

# Methodological approach to quantify the effect of changing climate patterns on bean crop yield in the State of Durango

Enfoque metodológico para cuantificar el efecto del cambio en patrones de clima sobre el rendimiento del cultivo de frijol en el estado de Durango

Gerardo Esquivel-Arriaga<sup>1\*</sup>; Ignacio Sánchez-Cohen<sup>1</sup>; Armando López-Santos<sup>2</sup>; Miguel A. Velásquez-Valle<sup>3</sup>; Palmira Bueno-Hurtado<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera km 6.5 Margen Derecho Canal Sacramento "Zona Industrial Gómez Palacio", Gómez Palacio, Durango. México. C. P. 35140. Tel.: (871) 1590104, 1590105 y 1590107 Fax: 106 esquivel.gerardo@inifap.gob.mx (\*Corresponding author)

<sup>2</sup>Universidad Autónoma Chapingo. Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Bermejillo, Durango.

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de investigación Regional Noreste. Campo Experimental Saltillo. Saltillo, Coahuila. México.

## Abstract

A method to analyze climate variability and quantify its impact on bean yield under regionalized climate change scenarios is proposed. The algorithm consists of four steps: a) identification of agricultural land sown with bean, b) obtaining of climate parameters that define the region and use of a stochastic generator (LARS-WG) to obtain regionalized climate change scenarios; c) the matrices that define the climate conditions at the site are embedded into a crop model (EPIC) to assess the impact on crop yield and d) a spatial distribution of the information is performed. The results indicate that under future climate change scenarios (A2 and A1B), yield increases in the range of 0.1 t·ha<sup>-1</sup> are expected in some areas, along with decreases of 0.2 t·ha<sup>-1</sup> in others. Increases in maximum and minimum temperature, as well as increases and decreases in rainfall, are also foreseen for some areas of the state. Based on the proposed method and the expected future changes in climate patterns, it would be advisable to perform simulation runs considering adjustments in management practices to compute the reduction in climate risk to agricultural areas.

**Keywords:** mitigation, downscaling, climatic variability, vulnerability

## Resumen

Se propone un método para analizar la variabilidad climática y cuantificar el impacto de ésta en el rendimiento del cultivo de frijol, bajo escenarios de cambio climático regionalizados. El procedimiento consta de cuatro pasos: a) identificación de la superficie agrícola destinada al cultivo de frijol, b) obtención de los parámetros de clima que definen la región y se dispone de un generador estocástico (LARS-WG) para obtener los escenarios de cambio climático regionalizados; c) las matrices que definen las condiciones de clima en el sitio son utilizadas en un modelo de cultivo (EPIC) para evaluar el impacto en su rendimiento y d) se realiza una distribución espacial de la información. Los resultados indican que bajo escenarios futuros de cambio climático (A2 y A1B), se esperarían incrementos en rendimiento de 0.1 t·ha<sup>-1</sup> y disminuciones de 0.2 t·ha<sup>-1</sup>, asimismo se vislumbran aumentos en la temperatura máxima y mínima, así como aumentos y disminuciones en la precipitación en algunas zonas del estado. De acuerdo al método propuesto y al comportamiento del clima en el futuro, sería recomendable realizar simulaciones con ajustes en las prácticas de manejo para disminuir la superficie de las zonas agrícolas sujetas al riesgo climático.

**Palabras clave:** mitigación, reducción de escala, variabilidad climática, vulnerabilidad

Please cite this article as follows (APA 6): Esquivel-Arriaga, G., Sánchez-Cohen, I., López-Santos, A., Velásquez-Valle, M. A., & Bueno-Hurtado, P. (2016). Methodological approach to quantify the effect of changing climate patterns on bean crop yield in the State of Durango. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 15(1), 17-28. doi: 10.5154/r.rchsza.2015.08.011

Received: August 25, 2015 / Accepted: April 28, 2016.



## Introduction

Food availability is one of the most important factors in the development of any civilization (Ioan & Radulescu, 2015). However, for those involved in agriculture and global food production, a change in climate patterns brings with it new challenges in production processes (Nelson & Shively, 2014). Agriculture involves the direct use of climate inputs (solar radiation, temperature and precipitation); any alteration resulting from climate change has a direct biophysical effect on agricultural productivity (Nelson & Shively, 2014).

Globally, agriculture (rainfed + irrigated) covers 38 % of the Earth's landmass with 1.5 billion hectares used for crop production, arable land and land devoted to perennial crops; 3.3 billion hectares are used as pastures and perennial grasses and 4 billion hectares are forest area (Food and Agriculture Organization of The United Nations, Statistics Division, 2014).

Agriculture uses 70 % of the Earth's available freshwater. With the world's population projected to increase from the current 6.7 to 9.3 billion by 2050, agriculture faces the great challenge of producing enough food to meet increased demand under changing climate and natural resource depletion conditions (United Nations, 2011).

In areas where there is no infrastructure for irrigated agriculture, rainfed areas are the source of income in agriculture. The productivity of these agricultural areas lies mainly in the temporal and spatial distribution of rainfall (Trethowan, Turner & Chattha, 2010), which is highly vulnerable to climate variability and future climate changes (Anwar, Liu, Macadam, & Kelly, 2013).

This climate variability is reflected in current and future climate risk increase, with repercussions in terms of reduced and lost agricultural yields (Rosenzweig, 2007). Advances in the understanding of climate impact have resulted in better data collection, development of new methods and models, and observation of current changes in climate and their impacts (Antle, 2009).

Scientific methods for predicting the effects of climate changes on agricultural productivity can be traced back to the late seventies, when modeling was typically used to infer statistical relationships between climate and its potential effects on agricultural yields (Krishnan, Ramakrishnan, Rao, & Dash, 2009).

Currently, simulation models are drawing increased interest as a decision-making support tool for assessing crop water use and yields (Ko, Piccinni & Steglich, 2009) and forecasting management outcomes of a given system or environmental condition (Aggarwal, Kalra, Chander & Pathak, 2006). Based on the above, the main aim of this work is to propose a method for analyzing

## Introducción

La disponibilidad de alimentos es uno de los factores más importantes para el desarrollo de cualquier civilización (Ioan & Radulescu, 2015). Sin embargo, para las personas relacionadas con la agricultura y la producción global de alimentos, un cambio en los patrones climáticos trae consigo nuevos desafíos en los procesos de producción (Nelson & Shively, 2014). La agricultura involucra el uso directo de insumos climáticos (radiación solar, temperatura y precipitación); alguna alteración derivada por el cambio climático tienen un efecto biofísico directo en la productividad agrícola (Nelson & Shively, 2014).

A nivel mundial, la agricultura (temporal + riego) cubre el 38 % de la superficie terrestre con 1,500 millones de hectáreas utilizadas para la producción agrícola, tierras arables más tierras dedicadas a cultivos perennes; 3,300 millones de hectáreas se utilizan como praderas y pastos perennes y 4,000 millones de hectáreas son de superficie forestal (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Dirección de Estadística [FAOSTAT por sus siglas en inglés], 2014).

