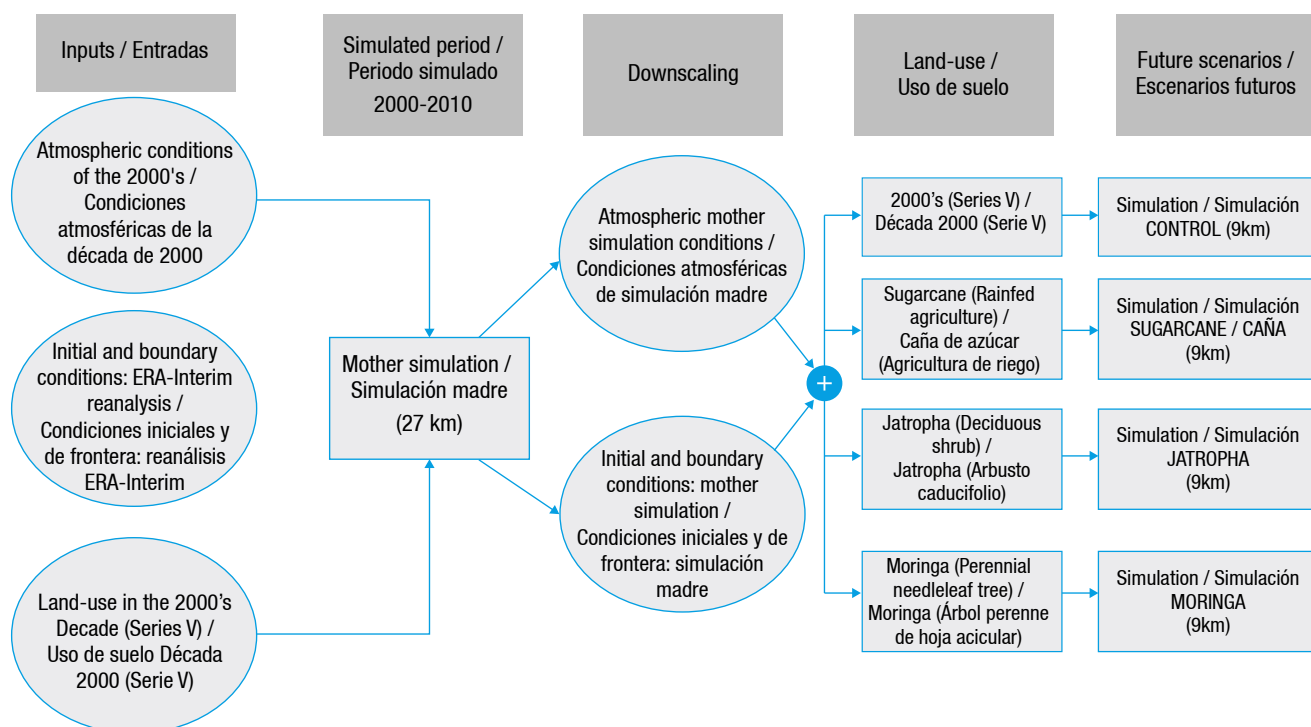


Figure 2. Process flow chart for assessing land-use change with the introduction of three bioenergy crops, using RegCM4.
Figura 2. Flujo del proceso para evaluar el cambio de uso de suelo con la introducción de tres cultivos bioenergéticos, mediante el modelo RegCM4.

this period only 10 % of the annual rainfall required for the crop is available (National Committee for Sustainable development of Sugar Cane [CONADESUCA], 2015). The “deciduous shrub” type was assigned to the jatropha crop, since this plant has shrub characteristics, such as short stems and lobe-shaped leaves that remain for seven to eight months (Teniente et al., 2011). In the case of moringa (7 to 12 m high), the “perennial needleleaf tree” type was assigned (Pérez, Sánchez, Armengol, & Reyes, 2010).

Data analysis

Four regions were considered in the data analysis. These regions had to have the greatest contrast with respect to the change in land-use and vegetation, and climatological information close to the time of the substitution of the three crops, in order to determine the behavior of the environmental temperature and rainfall. According to INEGI’s cartographic description (2015), the zones were the following: region 1, which is characterized by being allocated for agricultural use; region 2, which represents zones with perennial needleleaf trees; and regions 3 and 4, where diverse forests and irrigated agriculture are located, respectively. Subsequently, the monthly climatology of each simulation was obtained to make the climatological variability comparison derived from the substitution of each of the three crops in the four regions.

jatropha y moringa, más las condiciones actuales de uso de suelo, identificadas como el control. La simulación del control se hizo con el uso de suelo y vegetación que la cartografía del INEGI (2015) proporciona (paso 1). Las cuatro nuevas simulaciones tuvieron una resolución espacial de 9.0 km y el mismo periodo simulado que el del dominio madre. El diagrama de flujo del proceso se muestra en la Figura 2.

Paso 5

Para simular la introducción de los cultivos fue necesario reclasificar la cobertura del suelo actual por las clases correspondientes con las que cuenta el modelo RegCM (Cuadro 1). Para ello se asignó la clase “agricultura de riego” a la caña de azúcar, debido a que, en la región de estudio, se debe tener un sistema de riego para la producción de caña durante el semestre noviembre-abril, ya que en este periodo solo se tiene 10 % de la precipitación anual requerida para el cultivo (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar [CONADESUCA], 2015). Para el cultivo de jatropha se asignó la clase de “arbusto caducifolio”, ya que esta planta tiene características arbustivas, como tallos cortos y hojas en forma de lóbulos que permanecen de siete a ocho meses (Teniente et al., 2011). En el caso de la moringa (7 a 12 m de altura) se asignó la clase “árbol perenne de hoja acicular” (Pérez, Sánchez, Armengol, & Reyes, 2010).

Study region model calibration and validation

For the best model performance, the bias of the environmental temperature and rainfall variables was corrected. For temperature, the Piani et al. (2010) methodology was used by means of the following equation:

$$x_{cor} = a + bx$$

where x and x_{cor} represent the simulated and corrected variables, respectively. Values a and b , which are parameters of the model, were estimated by:

$$a = \overline{T_{obs}} - \overline{T_{sim}}$$

$$b = \frac{\overline{x_{obs}}}{\overline{x_{sim}}}$$

where $\overline{T_{obs}}$ and $\overline{T_{sim}}$ represent the observed and simulated monthly climatic temperatures; $\overline{x_{obs}}$ and $\overline{x_{sim}}$ are the average observed and simulated daily variables observed and simulated.

Rainfall was fitted with the Ines and Hasen (2006) technique:

$$x_i' = x_i \frac{\overline{x_{obs}}}{\overline{x_{sim}}}$$

where x_i' and x_i represent the simulation correction with the model on day i . In turn $\overline{x_{obs}}$ and $\overline{x_{sim}}$ represent the observed and simulated monthly climatic rainfall.

In order to evaluate the model's results, the control simulation was compared to the data observed at four weather stations located within the regions analyzed: Villa Tejada (region 1), Maltrata (region 2), Naranjal (region 3) and El Copital (region 4) (Figure 3). These stations belong to the National Meteorological Service (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2010) and were selected for their proximity to the study areas (less than 5.0 km) and because they have the largest number of data recorded during the analysis period. The differences between the two data sets were determined by the mean square error (MSE), the formula for which is as follows:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2$$

where S_i and O_i represent the simulated and observed data, respectively, and n indicates the total number of data in each set. This technique is used in climatology because it allows evaluating the performance of numerical models; large MSE values indicate greater differences between data sets (Bonilla-Ovallos & Mesa, 2017). Additionally, the root-mean-square error was used to determine value thresholds that allow evaluating the good performance of a model (Andrade & Blacutt, 2010).

