

Climate change impact on rainfed agriculture in Aguascalientes, Mexico in the near future (2015-2039)

Impacto del cambio climático en la agricultura de secano de Aguascalientes, México para un futuro cercano (2015-2039)

Iván Montiel-González¹, Santos Martínez-Santiago¹, Armando López Santos^{*1}, Gabriel García Herrera²

¹Universidad Autónoma Chapingo, Programa de Maestría en Recursos Naturales y Medioambiente de Zonas Áridas de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Bermejillo, Durango, México.

²Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Bermejillo, Durango, México. *Autor para correspondencia: alopez@chapingo.urruza.edu.mx; armando.lopezsantos@gmail.com

Abstract:

The objectives of this research were: 1) to assess the probable impacts of climate change (CC) on rainfed agriculture (RA) in Aguascalientes, Mexico based on the HadGEM2-ES model for radiative forcing 8.5 in the near future, 2015-2039; and 2) to determine the magnitude of the CC impacts on the productive capacity of RA through analysis of the variability of mean annual precipitation (MAP). The study unit was the territory of Aguascalientes, where the predominant climates are semi-dry [BS₁kw, BS₁hw(w)] and temperate subhumid [C(wO)], with MAP of 526 mm. The evaluation of the potential impact of CC on RA in Aguascalientes is based on an analysis of the soil and topographic characteristics under which this activity is practiced and is complemented by the analysis of the MAP for the near future, supported by SPOT satellite imagery. The results indicate probable increases in MAP of 20 %, which does not necessarily ensure a positive impact on maize crop productivity, since there are other factors associated with soil and topographic conditions and land-use policies that determine its success.

Keywords: climate change scenarios, radiative forcing, mitigation, adaptation.

Resumen

Los objetivos de la investigación fueron: 1) Evaluar los impactos probables del cambio climático (CC) en la agricultura de secano (AS) en Aguascalientes, México, con base en el modelo HadGEM2-ES para el forzamiento radiativo 8.5 en un futuro cercano, 2015-2039; y 2) Determinar la magnitud de los impactos del CC en la aptitud productiva de la AS a través del análisis de la variabilidad de la precipitación media anual (PMA). La unidad de estudio comprendió el territorio de Aguascalientes, cuyos climas predominantes son semiseco [BS₁kw, BS₁hw(w)] y templado subhúmedo [C(wO)], y PMA de 526 mm. La evaluación del impacto potencial del CC en la AS de Aguascalientes se basa en el análisis de características edáficas y topográficas en las cuales se practica esta actividad y se complementa con el análisis de la PMA para el futuro cercano, apoyados con imágenes satelitales tipo SPOT. Los resultados indican incrementos probables en la PMA del 20 %, lo cual no necesariamente garantiza un impacto positivo en la productividad del cultivo de maíz, ya que hay factores asociados a las condiciones edáficas, topográficas y de las políticas de uso de la tierra que determinan el éxito del mismo.

Palabras clave: escenarios climáticos, forzamiento radiativo, mitigación, adaptación.

Introduction

The intensification of the variability of hydrometeorological phenomena at a global level has impacted, in a short time and in diverse ways, natural and man-made systems (Bellon, Hodson, & Hellin, 2011; IPCC, 2007; Jean-François et al., 2017; Reed & Stringer, 2015). According to the Fifth Assessment Report (AR5) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2014), the impacts attributable to this problem for tropical and temperate regions where the world's major food crops are grown (soybean, wheat, rice and maize) had negative yield rates per decade (1960-2013) with peaks between -2 and -3 %, respectively. Specifically for maize, the rate was -1.75 ± 1.25 %.

The IPCC (2007) in its previous report (AR4) warned that at the global level increases in temperature and greater rainfall variability should be expected with direct effects in all sectors of the economy, especially in primary activities (agriculture, livestock production and forestry). This was recently confirmed in AR5, based on the upward trend in the average global temperature in the 1986-2005 period, which was approximately 0.61 °C (0.55 to 0.67 °C), warmer than the 1850-1900 period. In this regard, the United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) mentions that in the course of a decade (2000-2010) extreme temperatures and long periods of drought have been recorded more frequently in all regions of the world (UNCCD, 2013).