La agricultura utiliza el 70 % del agua dulce disponible en la Tierra, con la población mundial proyectada a incrementarse de los actuales 6,700 a 9,300 millones de habitantes en el 2050, la agricultura enfrenta el gran desafío de producir suficientes alimentos para satisfacer una mayor demanda bajo condiciones de un clima cambiante y de agotamiento de los recursos naturales (Naciones Unidas [UN por sus siglas en inglés], 2011).

En zonas donde no existe infraestructura para la agricultura de riego, las zonas de temporal son la fuente de ingreso en la actividad agrícola. La productividad de estas zonas agrícolas estriban principalmente de la distribución temporal y espacial de la precipitación (Trethowan, Turner & Chattha, 2010), las cuales son altamente vulnerables a la variabilidad climática y a los cambios climáticos futuros (Anwar, Liu, Macadam, & Kelly, 2013).

Dicha variabilidad climática se refleja en el aumento actual y futuro del riesgo climático, con repercusiones en la reducción y pérdida de los rendimientos agrícolas (Rosenzweig, 2007). Los avances en el conocimiento del impacto climático ha derivado en la colección de mejores datos, el desarrollo de nuevos métodos y modelos, y la observación de los cambios actuales en el clima y sus impactos (Antle, 2009).

Los métodos científicos para pronosticar los efectos de las variaciones climáticas en la productividad agrícola se remontan a la década de los setentas, donde fue característico el uso de la modelación para inferir relaciones estadísticas entre el clima y sus efectos

climate variability and quantifying its impact on bean yield under regionalized climate scenarios in the state of Durango.

## Materials and methods

The methodology described can be used for species cultivated under irrigated and rainfed conditions; its application scale allows using it on a particular site or in different areas depending on the complexity of the analysis. The procedure was calibrated and applied to the state of Durango, Mexico, and consists of the following four steps:

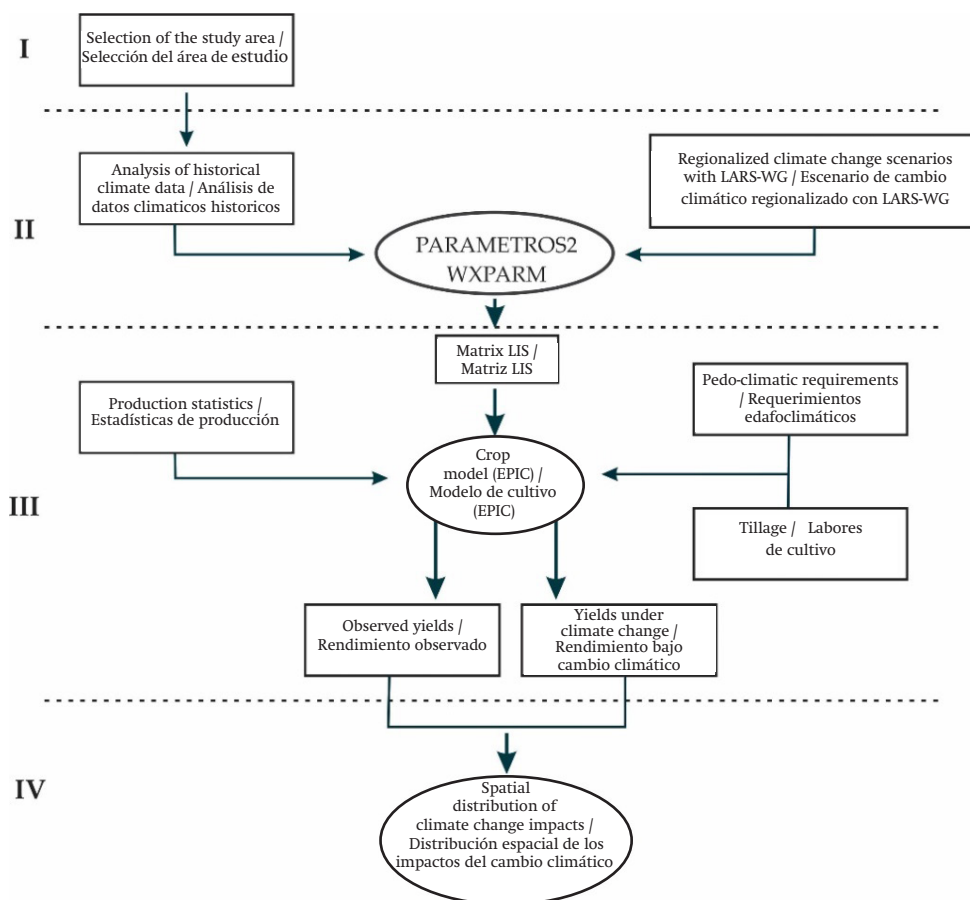
- I. Identification of the area sown with bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under the rainfed mode in the state.
- II. The PARAMETROS2 and WXPARM climate generators (Sánchez, Bueno, Esquivel, & Velásquez, 2014) were used to obtain the climate parameters that define the region and the LARS-WG stochastic generator (Semenov & Stratonovitch, 2010) was used to simulate the A2 and A1B regionalized climate change scenarios based on the methodology proposed by Zermeño (2008) and Magaña (2010).

potenciales en los rendimientos agrícolas (Krishnan, Ramakrishnan, Rao, & Dash, 2009).

En la actualidad, los modelos de simulación son cada vez más de gran interés como una herramienta para el soporte y toma de decisiones en la evaluación del uso del agua y producción de los cultivos (Ko, Piccinni & Steglich, 2009) y para pronosticar los resultados del manejo de un determinado sistema o de una cierta condición ambiental (Aggarwal, Kalra, Chander & Pathak, 2006). Basado en lo anteriormente expuesto, el objetivo esencial del trabajo es proponer un método para el análisis de la variabilidad climática y cuantificar su impacto en el rendimiento de frijol bajo escenarios climáticos regionalizados en el estado de Durango.

## Materiales y métodos

La metodología que se describe se puede realizar en especies cultivadas bajo condiciones de riego y temporal, su escala de aplicación permite realizarlo en un sitio en particular o en diferentes áreas dependiendo de la complejidad del análisis. El procedimiento fue calibrado y aplicado al estado de Durango, México y consta de cuatro pasos que consisten en:



**Figure 1. Diagram of the methodological approach for estimating bean crop yield.**

**Figura 1. Esquema del enfoque metodológico para la estimación del rendimiento del cultivo de frijol.**

- III. Then the matrices that define the climatic conditions in the study area were used in the EPIC crop model to assess the impact on crop yield (Huicong, Jingai, Chunxiang, Donghua & Peijun, 2012).
- IV. Finally, a spatial distribution of the information, both historical and due to climate change, was performed (Figure 1).

### Study area

As a case study, bean cultivation under the rainfed mode was selected, as it is the most important crop grown under this rainfall regime in the state of Durango, Mexico (Figure 2), located in the northwest area of central Mexico; its elevational gradient ranges from 200 to 3,200 meters above sea level, characterized by a temperate semi-dry and temperate semi-humid climate with summer rains (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 2014). The rainfed areas converge in three administrative hydrological regions (HR): Presidio-San Pedro (HR11), Nazas-Aguanaval (HR36) and Mapimí (HR35), (Watershed water-flow simulator [SIATL], 2015) (Figure 2).