Análisis de datos

En el análisis de los datos se consideraron cuatro regiones donde existiera mayor contraste con respecto al cambio de uso de suelo y vegetación y que además contara con información climatológica cercana al momento de la sustitución de los tres cultivos, para determinar el comportamiento de la temperatura ambiente y la precipitación. De acuerdo con la descripción cartográfica del INEGI (2015), las zonas fueron las siguientes: la región 1, que se caracteriza por estar destinada para el uso de agricultura; la región 2, que representa zonas con árboles perennes de hoja acicular; y las regiones 3 y 4, donde se localizan bosques diversos y agricultura de riego, respectivamente. Posteriormente, la climatología mensual de cada simulación se obtuvo para hacer la comparación de la variabilidad climatológica derivada de la sustitución de cada uno de los tres cultivos en las cuatro regiones.

Calibración y validación del modelo sobre la región de estudio

Para el mejor desempeño del modelo se realizó la corrección del sesgo de las variables temperatura ambiente y precipitación. Para la temperatura se utilizó la metodología de Piani et al. (2010) mediante la ecuación siguiente:

$$x_{cor} = a + bx$$

donde x y x_{cor} representan la variable simulada y corregida, respectivamente. Los valores a y b , que son parámetros del modelo, se estimaron mediante:

$$a = \overline{T_{obs}} - \overline{T_{sim}}$$

$$b = \frac{\overline{x_{obs}}}{\overline{x_{sim}}}$$

donde $\overline{T_{obs}}$ y $\overline{T_{sim}}$ representan las temperaturas mensuales climáticas observadas y simuladas; y $\overline{x_{obs}}$ y $\overline{x_{sim}}$ son las variables promedio diarias observadas y simuladas.

La precipitación se ajustó con la técnica de Ines y Hasen (2006):

$$x_i' = x_i \frac{\overline{x_{obs}}}{\overline{x_{sim}}}$$

donde x_i' y x_i representan la corrección de la simulación con el modelo en el día i . Por su parte $\overline{x_{obs}}$ y $\overline{x_{sim}}$ representan las precipitaciones mensuales climáticas observadas y simuladas.

Para evaluar los resultados del modelo, la simulación del control se comparó contra los datos observados en cuatro estaciones climatológicas ubicadas dentro de las regiones analizadas: Villa Tejada (región 1), Maltrata

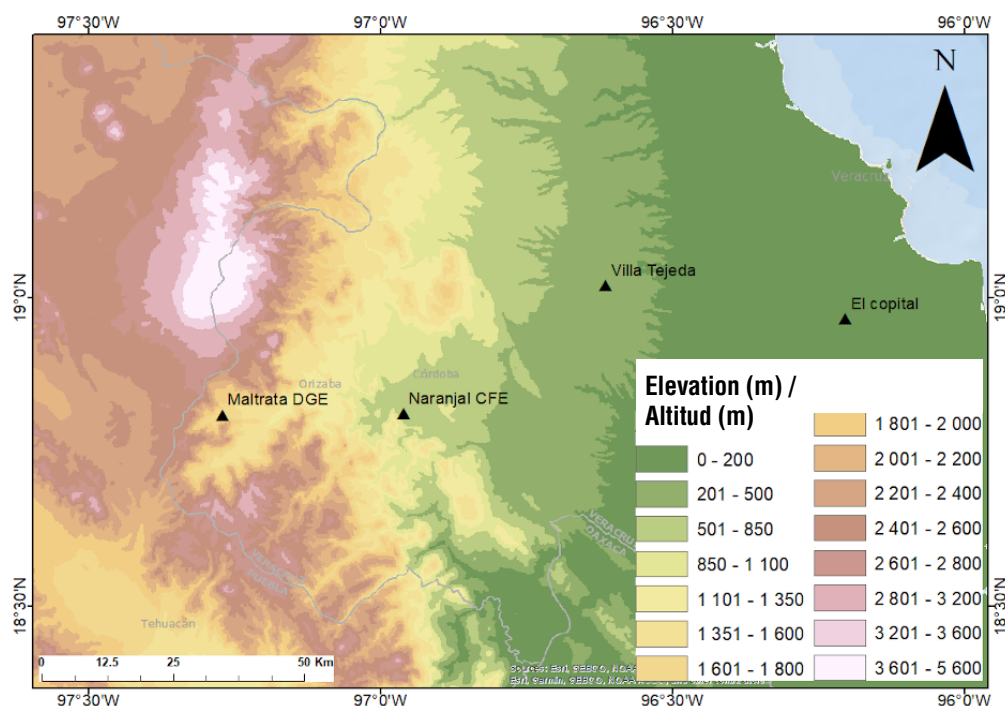


Figure 3. Selected weather stations (black triangles) in the state of Veracruz study region.

Figura 3. Estaciones climatológicas (triángulos negros) seleccionadas en la región de estudio del estado de Veracruz.

Results and discussion

Validation of the RegCM4

Figure 4 illustrates the results of the environmental temperature simulations. In region 1, RegCM4 obtained data similar to those observed, as the largest differences were of 1 °C. For region 4, the model was able to adequately simulate temperature for almost the entire year, having a small overestimate of only 0.3 °C in October and November. In contrast, for region 3, the MSE increased by almost three units (Table 2), resulting in a maximum difference of 2.0 °C between actual and simulated data. For region 2, the MSE increased more than 20-fold, resulting in differences of up to 6 °C between observed and simulated temperatures.

According to Figure 5, in regions 1, 2 and 4, the model overestimated the monthly rainfall accumulated throughout the annual cycle; otherwise it was recorded in region 3, where the model underestimated the rainfall for the summer months (June, July and August). It should be noted that the model detected a midsummer heat wave at the Maltrata, El Naranjal and El Copital (regions 2, 3 and 4, respectively) stations; however, the control data only showed a moderate midsummer heat wave in Maltrata (region 2). Additionally, in regions 1, 3 and 4, the model simulated rainfall peaks in September and October, which resulted in a lag in relation to the control data.

In the four regions, the MSE of the rainfall variable had values greater than 7000 units, while the root-mean-

(región 2), Naranjal (región 3) y El Copital (región 4) (Figura 3). Estas estaciones pertenecen al Servicio Meteorológico Nacional (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2010) y se seleccionaron por su cercanía con las zonas de estudio (menor de 5.0 km) y porque contenían el mayor número de datos registrados durante el periodo de análisis. Las diferencias entre los dos conjuntos de datos se determinaron mediante el error cuadrático medio (ECM), cuya fórmula es la siguiente:

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2$$

donde S_i y O_i representan los datos simulados y observados, respectivamente, y n indica el número total de datos de cada conjunto. Esta técnica se utiliza en climatología porque permite evaluar el desempeño de modelos numéricos; los valores grandes de ECM indican que existe mayor diferencia entre los conjuntos de datos (Bonilla-Ovallos & Mesa, 2017). Adicionalmente, la raíz cuadrada del error cuadrático medio se utilizó para determinar umbrales de valores que permiten evaluar la buena respuesta de un modelo (Andrade & Blacutt, 2010).