Mexico's agricultural sector, due to its socioeconomic and ecological-geographical characteristics, has great vulnerability (IPCC, 2007, IPCC, 2014). Recurrent droughts irreversibly affect natural and man-made systems (López-Santos & Martínez-Santiago, 2015; Magaña, 2013). For example, the drought recorded in 2011 affected more than 40 % of the national territory (19 states) and resulted in costs estimated at just over 15 billion pesos, equivalent to 6.39 % of the Gross Domestic Product (GDP) of the agricultural sector (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [SEMARNAT-INECC], 2012). Some of the studies that have reported potential impacts of climate change based on different future scenarios are as follows.

Conde et al. (1997) evaluated the impact of CC on seven maize-producing sites (Atzacomulco, Mexico; Izúcar, Puebla; Ixcamilpa, Puebla; Coatepec, Veracruz; Tuxpan, Veracruz; La Huerta, Jalisco and Magdalena, Jalisco) using prediction modeling with Crop Environment Resource Synthesis (CERES) for maize (CERES-Maize), based on two models: CCCM (Canadian Climate Center Model) and GFDL-R30 (Geophysical Fluids Dynamics Laboratory), from daily temperature and precipitation

Introducción

La intensificación de la variabilidad de los fenómenos hidrometeorológicos a nivel global ha impactado en poco tiempo y de diversas formas a los sistemas naturales y antrópicos (Bellon, Hodson, & Hellin, 2011; IPCC, 2007; Jean-François et al., 2017; Reed & Stringer, 2015); según el Quinto Reporte de Valoración (AR5, por sus siglas en inglés) sobre Cambio Climático del International Panel on Climatic Change (IPCC, 2014), los impactos atribuibles a esta problemática para las regiones tropicales y templadas donde se cultivan los principales alimentos a nivel mundial (soya, trigo, arroz y maíz) presentaron tasas negativas en los rendimientos por decenio (1960-2013) con máximos entre -2 y -3 %, respectivamente; específicamente para maíz, la tasa fue de -1.75 ± 1.25 %.

El IPCC (2007) en su reporte previo (AR4) advirtió que a nivel global se esperarían incrementos de temperatura y mayor variabilidad de la lluvia con efectos directos en todos los sectores de la economía, especialmente en las actividades primarias (agricultura, ganadería y forestal); ello fue confirmado recientemente en el AR5; esto considerando la tendencia de incremento de la temperatura media global en el periodo de 1986 a 2005, que fue de aproximadamente 0.61 °C (0.55 a 0.67 °C), más caliente que el periodo de 1850 a 1900. En este sentido, la Convención Marco de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD, por sus siglas en inglés) menciona que en el transcurso de un decenio (2000-2010) se han registrado temperaturas extremas con más frecuencia y largos periodos de sequía en todas las regiones del mundo (UNCCD, 2013).

México, por sus características socioeconómicas y ecológico-geográficas, presenta gran vulnerabilidad sectorial (IPCC, 2007; IPCC, 2014). Las sequías recurrentes afectan de modo irreversible a sistemas naturales y antrópicos (López-Santos & Martínez-Santiago, 2015; Magaña, 2013); por ejemplo, la sequía registrada en 2011 se extendió en más del 40 % del territorio nacional (19 entidades) y conllevó costos estimados en poco más de 15 mil millones de pesos, equivalentes al 6.39 % del Producto Interno Bruto (PIB) del sector agropecuario (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [SEMARNAT-INECC], 2012). Algunos estudios que han reportado impactos potenciales del cambio climático con base en distintos escenarios futuros son los siguientes.

Conde et al. (1997) evaluaron impactos del CC en siete sitios productores de maíz (Atzacomulco, México; Izúcar, Puebla; Ixcamilpa, Puebla; Coatepec, Veracruz; Tuxpan, Veracruz; La Huerta, Jalisco y Magdalena, Jalisco) mediante modelación de predicción con CERES

data, and by assuming arbitrary temperature increases (+2 °C, +4 °C) and rainfall ($\pm 20\%$), they found that with a 2 °C increase in temperature and a 20 % decrease in precipitation, an 18 % increase in the areas not suitable for maize growing would occur. Monterroso, Conde, Rosales, Gómez, and Gay (2011) evaluated both Mexico's current territorial suitability for rainfed maize cultivation and by simulations of CC socioeconomic scenarios (A2 and B2) described in AR4 for the 2010-2039 period. They Monterroso et al., (2011) found that the areas with the greatest suitability are also the most vulnerable, estimating losses of up to 4.3 % of the current area. However, this type of knowledge has not been generated for the state of Aguascalientes, Mexico.