- I. Identificación de la superficie sembrada con cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo la modalidad hídrica de temporal en el estado.
- II. Se utilizó el generador climático PARAMETROS2 y WXPARM (Sánchez, Bueno, Esquivel, & Velásquez, 2014) para obtener los parámetros de clima que definen la región y se usó el generador estocástico Long Ashton Research Station Weather Generator (LARS-WG por sus siglas en inglés) Semenov & Stratonovitch (2010), el cual simuló los escenarios de cambio climático regionalizados A2 y A1B con base en la metodología propuesta por Zermeño (2008) y Magaña (2010).
- III. Posteriormente las matrices que definen las condiciones climáticas en la región de estudio se utilizó el modelo de cultivo Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC por sus siglas em inglés) para evaluar el impacto en el rendimiento del cultivo (Huicong, Jingai, Chunxiang, Donghua & Peijun, 2012).
- IV. Finalmente, se realizó una distribución espacial de la información tanto histórica como por efecto del cambio climático (Figura 1).

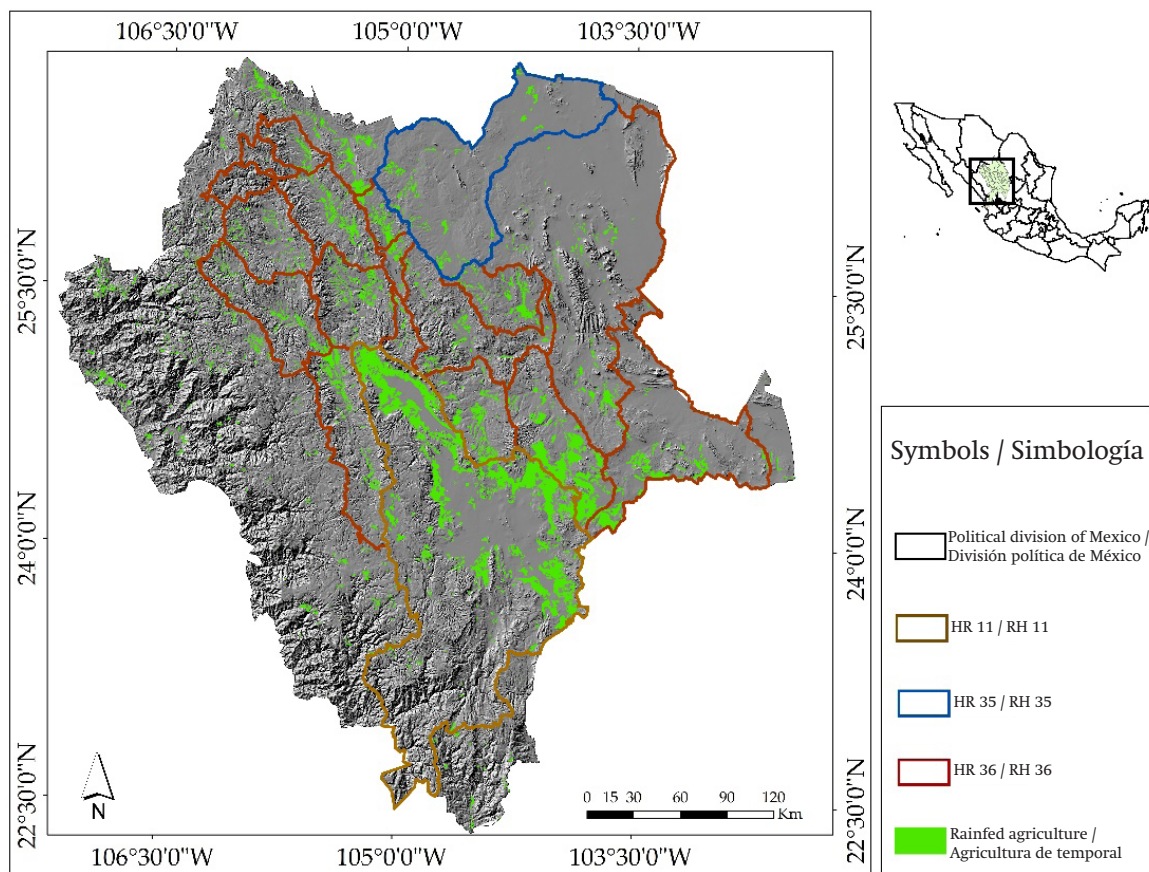


Figure 2. Geographical location of the study area.

Figura 2. Localización geográfica de la zona de estudio.

**Table 1. Watersheds in the state of Durango with rainfed agriculture.****Cuadro 1. Cuencas del estado de Durango con agricultura de temporal.**

Hydrological Region Key/ Clave Región hidrológica	Hydrological Region Name/ Nombre de Región Hidrológica	Watershed key/ Clave de cuenca	Watershed name/ Nombre de cuenca	Watershed area (km <sup>2</sup> )/ Área de cuenca (km <sup>2</sup> )	Perimeter (km)/ Perímetro (km)
HR11	Presidio-San Pedro	RH11 <sup>a</sup>	R. San Pedro	29,366.53	1,650.82
HR35	Mapimí	RH35F	A. de la India – L. Palomas	14,073.57	813.51
HR36	Nazas-Aguanaval	RH36 <sup>a</sup>	R. Nazas - Torreón	16,988.54	932.23
		RH36B	R. Nazas - Rodeo	11,867.16	762.5
		RH36C	P. Lázaro Cárdenas	18,321.64	1,162.12

To identify the bean-producing areas, historical yield (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2014) and productive potential statistics of the crop in the state of Durango (Díaz et al., 2012) were used. The agricultural area of the state is 635,000 hectares, of which approximately 555,000 (87 %) are established under rainfed conditions.

The area in the spring-summer cycle of the 1999-2012 period reached an annual average of close to 250,000 hectares planted with different varieties of bean, representing 45 % of the total area sown under rainfed conditions (SIAP, 2014). The distribution of the rain-fed area converges mainly in watersheds in HR 11, HR35 and HR36 (Table 1) (SIATL, 2015).

#### Analysis of historical climate data and climate change scenarios

Historical climate records were obtained from the Rapid Climatological Information Extractor III v 2.0 (ERIC III) of the *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua* (IMTA, 2009). In the study area at least one weather station for each bean-producing municipality was identified. Finally, 38 weather stations, to which a consistency analysis of the information was performed to detect outliers attributable to capture or other errors, were used.

The regionalized climate scenarios were obtained by the LARS-WG v. 5.0 stochastic generator (Semenov & Stratonovitch, 2010) using the methodology proposed by Zermeño (2008) and Magaña (2010). From the regionalized climate scenarios, LARS-WG allowed generating daily temperature and precipitation data series for future periods under the A2 and A1B scenarios. For calibrating the method, daily data were generated for the variables precipitation, maximum temperature and minimum temperature for the period 2030 under the A2 and A1B scenarios (Zermeño, 2008).