Resultados y discusión

Validación del modelo RegCM4

La Figura 4 ilustra los resultados de las simulaciones de la temperatura ambiente. En la región 1, el modelo RegCM4 obtuvo datos similares a los observados, ya

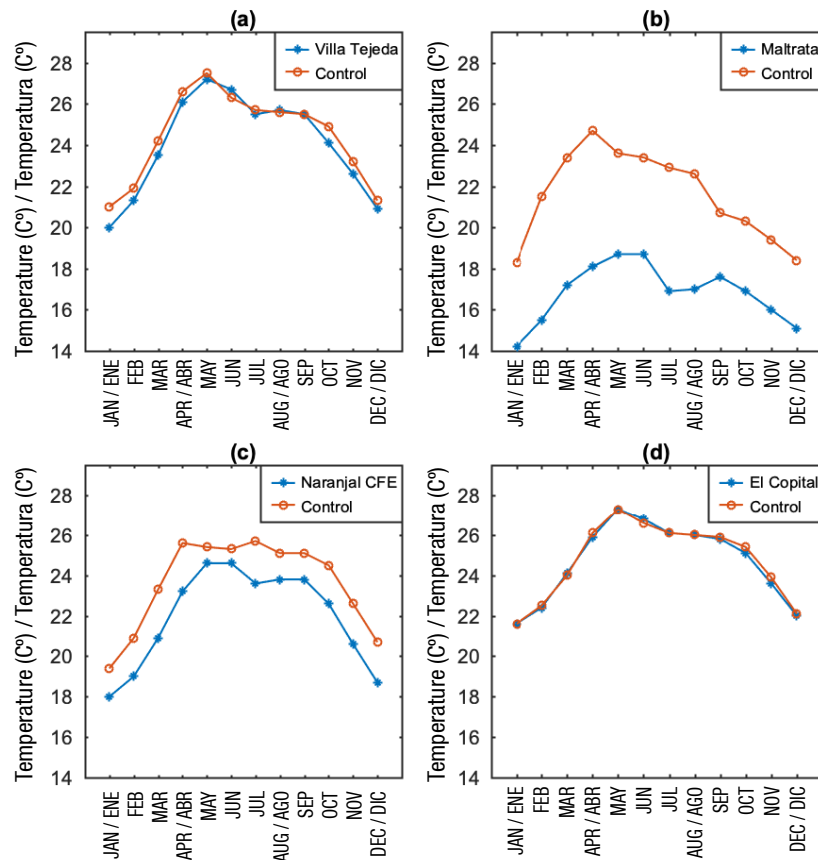


Figure 4. Comparison graphs between the information of the selected stations in the state of Veracruz and the results of the control simulation (current situation: series V LUVM [INEGI, 2015]) with RegCM4, with respect to environmental temperature: a) region 1, b) region 2, c) region 3 and d) region 4.

Figura 4. Gráficos de comparación entre la información de las estaciones seleccionadas en el estado de Veracruz y los resultados de la simulación del control (situación actual: carta de uso de suelo y vegetación serie V del INEGI [2015]) con el modelo RegCM4, respecto a la temperatura ambiente: a) región 1, b) región 2, c) región 3 y d) región 4.

square error (RMSE) was greater than 60 units (Table 2); according to Andrade and Blacutt (2010), the value 60 is considered as a reference threshold to determine that the model fails to adequately simulate this variable. The opposite resulted for temperature, where the RMSE was below five units. In this regard, research by Fuentes-Franco, Coppola, Giorgi, Graef, and Pavia (2014), Pal et al. (2007) and Ali, Li, Congbin, and Yang (2015) conducted in regions of Mexico, South Africa, South America, South Asia, and China, respectively, indicated that the RegCM shows greater biases in complex orography areas, such as those evaluated in this research. Based on the above, the RegCM is considered to present problems when simulating the rainfall behavior in regions with very marked elevation gradients. In this sense, it should be emphasized that in the study zone, elevations vary from sea level to almost 2 000 m; the El Copital and Villa Tejada weather stations are located below 350 m (14 and 348 m, respectively), whereas the Maltrata and Naranjal stations are above

que las mayores diferencias fueron de 1 °C. Para el caso de la región 4, el modelo logró simular adecuadamente la temperatura en prácticamente todo el año, teniendo una pequeña sobrestimación de solo 0.3 °C en los meses de octubre y noviembre. En cambio, para la región 3, el ECM aumentó casi tres unidades (Cuadro 2), lo que resultó en una diferencia máxima de 2.0 °C entre datos reales y simulados. Con respecto a la región 2, el ECM incrementó más de 20 veces, lo que se tradujo en diferencias de hasta 6 °C entre las temperaturas observadas y simuladas.

De acuerdo con la Figura 5, en las regiones 1, 2 y 4, el modelo sobrestimó la precipitación mensual acumulada en todo el ciclo anual; caso contrario se registró en la región 3, donde el modelo subestimó las precipitaciones para los meses de verano (junio, julio y agosto). Se debe resaltar que el modelo detectó canícula en las estaciones de Maltrata, El Naranjal y El Copital (regiones 2, 3 y 4, respectivamente); sin embargo, los datos de control

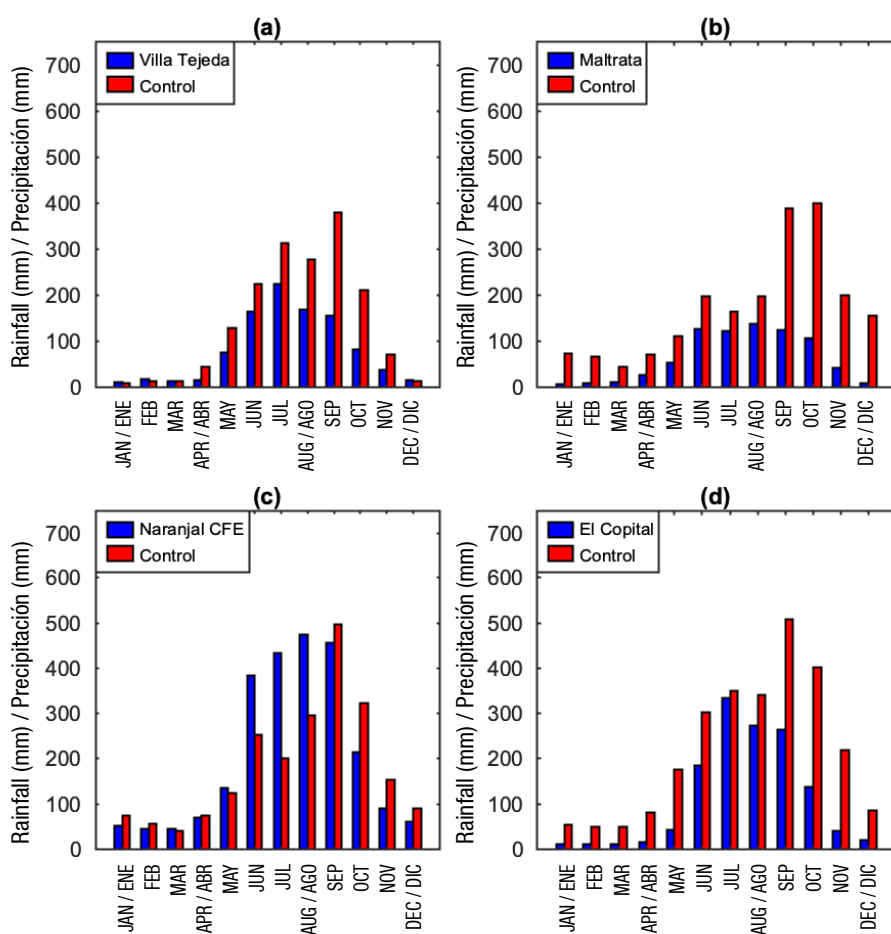


Figure 5. Comparison of the information from the selected stations in the state of Veracruz and the results from the control simulation (current situation: series V LUVM [INEGI, 2015]) with RegCM4, regarding rainfall: a) region 1, b) region 2, c) region 3 and d) region 4.