Thus, the objectives of the present research were: 1) to evaluate the probable impacts of CC on rainfed agriculture in Aguascalientes, Mexico, based on the HadGEM2-ES model for radiative forcing 8.5 in the near future, 2015-2039; and 2) to determine the magnitude of the impact of CC on the productive capacity of rainfed agriculture based on the analysis of rainfall variability.

Materials and methods

Description of the study unit (SU)

The territory of Aguascalientes was considered as the SU. It covers an area of 562.1 kilohectares (kha). Aguascalientes is located between 21.61 and 22.45° North latitude and -101.816 and -102.866° West longitude. This territory is bordered to the north, northeast and west by Zacatecas, and to the southeast and south by Jalisco (Figure 1).

About 86 % of the SU has either an arid (BS_1kw) or semi-arid $BS_1hw(w)$ climate, while the remaining 14 % has a temperate sub-humid climate with summer rains [C(wO)]. The annual temperature and precipitation averages are 17.4 °C and 526 mm, respectively; the elevation ranges from 1,540 to 3,050 masl (INEGI, 2005).

The SU consists of 11 municipalities (Figure 1). Their official names and references (municipal codes) are: Aguascalientes (001), Asientos (002), Calvillo (003), Cosío (004), Jesús María (005), Pabellón de Arteaga (006), Rincón de Romos (007), San José de Gracia (008), Tepezalá (009), El Llano (010) and San Francisco de los Romo (011) (INEGI, 2005). According to official data (SAGARPA-SIAP, 2014), in a ten-year period (2004-2013) 166.42 kha have been cultivated, representing 29.6 % of the state territory. Rainfed agriculture is carried out in 56 % of the cultivated area. The most important crop is maize in its different varieties: white, yellow and forage (GOBAGS, 2011).

(Crop Environment Resource Synthesis, por sus siglas en inglés) para maíz (CERES-Maize), con base en dos modelos: CCM (Canadian Climate Center Model, por sus siglas en inglés) y GFDL-R30 (Geophysical Fluids Dynamics Laboratory, por sus siglas en inglés), a partir de datos diarios de temperatura y precipitación y, al considerar incrementos arbitrarios de temperatura (+2 °C, +4 °C) y precipitación pluvial ($\pm 20\%$), encontraron, que con 2 °C de incremento de la temperatura y -20 % de precipitación, las áreas no adecuadas para el cultivo de maíz podrían incrementarse en un 18 %. Monterroso, Conde, Rosales, Gómez, y Gay (2011) evaluaron la aptitud territorial actual de México para el cultivo de maíz de secano y mediante simulaciones de escenarios socioeconómicos de CC (A2 y B2) descritos en el AR4 para el horizonte 2010-2039. Ellos Monterroso et al., (2011) encontraron que las áreas con mayor aptitud son las más vulnerables, estimando afectaciones de hasta 4.3 % de la superficie actual. Sin embargo, este tipo de conocimiento no se ha generado para el caso del estado de Aguascalientes, México.

Es así que los objetivos de la presente investigación fueron: 1) Evaluar los impactos probables del CC en la agricultura de secano de Aguascalientes, México, con base en el modelo HadGEM2-ES para el forzamiento radiativo 8.5 en un futuro cercano, 2015-2039; y 2) Determinar la magnitud de los impactos del CC en la aptitud productiva de la agricultura de secano con base en el análisis de variabilidad precipitación pluvial.

Materiales y métodos

Descripción de la unidad de estudio (UE)

El territorio de Aguascalientes se consideró como UE. Su superficie es de 562.1 kilohectáreas (kha). Aguascalientes se ubica entre los paralelos 21.61 y 22.45° de latitud norte y entre los meridianos -101.816 y -102.866° de longitud oeste. Dicho territorio colinda al norte, noreste y oeste con Zacatecas y al sureste y sur con Jalisco (Figura 1).

El 86 % de la UE presenta clima árido (BS_1kw) y semiárido $BS_1hw(w)$; en tanto que el 14 % restante es de clima templado subhúmedo con lluvias en verano [C(wO)]. Los promedios anuales de temperatura y precipitación son 17.4 °C y 526 mm, respectivamente; las alturas varían entre 1,540 y 3,050 msnm (INEGI, 2005).