The historical daily data and regionalized climate change scenarios were processed using two tools in MS-DOS format called PARAMETROS2 and WXPARM

#### Área de estudio

Como estudio de caso se eligió el cultivo de frijol bajo la modalidad hídrica de temporal, cultivo más importante bajo este régimen pluviométrico en el estado de Durango, México (Figura 2) entidad federativa localizada en la zona noroeste de la parte central de la República mexicana, su gradiente altitudinal oscila entre los 200 a 3,200 metros sobre el nivel del mar, con clima semiseco templado y templado subhúmedo con lluvias en verano (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 2014). Las zonas de temporal convergen en tres regiones hidrológicas administrativas (RH); Presidio-San Pedro (RH11), Nazas-Aguanaval (RH36) y Mapimí (RH35), (Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas [SIATL], 2015) (Figura 2).

Para identificar las zonas productoras de frijol se utilizaron las estadísticas históricas de producción del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2014) así como el potencial productivo del cultivo en el estado de Durango (Díaz et al., 2012). La superficie agrícola del estado es de 635 mil hectáreas, de las cuales aproximadamente 555 mil (87 %) se establecen bajo condiciones de temporal.

La superficie en el ciclo primavera-verano del periodo 1999-2012 alcanzó un promedio anual cercano a 250 mil hectáreas sembradas con diferentes variedades de frijol, lo que representa el 45 % del total de la superficie sembrada bajo condiciones de temporal (SIAP, 2014). La distribución de la superficie de temporal converge principalmente en cuencas de las RH 11, RH35 y RH36 (Cuadro 1) (SIATL, 2015).

#### Análisis de datos climáticos históricos y escenarios de cambio climático

Los registros históricos de clima fueron obtenidos del Extractor Rápido de Información Climatológica III v 2.0 (ERIC III) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2009). En el área de estudio se identificó al menos una estación climatológica para cada municipio

**Table 2. Matrix \*.lis outcome of the PARAMETROS2 – WXPARM routine.**  
**Cuadro 2. Matriz \*.lis resultado de la rutina PARAMETROS2 - WXPARM.**

1	10012-42.dat				NO YRS SIM = 42								
Month/Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
TMAX	24	26.6	30.1	32.7	35.1	34.9	32.9	32.3	31	29.9	27.3	24.3	DEG C
TMIN	6.5	7.7	10.6	14.1	17.1	18.3	17.9	17.3	16	13.2	9.9	7.5	DEG C
SDTMAX	5.1	4.7	4.1	3.7	3.4	3.4	3.1	3.5	4.1	4.4	5	5.3	DEG C
SDTMIN	3.8	3.7	3.5	3.1	2.5	2.2	1.8	1.6	2.1	2.8	3.4	3.7	DEG C
RAIN	10.8	4.5	4.3	6.5	16.1	49.8	85	96	75.6	23.7	9.5	10.6	MM
SDRF	6.75	6.3	10.4	5.3	8.84	8.63	9.69	11.15	12.1	9.66	7.21	5.01	MM
SKRF	2.111	2.309	3.115	1.285	6.284	2.272	2.722	2.129	2.676	3.829	3.616	2.288	
P W/D	0.038	0.023	0.014	0.034	0.071	0.147	0.25	0.233	0.179	0.091	0.036	0.046	
P W/W	0.338	0.297	0.28	0.18	0.248	0.475	0.519	0.556	0.5	0.325	0.403	0.356	
DAY P	1.7	0.9	0.6	1.2	2.7	6.6	10.6	10.7	7.9	3.7	1.7	2.1	
S RAD													LY
R HUM													%
W VEL													M/SEC
SDWVEL													M/SEC
SKWVEL													
AVE AN RF = 392.5 mm													

to obtain the matrix \*.lis that specify the monthly climatic conditions of each study site (Table 2). The PARAMETROS2 routine required a Microsoft Excel input file in comma-separated format (\*.csv), which generated a file that became an input file for the WXPARM routine. This model allowed grouping the daily temperature and precipitation values into mean monthly values, as well as their statistical parameters.

The WXPARM model was originally generated as a subroutine of the EPIC model, which is widely used to determine soil productivity under erosion conditions (Maldonado, Palacios, Springall & Fernández, 2001). However, this model is also used independently of EPIC to synthesize precipitation, temperature, wind and solar radiation data.

### Crop model

The Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC) model was used to estimate bean crop yield (Huicong et al., 2012). Model calibration was performed considering the environmental conditions of the matrix \*.lis obtained in step II, the productive potential of the crop (Diaz et al, 2012) and the usual management practices for each site of the study region (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias [INIFAP], 2005). The model accurately simulated bean crop yields for the 38 sites analyzed, which were collated with the historical average yields reported in the SIAP (2014).

productor de frijol. Finalmente se utilizaron 38 estaciones climatológicas, a las cuales se realizó un análisis de consistencia de la información para detectar datos atípicos atribuibles a errores de captura o de otro tipo.

Los escenarios climáticos regionalizados fueron obtenidos mediante el generador estocástico LARS-WG v. 5.0 (Semenov & Stratonovitch, 2010) a partir de la metodología propuesta por Zermeño (2008) y Magaña (2010). A partir de los escenarios climáticos regionalizados, LARS-WG permitió generar series de datos diarios de temperatura y precipitación para periodos futuros bajo los escenarios A2 y A1B. Para fines de calibración del método, se generaron datos diarios para las variables precipitación, temperatura máxima y mínima, para el periodo 2030 bajo los escenarios A2 y A1B (Zermeño, 2008).

Los datos diarios históricos así como los escenarios regionalizados de cambio climático fueron procesados mediante dos herramientas en formato MS-DOS denominados PARAMETROS2 y WXPARM para obtener la matriz \*.lis que precisan las condiciones climáticas mensuales de cada sitio de estudio (Cuadro 2). La rutina PARAMETROS2 requirió de un archivo de entrada de Microsoft Excel en formato delimitado por comas (\*.csv), el cual generó un archivo que se convirtió en archivo de entrada para la rutina WXPARM. Este modelo permitió agrupar los valores diarios de temperatura y precipitación en valores medios mensuales, así como sus parámetros estadísticos.

Once the model was calibrated, yield under climate change conditions was estimated. This was done using the matrix generated from the regionalized climate scenarios (A2 and A1B) (Magaña, 2010).

It should be noted that the other crop model parameters remained similar, as only the climate part was modified. However, the crop model allows modifying any other variable of interest as much as the user requires it, such as planting date, different crop tasks, and conservation works. The sensitivity of the EPIC model for predicting yield has been documented by Wang, He, Williams, Izurralde & Atwood (2005); in addition, studies show that EPIC can be one of the most recommendable models to simulate crops in the medium to long term (Gaiser, Barros, Sereke & Lange, 2010).

### Spatial distribution of information

The matrix \*.lis allowed grouping the daily temperature and precipitation values into mean monthly values, which made it possible to obtain the annual values of the historical climate records and of the regionalized climate change scenarios. Using a geographic information system (ArcGis v. 10.0), interpolation processes were performed to obtain the spatial distribution of the climate information (maximum temperature, minimum temperature, precipitation) and bean yield (under current and climate change conditions) by the output of thematic maps.

### Results

The methodology allowed obtaining regionalized climate change scenarios for the study area, as well as the likely impact on bean crop yield derived from these scenarios. For the maximum temperature variable, in the northeastern part of the state increases of 0.6 °C for the A2 scenario and 0.7 °C for the A1B scenario are expected; in the western region an increase of 0.7 °C is projected for the two scenarios, while in the southern part the increases would be 1.4 °C (A2) and 1.5 °C (A1B), with respect to historical values.