Figura 5. Comparación de la información de las estaciones seleccionadas en el estado de Veracruz y los resultados de la simulación del control (situación actual: carta de uso de suelo y vegetación serie V del INEGI [2015]) con el modelo RegCM4, respecto a la variable precipitación: a) región 1, b) región 2, c) región 3 y d) región 4.

900 m (1713 and 967 m, respectively). According to the results and references cited, it is considered that the model did not adequately simulate the conditions of the study sites for the rainfall variable.

This condition is not unique to the RegCM, since Andrade and Blacutt (2010), in their study conducted in Bolivia, found that the PRECIS regional climate model performs better when simulating temperature and rainfall in low areas (<500 m) than in intermediate (500 to 3500 m) and high areas (>3500 m). Therefore, it is considered that, in sites with high variations in elevation, the estimation of temperature and, especially, of rainfall generates problems of bias in these climate models.

In this study, temperature was the variable with the greatest capacity to be adequately simulated with RegCM4, while rainfall showed strong intensity and magnitude biases at all sites. This coincides with the

solamente manifestaron una canícula débil en Maltrata (región 2). Adicionalmente, en las regiones 1, 3 y 4, el modelo simuló los máximos de precipitación en los meses de septiembre y octubre, lo que resultó en un desfase en relación con los datos del control.

En las cuatro regiones, el ECM de la variable precipitación tuvo valores mayores de 7000 unidades, mientras que la raíz del error cuadrático medio (RECM) fue mayor de 60 unidades (Cuadro 2); de acuerdo con Andrade y Blacutt (2010), el valor 60 se considera como umbral de referencia para determinar que el modelo no logra simular adecuadamente dicha variable. Caso contrario se tiene en la temperatura, donde el RECM se encontró por debajo de cinco unidades. Al respecto, las investigaciones de Fuentes-Franco, Coppola, Giorgi, Graef, y Pavia (2014), Pal et al. (2007) y Ali, Li, Congbin, y Yang (2015), realizadas en regiones de México, Sudáfrica, Sudamérica, sur de Asia y China, respectivamente, indicaron que el modelo RegCM muestra sesgos

Table 2. Results of the mean square error (MSE) and the root-mean-square error (RMSE) of RegCM4, for the selected weather stations in the state of Veracruz.**Cuadro 2. Resultados del error cuadrático medio (ECM) y la raíz del error cuadrático medio (RECM) del modelo RegCM4, para las estaciones climatológicas seleccionadas en el estado de Veracruz.**

Region/ Región	Weather station and code/ Estación climatológica y clave	Months with data/ Meses con datos	Temperature/ Temperatura		SD/DE		Rainfall/ Precipitación		SD/DE	
			MSE/ ECM	RMSE/ RECM	Obs	Sim	MSE/ ECM	RMSE/ RECM	Obs	Sim
1	Villa Tejada 30364	111	0.30	0.55	2.32	2.07	7 876.10	88.75	73.34	128.14
2	Maltrata 30100	62	24.3	4.93	1.35	2.07	18 776.69	137.03	51.85	112.05
3	Naranjal 30115	122	3.14	1.77	2.30	2.13	10 246.73	101.23	170.98	131.78
4	El Copital 30048	109	0.03	0.16	1.86	1.83	17 614.80	132.72	116.32	152.74

SD = standard deviation of the mean; Obs = Observed; Sim = Simulated.

DE = desviación estándar de la media; Obs = Observado; Sim = Simulado.

results of Sanabria, Marengo, and Valverde (2009), Camargo-Bravo and García-Cueto (2012), Fuentes-Franco et al. (2014), Hassan et al. (2014), and Ji and Kang (2015), who concluded that temperature can be simulated more adequately. In contrast, Tiwari et al. (2015) indicate that the best simulated variable is rainfall, although this may be due to orographic traits at the study sites.

Temperature and rainfall simulation from crop introduction

Figure 6 shows the environmental temperature simulations with RegCM4 for each crop. Regions 1 and 4 show the largest temperature variation with respect to current land-use. In this sense, the sugarcane crop (rainfed agriculture), for January to May, causes cooling of the area (0.7 °C); subsequently, from June to December its behavior is similar to the control (with smaller than 0.3 °C variations). Such cooling coincides with what was found by Lobell, Bala, and Duffy (2006); Kueppers, Snyder, and Sloan (2007); Sacks, Cook, Buening, Levis, and Helkoski (2009); and Marcella and Eltahir (2014), who state that cooling is caused by increased soil moisture and albedo, caused by the irrigated crop, which generates changes in the latent and sensitive heat fluxes (Mahmood et al., 2014; Pielke et al., 2007). For jatropha (deciduous shrub) and moringa (perennial needleleaf tree) crops, the behavior in relation to sugarcane is reversed from June to December with a maximum cooling of 0.5 °C. This cooling is due to the contrast with bare areas allocated for crops, compared to vegetated areas that have denser foliage and greater root depth, which causes an increase in evapotranspiration and a decrease in sensible heat (Pielke Sr. et al., 2007). For regions 2 (perennial needleleaf trees) and 3 (mixed forest), as they are areas with tree vegetation, changes in temperature would be between 0.1 and 0.2 °C because jatropha and moringa crops are also tree species, which in case of substituting the original vegetation would have a similar behavior.

mayores en zonas de orografía compleja, tales como las que se evaluaron en esta investigación. Con base en lo anterior se considera que el modelo RegCM presenta problemas al momento de simular el comportamiento de la precipitación en regiones con gradientes altitudinales muy marcados. En este sentido, se debe enfatizar que, en la zona de estudio, las altitudes varían desde el nivel del mar hasta casi los 2000 m; las estaciones climatológicas de El Copital y Villa Tejada se encuentran a menos de 350 m (14 y 348 m, respectivamente), mientras que las estaciones de Maltrata y Naranjal se encuentran por arriba de los 900 m (1713 y 967 m, respectivamente). Acorde con los resultados y las referencias citadas, se considera que el modelo no logró simular adecuadamente las condiciones de los sitios de estudio para la variable de precipitación.

Esta condición no es única del modelo RegCM, ya que Andrade y Blacutt (2010), en su estudio realizado en Bolivia, encontraron que el modelo climático regional PRECIS tiene mejor desempeño al momento de simular la temperatura y precipitación de zonas bajas (<500 m) que en zonas intermedias (500 a 3500 m) y altas (>3500 m). Por lo anterior, se considera que, en sitios con altas variaciones altitudinales, la estimación de la temperatura y, en especial, de la precipitación genera problemas de sesgos en estos modelos climáticos.

En este estudio, la temperatura fue la variable con mayor capacidad para simularse adecuadamente con el modelo RegCM4, mientras que la precipitación presentó fuertes sesgos de intensidad y magnitud en todos los sitios. Lo anterior coincide con los resultados de Sanabria, Marengo, y Valverde (2009), Camargo-Bravo y García-Cueto (2012), Fuentes-Franco et al. (2014), Hassan et al. (2014), y Ji y Kang (2015), quienes concluyeron que la temperatura puede simularse más adecuadamente. En contraste, Tiwari et al. (2015) indican que la variable mejor simulada es la precipitación, aunque tal situación pudo deberse a cuestiones orográficas de los sitios de estudio.

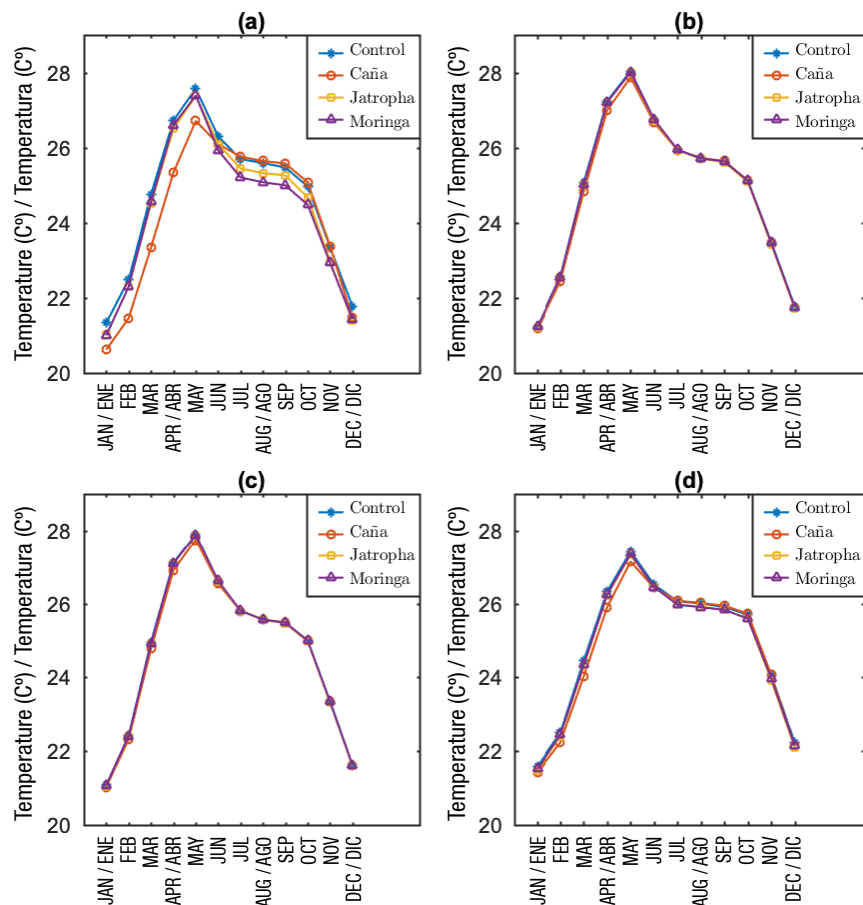


Figure 6. Comparison of the temperature obtained in the simulations with RegCM4 for each crop with respect to the control (current situation: series V LUVM [INEGI, 2015]) in the four selected regions of the state of Veracruz. Current control situation: a) region 1 = agriculture/mixed crop (Villa Tejada), b) region 2 = Perennial needleleaf trees (Maltrata), c) region 3 = mixed forest (Naranjal) and d) region 4 = irrigated agriculture (El Copital).

Figura 6. Comparación de la temperatura obtenida en las simulaciones con el modelo RegCM4 para cada cultivo respecto al control (situación actual: carta de uso de suelo y vegetación serie V del INEGI [2015]) en las cuatro regiones seleccionadas del estado de Veracruz. Situación actual del control: a) región 1 = agricultura/cultivo mixto (Villa Tejada), b) región 2 = árbol perenne de hoja acicular (Maltrata), c) región 3 = bosque mixto (Naranjal) y d) región 4 = agricultura de riego (El Copital).

Figure 7 shows precipitation comparisons among crops. Even though the model did not adequately simulate this variable, the results were congruent with the vegetation types evaluated, since, in region 1, the model with sugarcane (irrigated agriculture) produced the highest rainfall from January to June with an average increase of 21 mm over the control. This result directly correlates with the increase in soil moisture, which causes greater evapotranspiration and upward movement of the low troposphere, leading to higher rainfall (Zhao, Fang, Cui, & Huang, 2012). For the other regions (2, 3 and 4), rainfall would have a maximum variation of 6.4 mm with respect to the control. In the case of moringa and jatropha, there would be a 7.0 mm increase in rainfall caused by the greater vegetation cover and soil moisture that can be evapotranspired, which generates greater humidity in the atmosphere, causes greater convective

Simulación de temperatura y precipitación a partir de la introducción de cultivos

La Figura 6 muestra las simulaciones de temperatura ambiente con el modelo RegCM4 para cada cultivo. En las regiones 1 y 4 se obtiene la mayor variación de temperatura respecto al uso de suelo actual. En este sentido, el cultivo de caña de azúcar (agricultura de riego), para los meses de enero a mayo, provoca enfriamiento de la superficie (0.7 °C); posteriormente, de junio a diciembre tiene un comportamiento parecido al control (con variaciones menores de 0.3 °C). Dicho enfriamiento coincide con lo encontrado por Lobell, Bala, y Duffy (2006); Kueppers, Snyder, y Sloan (2007); Sacks, Cook, Buening, Levis, y Helkoski (2009); y Marcella y Eltahir (2014), quienes mencionan que el enfriamiento es provocado por el aumento de la