Regarding minimum temperature, in the central and northeastern parts of the state increases of 1.1 °C for the A2 scenario and 1.0 °C for the A1B scenario, with respect to historical records, are expected. The southern part maintains similar temperatures in both the observed and projected values (Figure 3).

Concerning precipitation, the northeastern part of the state remains similar in terms of the historical value of average annual rainfall (264 - 492 mm range) with respect to the A2 (272 - 494 mm) and A1B (268 - 495 mm) scenarios. In the western part (municipalities of Tamazula and Topia), the historical average rainfall is 1,100 mm, whereas the A2 and A1B scenarios indicate a

El modelo WXPARM fue generado originalmente como una subrutina del modelo EPIC, que es usado ampliamente para conocer la productividad del suelo bajo condiciones de erosión (Maldonado, Palacios, Springall & Fernández, 2001). Sin embargo, este modelo es también utilizado de forma independiente de EPIC para sintetizar datos de precipitación, temperatura, viento y radiación solar.

### Modelo de cultivo

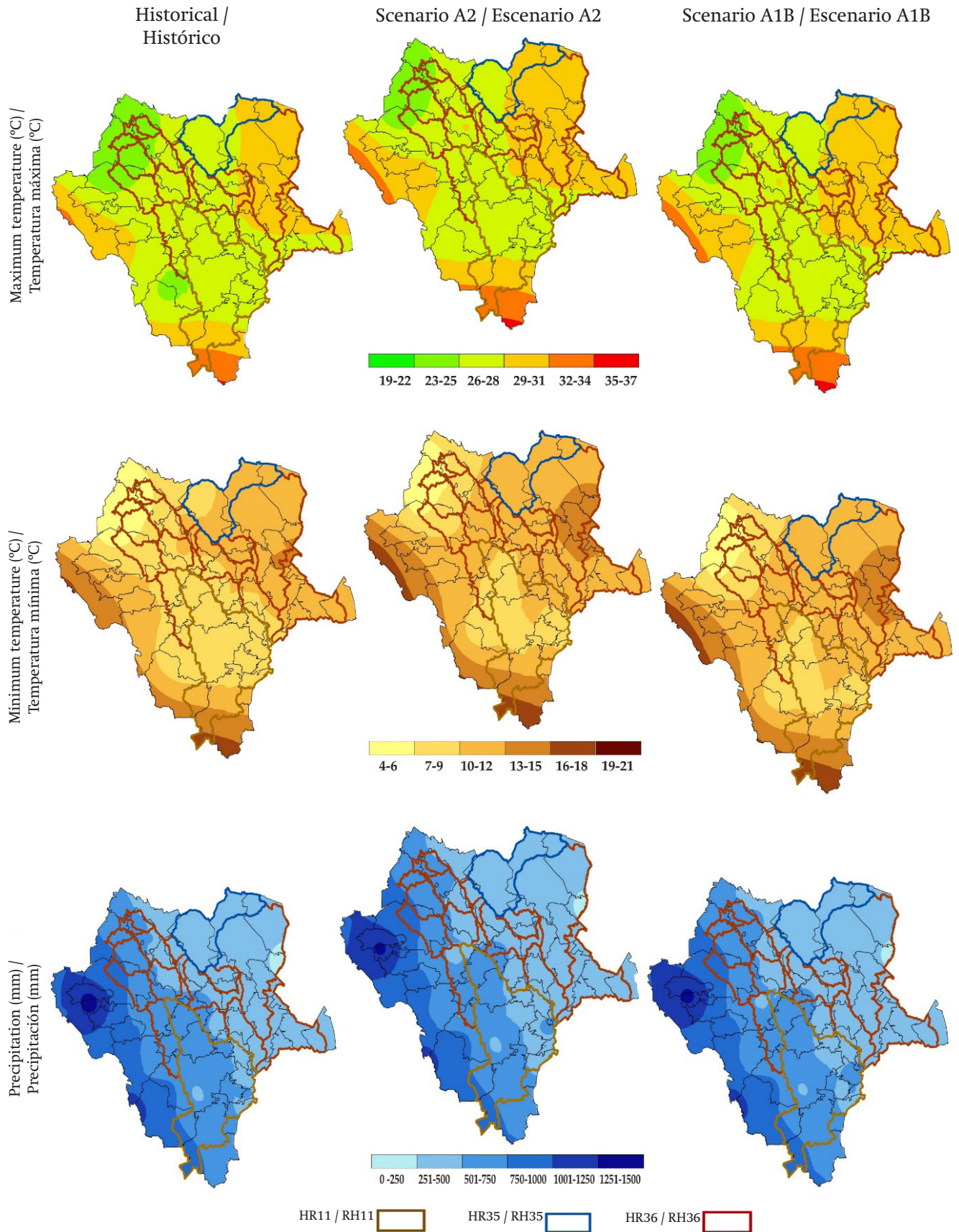
Para estimar el rendimiento del cultivo de frijol se utilizó el modelo EPIC (Huicong et al., 2012). La calibración del modelo se efectuó considerando las condiciones medioambientales de la matriz \*.lis obtenida en el paso II, el potencial productivo del cultivo (Díaz et al, 2012) y las prácticas de manejo usuales para cada sitio de la región de estudio (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias [INIFAP], 2005). El modelo simuló de manera precisa los rendimientos del cultivo de frijol para los 38 sitios analizados, los cuales fueron cotejados con los rendimientos promedio históricos reportados en el SIAP (2014).

Una vez calibrado el modelo, se estimó el rendimiento bajo condiciones de cambio climático. Lo anterior se hizo con el uso de la matriz generada a partir de los escenarios climáticos regionalizados (A2 y A1B) (Magaña, 2010).

Cabe precisar que los demás parámetros del modelo de cultivo se mantuvieron similares, solo la parte climática fue modificada. Sin embargo, el modelo de cultivo permite modificar cualquier otra variable de interés tanto como el usuario lo requiera. Como por ejemplo, la fecha de siembra, diferentes labores de cultivo, obras de conservación. La sensibilidad del modelo EPIC para predecir rendimiento ha sido documentada por Wang, He, Williams, Izurralde & Atwood, (2005) asimismo estudios señalan que EPIC puede ser uno de los modelos más recomendables para simular los cultivos de mediano a largo plazo (Gaiser, Barros, Sereke & Lange, 2010).

### Distribución espacial de la información

La matriz \*.lis permitió agrupar los valores diarios de temperatura y precipitación en valores medios mensuales, lo que posibilitó obtener los valores anuales de los registros históricos de clima como de los escenarios regionalizados de cambio climático. Mediante un sistema de información geográfica (ArcGis v. 10.0), se realizaron procesos de interpolación para obtener la distribución espacial de la información de clima (temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación) como de rendimiento de frijol (bajo condiciones actuales y de cambio climático) mediante la salida de mapas temáticos.