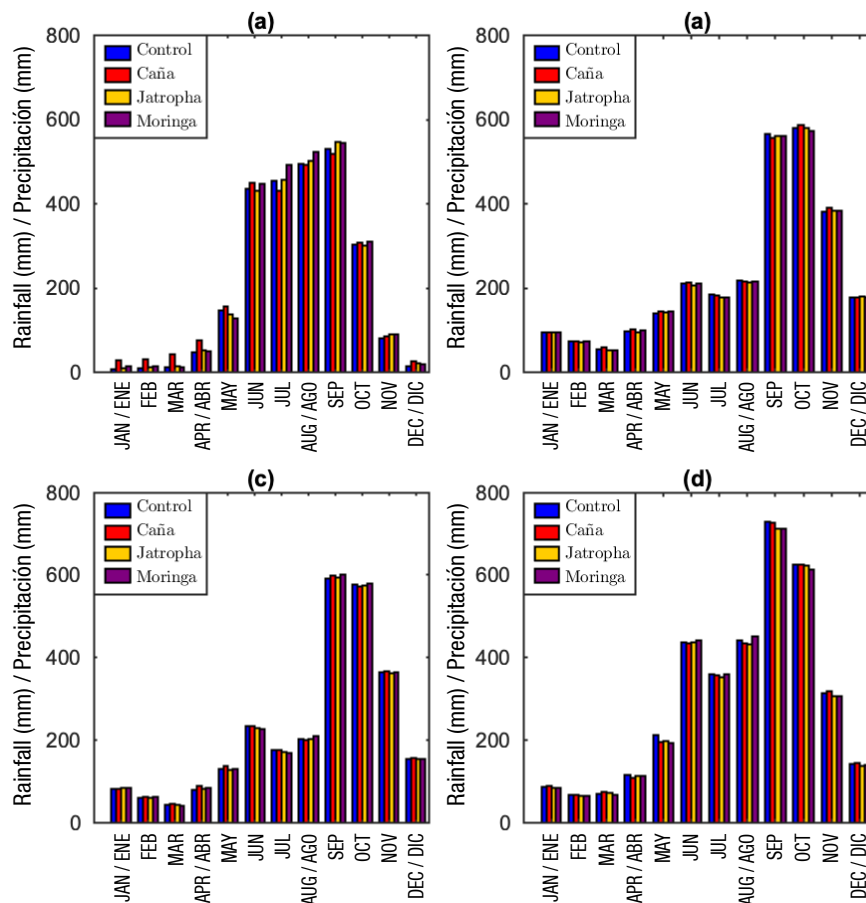


Figure 7. Comparison of the rainfall obtained in the simulations with RegCM4 for each crop with respect to the control (current situation: series V LUVM [INEGI, 2015]) in the four selected regions of the state of Veracruz. Current control situation: a) region 1 = agriculture/mixed crop (Villa Tejada), b) region 2 = Perennial needleleaf trees (Maltrata), c) region 3 = mixed forest (Naranjal) and d) region 4 = irrigated agriculture (El Copital).

Figura 7. Comparación de precipitación obtenida con las simulaciones del modelo RegCM4 para cada cultivo respecto al control (situación actual: carta de uso de suelo y vegetación serie V del INEGI [2015]) en las cuatro regiones seleccionadas del estado de Veracruz. Situación actual del control: a) región 1 = agricultura/cultivo mixto (Villa Tejada), b) región 2 = árbol perenne de hoja acicular (Maltrata), c) región 3 = bosque mixto (Naranjal) y d) región 4 = agricultura de riego (El Copital).

activity and, therefore, greater precipitation (Mahmood et al., 2014; Pielke Sr. et al., 2007). This coincides with what is indicated by several authors, that the greater the amount of vegetation cover, the greater the precipitation (Lee & Berbery, 2015; Malhi et al., 2008; Pitman, Narisma, Pielke Sr., & Holbrook, 2004; Salazar et al., 2016).

Based on Table 3, when comparing each region and each crop for the winter and summer seasons, it was determined that the greatest variation in temperature and rainfall would occur in regions 1 and 4. Of the three species, jatropha turned out to be the crop that would cause the least climatic variation, since it is the plant with the greatest leaf area and land cover, traits that help to conserve surface relative humidity (Salazar et al., 2016). The opposite is shown for the sugarcane crop, which causes the greatest variation in temperature

humedad del suelo y albedo, causado por el cultivo de riego, lo que genera cambios en los flujos de calor latente y sensible (Mahmood et al., 2014; Pielke et al., 2007). Para los cultivos de jatropha (arbusto caducifolio) y moringa (árbol perenne de hoja acicular), el comportamiento con relación a la caña de azúcar se invierte en los meses de junio a diciembre con un enfriamiento máximo de 0.5 °C. Este enfriamiento se debe a que existe contraste con áreas desnudas destinadas a cultivos, con respecto a las áreas con vegetación que poseen follajes más densos y mayor profundidad de raíces, lo que genera aumento de la evapotranspiración y descenso en el calor sensible (Pielke Sr. et al., 2007). Para los casos de las regiones 2 (árbol perenne de hoja acicular) y 3 (bosque mixto), al ser zonas con vegetación arbolada, los cambios en la temperatura se ubicarían entre 0.1 y 0.2 °C debido a que los cultivos de jatropha y moringa también son especies

Table 3. Temperature and rainfall differentials in winter and summer, obtained with the simulated introduction (RegCM4) of sugarcane, jatropha and moringa crops in four regions of the state of Veracruz.

Cuadro 3. Diferenciales de temperatura y precipitación en invierno y verano, obtenidos con la introducción simulada (modelo RegCM4) de cultivos de caña de azúcar, jatropha y moringa en cuatro regiones del estado de Veracruz.

Region/ Región	Weather station/ Estación climatológica	Current land-use*/ Uso de suelo actual*	Land-use change/ Cambio de uso de suelo	Temperature (°C)/ Temperatura (°C)		Rainfall (mm)/ Precipitación (mm)	
				Winter/ Invierno	Summer/ Verano	Winter/ Invierno	Summer/ Verano
1	Villa Tejada	Agriculture/ mixed crop / Agricultura/ cultivo mixto	sugarcane/caña	-0.7	-0.1	+19	-3
			jatropha	-0.3	-0.3	+3	+3
			moringa	-0.3	-0.5	+5	+17
2	Maltrata	Perennial needleleaf tree/ Árbol perenne de hoja acicular	sugarcane/caña	-0.1	NC/SC	-1	-1
			jatropha	-0.1	NC/SC	NC/SC	-6
			moringa	-0.1	NC/SC	NC/SC	-4
3	Naranjal	Mixed forest/ Bosque mixto	sugarcane/caña	NC/SC	NC/SC	+1	-1
			jatropha	NC/SC	NC/SC	NC/SC	-2
			moringa	NC/SC	NC/SC	+1	-2
4	El Copital	Rainfed agriculture/ Agricultura de riego	sugarcane/caña	-0.3	NC/SC	+1	-13
			jatropha	-0.1	-0.1	-3	-5
			moringa	-0.1	-0.1	-2	+10

*Current land-use is that provided by series V LUVM (INEGI, 2015); land-use change is the replacement of current vegetation by the three bioenergy crops (sugarcane, jatropha or moringa). NC indicates that there is no change in temperature or rainfall between the existing land-use and the one replaced by sugarcane, jatropha or moringa.

*El uso de suelo actual se refiere al proporcionado por la carta de uso de suelo serie V (INEGI, 2015); el cambio de uso de suelo se refiere a la sustitución de la vegetación actual por los tres cultivos bioenergéticos (caña, jatropha o moringa). SC indica que no existe cambio en temperatura o precipitación entre el uso de suelo existente y el remplazado por caña de azúcar, jatropha o moringa.

and rainfall. On the other hand, moringa has a smaller leaf area and causes more radiation to reach the surface, because it is a tree with small, thin leaves, which results in greater variations in temperature and rainfall than with jatropha. It is important to mention that although the temperature variation is less than 1 °C, authors such as Georgescu et al. (2013), Hallgren et al. (2013) and Khanal et al. (2013) state that even these small climatic variations could cause adverse effects at both, the local and mesoscale level.

Conclusions

In the central region of the state of Veracruz, the substitution of the current vegetation by sugarcane, jatropha and moringa crops may cause environmental variations. According to the model RegCM4, regions with soils devoid of their natural vegetation, such as agricultural ones, would have the greatest climatic variability. In such soils, jatropha and moringa would be the crops causing the least contrast in both temperature and rainfall, whereas sugarcane would produce the greatest difference in both variables. According to the above, the introduction of moringa or jatropha for bioenergy purposes would be a low climate

arbóreas, que en caso de sustituir a la vegetación original tendrían un comportamiento similar.