**Figure 3. Result of climate analysis for the study region. Historical information, regionalized scenarios A2 and A1B to the 2030 period.**

**Figura 3. Resultado del análisis climático para la región de estudio. Información histórica, escenarios A2 y A1B regionalizados al periodo 2030.**

possible increase since they would reach 1,240 and 1,236 mm respectively. By contrast, municipalities such as Canelas, Pueblo Nuevo, Tepehuanaes and San Dimas may experience a decrease in their average rainfall from 1,050 to 970 and 990 mm, while Santiago Papasquiaro would go from 554 to 470 mm (A2) and 480 mm (A1B) (Figure 3).

### Yield modeling

Figure 4 shows the observed distribution of historical bean yields (a), under the A2 scenario (b), and under the A1B scenario (c). Based on simulations with the crop model under climate change conditions, yield increased at some sites, decreased at others and remained the same at the rest. Of the municipalities with the largest area sown with bean in the state, the municipality of Guadalupe Victoria has an average historical yield of 600 kg·ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2014), with a projected yield of 700 kg·ha<sup>-1</sup> for the A2 and A1B scenarios. The municipality of Cuencamé maintained its productivity at 600 kg·ha<sup>-1</sup>, while Pánuco de Coronado and Poanas retained their yield at 500 kg·ha<sup>-1</sup> for the A2 and A1B scenarios, respectively.

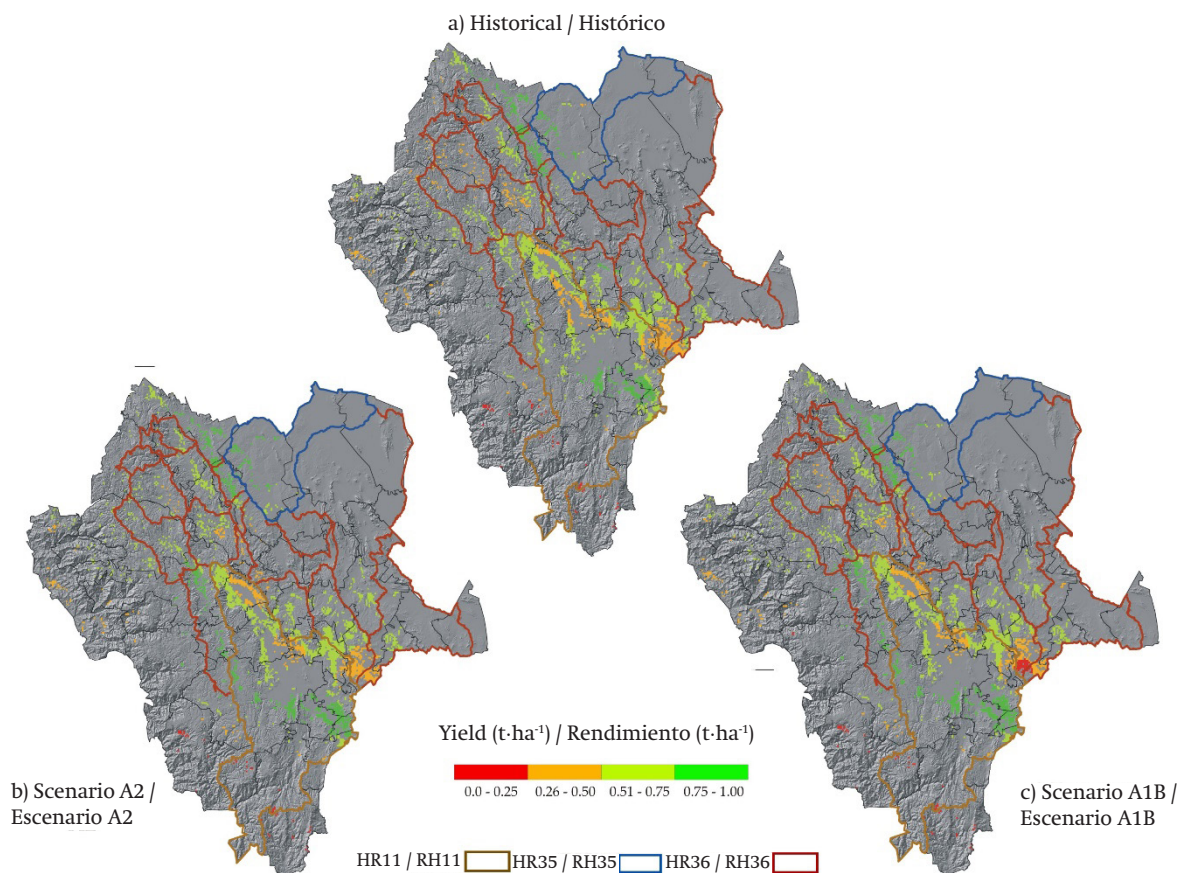
The northern part of the state maintained the same distribution in both the historical and climate change

### Resultados

La metodología permitió obtener los escenarios de cambio climático regionalizados para la zona de estudio, así como el impacto probable en el rendimiento del cultivo de frijol derivado de estos escenarios. Para la variable temperatura máxima, en la parte noreste del estado se esperan incrementos de 0.6 °C para el escenario A2 y de 0.7 °C para el escenario A1B; en la región oeste se proyecta un aumento de 0.7 °C para los dos escenarios, mientras que en la parte sur los aumentos serían de 1.4 °C (A2) y de 1.5 °C (A1B), con respecto a los valores históricos.

En relación con la temperatura mínima, la región centro y noreste del estado precisan un aumento para el escenario A2 de 1.1 °C y de 1.0 °C para el escenario A1B, respecto a los registros históricos. La parte sur mantiene las temperaturas similares tanto en lo observado como en lo proyectado (Figura 3).

Relativo a la precipitación, la parte noreste del estado se mantiene similar en cuanto al valor histórico de precipitación promedio anual (rango de 264 – 492 mm) con respecto al escenario A2 (272 - 494 mm) y A1B (268 – 495 mm). En la parte oeste (municipios de Tamazula y



**Figure 4. Results of the bean crop yield analysis. Historical and regionalized scenarios A2 and A1B.**

**Figura 4. Resultados del análisis del rendimiento del cultivo Frijol. Histórico y escenarios A2 y A1B regionalizados.**

modeling values. However, the central region of the state shows a negative change because some sites experienced a decrease in their yield. In the most representative municipalities, Coneto de Comonfort went from 600 kg·ha<sup>-1</sup> to 400 kg·ha<sup>-1</sup> in the A2 and A1B scenarios, and Indé fell from 900 kg·ha<sup>-1</sup> to 800 kg·ha<sup>-1</sup> in both scenarios respectively. Finally, in the southeastern part of the state in the A1B scenario, Figure 4 (c) shows a drop in productivity, going from 300 kg·ha<sup>-1</sup> to 230 kg·ha<sup>-1</sup>.

## Discussion

The earlier-described unevenness in the terrain's elevation in the study region gives rise to a wide variety of landscapes and natural resources, so climatic elements show complex variations. This is demonstrated in the regionalized climate change scenarios, which indicate different-magnitude increases in the variables maximum and minimum temperature. However, none of the stations used showed temperature decreases, indicating that the thermal gradient between the maximum and minimum temperature may decrease.