La Figura 7 muestra las comparaciones de precipitación entre los cultivos. Aun cuando el modelo no simuló adecuadamente dicha variable, los resultados fueron congruentes con los tipos de vegetación evaluados, ya que, en la región 1, el modelo con caña de azúcar (agricultura de riego) produjo las mayores precipitaciones de enero a junio con un incremento promedio de 21 mm respecto al control. Este resultado se correlaciona directamente con el aumento de la humedad del suelo, que provoca mayor evapotranspiración y movimiento ascendente de la baja troposfera, lo que conduce a mayor precipitación (Zhao, Fang, Cui, & Huang, 2012). Para las demás regiones (2, 3 y 4), la precipitación tendría una variación máxima de 6.4 mm respecto al control. Para el caso de moringa y jatropha se tendría un aumento de 7.0 mm de precipitación causado por la mayor cobertura vegetal y humedad del suelo que se puede evapotranspirar, lo que genera mayor humedad en la atmósfera, provoca mayor actividad convectiva y, con ello, mayores precipitaciones (Mahmood et al., 2014; Pielke Sr. et al., 2007). Esto coincide con lo indicado por varios autores, que a mayor cantidad

impact alternative, while sugarcane is not considered suitable for these purposes due to the greater adverse climate impact it would have in the region.

Acknowledgments

The authors thank the National Council of Science and Technology (CONACYT) for the scholarship granted (number 447370) for the conclusion of this study.

End of English version

References / Referencias

- Agüero-Rodríguez, J. C., Tepetla-Montes, J., & Torres-Beristáin, B. (2015). Producción de biocombustibles a partir de la caña en Veracruz, México: perspectivas y riesgos socio-ambientales. *CienciaUAT*, 9(2), 74–84. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/cuat/v9n2/2007-7858-cuat-9-02-00074.pdf>
- Ali, S., Li, D., Congbin, F., & Yang, Y. (2015). Performance of convective parameterization schemes in Asia using RegCM: Simulations in three typical regions for the period 1998-2002. *Advances in Atmospheric Sciences*, 32, 715–730. doi: 10.1007/s00376-014-4158-4
- Andrade, M. F., & Blacutt, L. A. (2010). Evaluación del modelo climático regional PRECIS para el área de Bolivia: Comparación con datos de superficie. *Revista Boliviana de Física*, 17(17). Retrieved from http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-38232010000100001
- Bonilla-Ovallos, C. A., & Mesa, O. J. (2017). Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 41(158), 107–118. doi: 10.18257/raccefyn.427
- Caiazza, F., Malina, R., Staples, M. D., Wolfe, P. J., Yim, S. H. L., & Barrett, S. R. H. (2014). Quantifying the climate impacts of albedo changes due to biofuel production: a comparison with biogeochemical effects. *Environmental Research Letters*, 9(2), 1–10. doi: 10.1088/1748-9326/9/2/024015
- Camargo-Bravo, A., & García-Cueto, R. O. (2012). Evaluación de dos modelos de reducción de escala en la generación de escenarios de cambio climático en el valle de Mexicali en México. *Información Tecnológica*, 23(3), 11–20. doi: 10.4067/S0718-07642012000300003
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2010). Información estadística climatológica. Retrieved February 2, 2019 from <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA). (2015). Ficha técnica del cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*

de cobertura vegetal es mayor la precipitación (Lee & Berbery, 2015; Malhi et al., 2008; Pitman, Narisma, Pielke Sr., & Holbrook, 2004; Salazar et al., 2016).

Con base en el Cuadro 3, al hacer el comparativo por cada región y con cada cultivo para las estaciones de invierno y verano, se obtuvo que la mayor variación de temperatura y precipitación se presentaría en las regiones 1 y 4. De las tres especies, jatropha resultó ser el cultivo que menor variación climática ocasionaría, debido a que es la planta con mayor área foliar y cobertura de suelo, características que ayudan a la conservación de la humedad de la superficie (Salazar et al., 2016). Caso contrario se muestra para el cultivo de caña de azúcar, el cual provoca la mayor variación en la temperatura y precipitación. Por otra parte, la moringa tiene menor área foliar y ocasiona que mayor radiación llegue a la superficie, debido a que es un árbol con hojas pequeñas y delgadas, lo que repercute en mayores variaciones de temperatura y precipitación que con jatropha. Es importante mencionar que a pesar de que la variación de temperatura es menor de 1 °C, autores como Georgescu et al. (2013), Hallgren et al. (2013) y Khanal et al. (2013) indican que incluso estas pequeñas variaciones climáticas podrían generar afectaciones tanto a nivel local como a nivel mesoescala.

Conclusiones

En la región central del estado de Veracruz, la sustitución de la vegetación actual por los cultivos caña de azúcar, jatropha y moringa puede provocar variaciones ambientales. De acuerdo con el modelo RegCM4, las regiones con suelos desprovistos de su vegetación natural, como las agrícolas, tendrían la mayor variabilidad climática. En dichos suelos, jatropha y moringa serían los cultivos que causarían el menor contraste tanto en temperatura como en precipitación, mientras que la caña de azúcar produciría la mayor diferencia en ambas variables. De acuerdo con lo anterior, la introducción de moringa o jatropha con fines bioenergéticos sería una alternativa de bajo impacto climático, mientras que la caña de azúcar no se considera apta para estos fines debido a la mayor afectación climática que provocaría en la región.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada (número 447370) para la conclusión de este estudio.