Concerning precipitation, the current situation regarding the scenarios projects similar behavior in terms of spatial distribution in the state, as only four municipalities had increases in precipitation and only one a decrease.

In the state of Durango the presence of surface soils with low moisture-retention capacity and poor rainfall distribution are the factors most influencing bean yield in the study area (Osuna et al., 2011). Four municipalities (Guadalupe Victoria, Cuencamé, Panuco de Coronado and Poanas) account for approximately 60 % of the area planted with this crop in the state. Historical yields range from 500 to 600 kg·ha<sup>-1</sup> SIAP (2014); the other municipalities, but with less area, can reach 800 to 900 kg·ha<sup>-1</sup>.

According to the scenarios used, the yield on some sites would be expected to increase by about 0.1 t·ha<sup>-1</sup>, whereas in most cases the historical production will be maintained. Recent studies comparing various general circulation models (IPSL-CM5A-LR, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, HadGEM2-ES) and crop models (LPJmL, DSSAT) indicate yield reductions in the crops analyzed; however, the magnitudes differ substantially depending on the model used (Nelson & Shively, 2014).

Although variations in temperature, rainfall and yield per site analyzed could be discerned as irrelevant, in terms of production under rainfed conditions, they should not be minimized because they pose a serious risk to the area devoted to crop production.

Topia), la precipitación promedio histórica es de 1,100 mm, los escenarios A2 y A1B indican un posible aumento pues alcanzarían 1,240 y 1,236 mm respectivamente. Por el contrario, municipios como Canelas, Pueblo Nuevo, Tepehuanes y San Dimas, podrían disminuir su precipitación promedio de 1,050 a 970 y 990 mm, mientras que Santiago Papasquiaro pasaría de 554 a 470 mm (A2) y 480 mm (A1B) (Figura 3).

## Modelación de rendimiento

La Figura 4 muestra la distribución observada de los rendimientos históricos de frijol (a), bajo el escenario A2 (b), y bajo el escenario A1B (c). Con base en las simulaciones con el modelo de cultivo bajo condiciones de cambio climático, el comportamiento de algunos sitios en cuanto al rendimiento aumentó, disminuyó y en ciertos casos se mantuvo con el mismo valor. De los municipios con mayor superficie sembrada de frijol en el estado, se encuentra el municipio de Guadalupe Victoria donde su producción histórica promedio es de 600 kg·ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2014) teniendo como proyección un rendimiento de 700 kg·ha<sup>-1</sup> para el escenario A2 como A1B. El municipio de Cuencamé mantuvo su productividad en 600 kg·ha<sup>-1</sup>, mientras que Pánuco de Coronado y Poanas conservaron su rendimiento en 500 kg·ha<sup>-1</sup> para los escenarios A2 y A1B, respectivamente.

La parte norte del estado se mantiene con la misma distribución tanto en lo histórico como en el modelado bajo cambio climático. Sin embargo, la región central del estado denota un cambio negativo debido a que algunos sitios resultaron con disminución en su rendimiento. En los municipios más representativos, Coneto de Comonfort pasó de 600 kg·ha<sup>-1</sup> a 400 kg·ha<sup>-1</sup> en el escenario A2 como A1B e Indé de 900 kg·ha<sup>-1</sup> a 800 kg·ha<sup>-1</sup>, en los dos escenarios respectivamente. Finalmente, en la parte sureste del estado en el escenario A1B de la Figura 4 (c), muestra una caída en la productividad, al pasar de 300 kg·ha<sup>-1</sup> a 230 kg·ha<sup>-1</sup>.

## Discusión

La irregularidad de la elevación del territorio en la región de estudio ya descrita, da origen a una amplia variedad de paisajes y recursos naturales, por lo que los elementos climáticos presentan variaciones complejas. Esto se demuestra en los escenarios de cambio climático regionalizados, que indican aumentos en las variables de temperatura máxima y mínima, en diferente magnitud. Sin embargo, ninguna de las estaciones utilizadas presentó disminuciones de temperatura, lo que indica que el gradiente térmico entre la temperatura máxima y la mínima podría disminuir.

Concerniente a la precipitación, la situación actual con respecto a los escenarios proyecta un comportamiento

## Conclusions

An approximation method to quantify changes in climate patterns and their impact on bean yield in the state of Durango, main crop established under the rainfed regime, is proposed. The methodology is based on a sequence of models, which converge by becoming an output file in the input file to the following algorithm (nested algorithms).

According to the algorithm, bean crop productivity will undergo increases and decreases of about 100 kg·ha<sup>-1</sup>, while for the most part yields are expected to continue being similar to historical levels. However, further analysis should be conducted under different tillage conditions to guide better planning and decision-making in crops planted under rainfed conditions.

The proposed methodology can be used to evaluate different types of crops, grown under either irrigated or rainfed conditions, assessing various tillage systems, changing planting dates, etc., thereby aiding in the delineation of areas vulnerable to climate change. Other future scenarios can also be used to evaluate the possible effect on crop yield, to the extent the user so desires.

*End of English version*

## References / Referencias

- Aggarwal, P. K., Kalra, N., Chander, S. & Pathak, H. (2006). InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yield, losses due to pest, and environmental impact of agro-ecosystem in tropical environments: I. Model Description. *Agricultural Systems*, 89 (1), 1 - 25
- Antle, J. M. (2009). *Agriculture and the Food System: Adaptation to Climate Change*, Resources for the Future, Washington, DC, USA. Pp 28. Obtenido de: <http://climatefruitandwine.co.za/download/RFF-US-Based.Agric.and.Adaptation-Antle.2009.pdf>
- Anwar, M. R., Liu, D. L., Macadam, I., & Kelly, G. (2013). Adapting agriculture to climate change: a review. *Theoretical and Applied Climatology*, 113, 225-245 DOI 10.1007/s00704-012-0780-1
- Díaz, P. G., Guajardo, P. A. R., Medina G. G., Sánchez, C. I., Soria, R. J., Vásquez, A. J. M.,...Ruiz, C. J. A. (2012). Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México. INIFAP. *Publicación Especial Núm. 8*. ISBN: 978-607-425-766-3 140 pp.
- Food and Agriculture Organization Of The United Nations (FAOSTAT). (2014). Consultado 20 julio 2014 en <http://faostat.fao.org/site/377/default.aspx#ancor>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2009) ¿Por qué invertir en ordenación de las cuencas hidrográficas?. Roma, Italia. 44 p. <http://www.fao.org/docrep/012/a1295s/a1295s00.pdf>

similar en cuanto a la distribución espacial en el estado, solo cuatro municipios resultaron con incrementos y solo un municipio con disminución en la precipitación.

En el estado de Durango la presencia de suelos superficiales con baja capacidad de retención de humedad y la mala distribución de la lluvia, son los factores que más influyen en el rendimiento de frijol en la zona de estudio (Osuna et al., 2011). Cuatro municipios (Guadalupe Victoria, Cuencamé, Panuco de Coronado y Poanas) concentran aproximadamente el 60 % de la superficie sembrada de este cultivo en el estado. Los rendimientos históricos oscilan de los 500 a 600 kg·ha<sup>-1</sup> SIAP (2014), los otros municipios aunque con menos superficie pueden alcanzar de 800 a 900 kg·ha<sup>-1</sup>.