Fin de la versión en español

- L.). Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/141823/Ficha_T_cnica_Ca_a_de_Az_car.pdf
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597. doi: 10.1002/qj.828
- Dickinson, R. E., Henderson-Sellers, A., & Kennedy, P. J. (1993). *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model*. USA: National Center for Atmospheric Research. doi: 10.5065/D67W6959
- Elguindi, N., Bi, X., Giorgi, F., Nagarajan, B., Pal, J., Solmon, F., ... Giuliani, T. (2013). *Regional Climatic Model RegCM user manual version 4.3*. Trieste, Italy: International Center for Theoretical Physics.
- Fuentes-Franco, R., Coppola, E., Giorgi, F., Graef, F., & Pavia, E. G. (2014). Assessment of RegCM4 simulated inter-annual variability and daily-scale statistics of temperature and precipitation over Mexico. *Climate Dynamics*, 42, 629–647. doi: 10.1007/s00382-013-1686-z
- Georgescu, M., Lobell, D. B., & Field, C. B. (2009). Potential impact of U. S. biofuels on regional climate. *Geophysical Research Letters*, 36(21), 1–6. doi: 10.1029/2009GL040477
- Georgescu, M., Lobell, D. B., Field, C. B., & Mahalov, A. (2013). Simulated hydroclimatic impacts of projected Brazilian sugarcane expansion. *Geophysical Research Letters*, 40(5), 972–977. doi: 10.1002/GRL.50206
- Hallgren, W., Schlosser, C. A., Monier, E., Kicklighter, D., Sokolov, A., & Melillo, J. (2013). Climate impacts of a large-scale biofuels expansion. *Geophysical Research Letters*, 40(8), 1624–1630. doi: 10.1002/grl.50352
- Hassan, M., Penfei, D., Iqbal, W., Can, W., Wei, F., & Ba, W. (2014). Temperature and precipitation climatology assessment over South Asia using the Regional Climate Model (RegCM4.3): An evaluation of the model performance. *Earth Science & Climatic Change*, 5(7), 1–8. doi: 10.4172/2157-7617
- Hernández-Rodríguez, M. A., & Hernández-Zárate, J. A. (2008). Verdades y mitos de los biocombustibles. *Elementos: Ciencia y Cultura*, 71(15), 15–18. Retrieved from <https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000002099.pdf>
- Hua, W. J., Chen, H. S., & Li, X. (2015). Effects of future land use change on the regional climate in China. *Science China Earth Sciences*, 58(10), 1840–1848. doi: 10.1007/s11430-015-5082-x
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). (2015). *Guía para la interpretación de cartografía: Uso de suelo y vegetación, escala 1:250,000, serie V*. México: Author.
- Ines, A. V. M., & Hansen, J. W. (2006). Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138, 44–53. doi: 10.1016/j.agrformet.2006.03.009
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Informe de síntesis. In R. K. Pachauri & L. A. Meyer (Eds.), *Cambio climático 2014* (pp. 157). Ginebra: Author.
- Ji, Z., & Kang, S. (2015). Evaluation of extreme climate events using a regional climate model for China. *Royal Meteorological Society*, 35(6), 888–902. doi: 10.1002/joc.4024
- Khanal, S., Anex, R. P., Anderson, C. J., & Daryl, E. (2013). Implications of biofuel policy-driven land cover change for rainfall erosivity and soil erosion in the United States. *Bioenergy*, 5(6), 713–722. doi: 10.1111/gcbb.12050
- Kueppers, L. M., Snyder, M. A., & Sloan, L. C. (2007). Irrigation cooling effect: Regional climate forcing by land-use change. *Geophysical Research Letters*, 34(3), 1–5. doi: 10.1029/2006GL028679
- Lee, S., & Berbery, H. (2015). Land cover change effects on the climate of the La Plata basin. *Journal of Hydrometeorology*, 13, 84–102. doi: 10.1175/JHM-D-11-021.1
- Lobell, D. B., Bala, G., & Duffy, P. B. (2006). Biogeophysical impacts of cropland management changes on climate. *Geophysical Research Letters*, 33(6), 1–4. doi: 10.1029/2005GL025492
- Mahmood, R., Pielke, R. A., Hubbard, K. G., Niyogi, D., Dirmeyer, P. A., McAlpine, C., ... Fall, S. (2014). Land cover changes and their biogeophysical effects on climate. *Royal Meteorological Society*, 34(4), 929–953. doi: 10.1002/joc.3736
- Malhi, Y., Roberts, J. T., Betts, R. A., Killeen, T. J., Li, W., & Nobre, C. A. (2008). Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science*, 319(5860), 169–172. doi: 10.1126/science.1146961
- Marcella, M. P., & Eltahir, E. A. B. (2014). Introducing an irrigation scheme to a regional climate model: a case study over West Africa. *Journal of Climate*, 27, 5708–5723. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00116.1
- Noda-Leyva, Y., Pérez-Vázquez, A., & Valdés-Rodríguez, O. A. (2015). Establecimiento de tres especies de oleaginosas bajo asociación. *Agronomía Mesoamericana*, 26(2), 323–332. doi: 10.15517/am.v26i2.19326
- Önol, B. (2012). Effects of coastal topography on climate: high-resolution simulation with a regional climate model. *Climate Research*, 52, 159–174. doi: 10.3354/cr01077
- Otieno, V. O., & Anyah, R. O. (2012). Effects of land use changes on climate in the greater horn of Africa. *Climate Research*, 52(1), 77–95. doi: 10.3354/cr01050
- Pal, J. S., Giorgi, F., Bi, X., Elguindi, N., Solmon, F., Gao, X., ... Steiner, A. L. (2007). Regional climate modelling for the developing world: The ICTP RegCM3 and RegCNET. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(9), 1395–1409. doi: 10.1175/BAMS-88-9-1395
- Pérez, A., Sánchez, T., Armengol, N., & Reyes, F. (2010).

- Características y potencialidades de *Moringa oleifera* Lamark. Una alternativa para la alimentación animal. *Pastos y Forrajes*, 33(4), 1–16. Retrieved from <http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v33n4/pyf01410.pdf>
- Piani, C., Weedon, G. P., Best, M., Gomes, S. M., Viterbo, P., Hagemann, S., & Haerter, J. O. (2010). Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 395(3–4), 199–215. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.10.024
- Pielke Sr., R. A., Adegoke, J., Beltrán-Przekurat, A., Hiemstra, C. A., Lin, J., Nair, U. S., & Nobis, T. E. (2007). An overview of regional land-use and land-cover impacts on rainfall. *Tallus*, 59(3), 587–601. doi: 10.1111/j.1600-0889.2007.00251.x
- Pitman, A. J., Narisma, G. T., Pielke Sr., R. A., & Holbrook, N. J. (2004). Impact of land cover change on the climate of southwest Western Australia. *Journal of Geophysical Research*, 109(D18), 1–12. doi: 10.1029/2003JD004347
- Sacks, W. J., Cook, B. I., Buening, N., Levis, S., & Helkowski, J. H. (2009). Effects of global irrigation on the near-surface climate. *Climate Dynamics*, 33(2), 159–175. doi: 10.1007/s00382-008-0445-z
- Salazar, A., Katzfey, J., Thatcher, M., Syktus, J., Wong, K., & McAlpine, C. (2016). Deforestation changes land – atmosphere interactions across South American biomes. *Global and Planetary Change*, 139, 97–108. doi: 10.1016/j.gloplacha.2016.01.004
- Sanabria, J., Marengo, J., & Valverde, M. (2009). Escenarios de cambio climático con modelos regionales sobre el Altiplano Peruano (Departamento de Puno). *Revista Peruana Geo-Atmósfera*, 1, 134–149. Retrieved from https://web2.senamhi.gob.pe/rpga/pdf/2009_vol01/art11.pdf
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA). (2009). Programa de producción sustentable de insumos para bioenergéticos y de desarrollo científico y tecnológico. Retrieved from <https://www.inforural.com.mx/wp-content/uploads/2009/10/PROINBIOS-061009.pdf>
- Teniente, O. R., Tapia, V. L. M., González, A. A., Zamarripa, C. A., Solís, B. J. L., Martínez, V. B., & Hernández, M. M. (2011). *Guía técnica para la producción de piñón mexicano (Jatropha curcas L.) en Michoacán*. México: INIFAP.
- Tiwari, P. R., Kha, S. C., Mohanty, U. C., Dey, S., Sinha, P., Raju, P. V. S., & Shekhar, M. S. (2015). The role of land surface schemes in the regional climate model (RegCM) for seasonal scale simulations over Western Himalaya. *Atmósfera*, 28(2), 129–142. doi: 10.1016/S0187-6236(15)30005-9
- Zaman, Q., Waqas, K., & Rasul, G. (2011). Land use change study in RegCM3 to see the effect of HKH glaciers melt over agriculture areas of Pakistan. *Pakistan Journal of Meteorology*, 7(14), 17–24.
- Zhao, Y., Fang, Y., Cui, C., & Huang, A. (2012). Effects of irrigation on precipitation in the arid regions of Xinjiang, China. *Journal of Arid Land*, 4(2), 132–139. doi: 10.3724/SP.J.1227.2012.00132