De acuerdo a los escenarios utilizados, el rendimiento en algunos sitios se esperaría incrementar alrededor de 0.1 t·ha<sup>-1</sup>, mientras que en la mayoría de los casos se mantendrá la producción histórica. Estudios recientes que comparan diversos modelos de circulación general (IPSL-CM5A-LR, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, HadGEM2-ES) y modelos de cultivo (LPJmL, DSSAT), indican reducciones en el rendimiento de los cultivos analizados, sin embargo, las magnitudes difieren substancialmente del modelo a utilizar (Nelson & Shively, 2014).

Cabe resaltar, que aunque las variaciones en temperatura, precipitación y rendimiento por sitio analizado podrían vislumbrarse como irrelevantes, en términos de producción bajo condiciones de temporal, no se debe minimizar ya que el riesgo que esto representa es de consideración por la superficie destinada a la producción del cultivo.

## Conclusiones

Se propone un método de aproximación para cuantificar las variaciones en los patrones de clima sobre el rendimiento de frijol en el estado de Durango, principal cultivo establecido bajo el régimen de temporal. La metodología se basa en una secuencia de modelos, los cuales convergen al convertirse un archivo de salida en archivo de entrada al siguiente algoritmo (algoritmos anidados).

Según el algoritmo, la productividad del cultivo de frijol tendrá incrementos y disminuciones de alrededor de 100 kg·ha<sup>-1</sup>. Mientras que en la mayor parte se espera se sigan obteniendo rendimientos similares a los históricos. Sin embargo, se debe continuar con el análisis bajo diferentes condiciones de labranza que orienten a una mejor planeación y toma de decisiones, en cultivos establecidos bajo condiciones de temporal.

- Gaiser, T., Barros, I., Sereke, F., & Lange, F. M. (2010). Validation and reliability of the EPIC model to simulate maize production in small-holder farming systems in tropical sub-humid West Africa and semi-arid Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 135, 318 - 327
- Huicong, J., Jingai, W., Chunxiang, C., Donghua, P., & Peijun, S. (2012). Maize drought disaster risk assessment of China based on EPIC model. *International Journal of Digital Earth*, 5(6), 488-515. doi:10.1080/17538947.2011.590535
- Instituto Mexicano de Tecnología de Agua (IMTA). (2009). *Extractor Rápido de Información Climatológica v. 3.0 (ERIC III)*. Base de datos y Software. Jiutepec, Morelos, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2014). *Anuario estadístico y geográfico de Durango*. INEGI. México. ISBN 978-607-739-346-7. [http://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF\\_Docs/DGO\\_ANUARIO\\_PDF.pdf](http://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/DGO_ANUARIO_PDF.pdf)
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2005). *Guía para la asistencia técnica agrícola. Área de influencia del campo experimental "Valle del Guadiana"*. 3ª edición. Durango, Dgo. México. ISBN: 968-800-635-1 217 pp.
- Ioan, I. & Radulescu, C. V. (2015). New challenges for agriculture within the context of climate change. *Theoretical and Applied Economics*, 4(605), 253 - 262
- Krishnan, P., Ramakrishnan, B., Rao, K. S., & Dash, R. N. (2009). Simulation studies to characterize the impact of climate change on crop production and to identify strategies for adaptation and mitigation. In: Singh, S. N. *Climate change and crops*. National Botanical Research Institute. (NBRI) Environmental Science Division. India. pp 39 - 61
- Ko, J., Piccinni, G., & Steglich, E. (2009). Using EPIC model to manage irrigated cotton and maize. *Agricultural Water Management*, 96: 1323 - 1331
- Magaña, R. V. O. (2010). *Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones*. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. México. D.F. 80 pp.
- Maldonado, O. A., Palacios, O. L., Springall, R., & Fernández, D. S. (2001). Empleo del Modelo SWRRB para generar alternativas de manejo en la cuenca Itzapa, Guatemala. *Agrociencia*, 35(3), 335 - 345
- Nelson, G. C., Van der Mensbrugghe, D., Ahammad, H., Blanc, E., Calvin, K., Hasegawa, T.,...Willenbockel, D. (2014). Agriculture and climate change in global scenarios: why don't the models agree. *Agricultural Economics*, 45, 85 - 101.
- Nelson, G. C. & Shively, G. E. (2014). Modeling climate change and agriculture: an introduction to the special issue. *Agricultural Economics*, 45, 1 - 2
- Osuna, C. E. S., Acosta, G. J. A., Reyes, M. L., Martínez, G. M. A., Padilla, R. J. S., Ventura, R. E.,...Hernández, R. I. Conforme a la metodología propuesta se pueden evaluar diferentes tipos de cultivo, ya sea bajo condiciones de riego o de temporal, evaluando diversos sistemas de labranza, modificando fechas de siembra, etc., lo que auxiliaría en la delimitación de zonas vulnerables al cambio climático. Asimismo, se pueden utilizar otros escenarios futuros y evaluar el efecto posible en el rendimiento del cultivo, tanto como el usuario así lo desee.
- Fin de la versión en español*
- 
- (2011). *Tecnología para incrementar la producción de frijol de temporal en el altiplano semiárido de México*. Folleto para productores No. 44. ISBN: 978-607-425-562-1. Campo experimental Pabellón CIRNOC-INIFAP. Pabellón de Arteaga, Ags. 42 pp.
- United Nations (UN). (2011). World population to reach 10 billion by 2100 if fertility in all countries converges to replacement level. [http://esa.un.org/wpp/Other-Information/Press\\_Release\\_WPP2010.pdf](http://esa.un.org/wpp/Other-Information/Press_Release_WPP2010.pdf)
- Rosenzweig, C. (2007). *Climate Change & Agriculture. Learning lessons & proposing solutions*. Iowa State University. U.S.A. Pp 28.
- Sánchez, C. I., Bueno, H. P., Esquivel, A. G. & Velásquez, V. M. A. (2014). Simulación de procesos hidrológicos en cuencas poco instrumentadas. Folleto técnico num. 35. INIFAP. 102 pp.
- Semenov, M. A. & Stratonovitch, P. (2010). Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, 41, 1 - 14
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2014). SIIGAP, aplicación web para generar y visualizar mapas de producción del sector agroalimentario y pesquero. <http://www.cmgs.gob.mx:8080/mapasdinamicos/>
- Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL). (2015). [http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/SIATL/](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/)
- Trethowan, R. M., Turner, M. A. & Chattha, T. M. (2010). Breeding strategies to adapt crops to a changing climate. In: Lobell, D. & Burke, M. (eds.), *Climate change and food security, advances in global change research*, 37, 175 - 154
- Wang, X., He, X., Williams, J. R., Izurralde, R. C. & Atwood, J. D. (2005). Sensitivity and uncertainty analysis of crop yields and soil organic carbon simulated with EPIC. *Transactions of the American society of agricultural engineers*, 48(3), 1041 - 1054
- Zermeño, D. D. M. (2008). *Análisis probabilístico de escenarios escalados de precipitación y temperatura bajo cambio climático en México*. Tesis de maestría. Posgrado en ciencias de la Tierra. Centro de ciencias de la atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.