La UE está integrada por 11 municipios (Figura 1), cuyos nombres y referencias oficiales (claves municipales) son: Aguascalientes (001), Asientos (002), Calvillo (003), Cosío (004), Jesús María (005), Pabellón de Arteaga (006), Rincón de Romos (007), San José de Gracia (008), Tepezalá (009), El Llano (010) y San Francisco de los Romo (011) (INEGI, 2005). Según datos oficiales

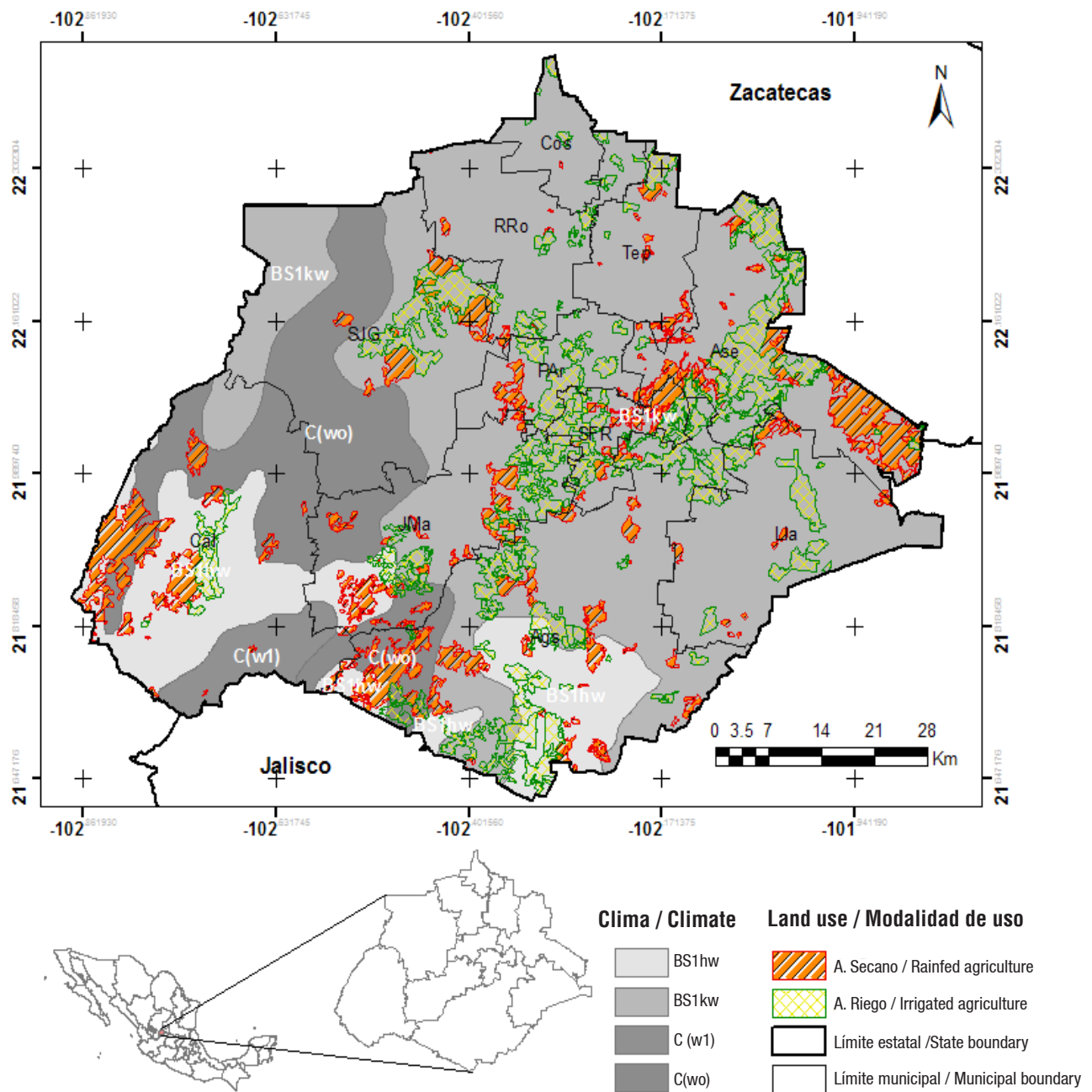


Figure 1. Location of SU, climate types and land-use classifications (INEGI, 2013).

Figura 1. Localización de la UE, clima y modalidad de uso de la tierra (INEGI, 2013).

Base climatology and climate change scenario used

The base climatology used was the one proposed by Hijmans, Parra, Jones, and Jarvis (2005), corresponding to the 1950-2000 period, which due to its consistency was used in both AR4 (IPCC, 2007) and AR5 IPCC, (2014). This base climatology was also used by Conde, Estrada, Martínez, Sánchez, and Gay (2011) in regional climate change studies in Mexico.

The HadGEM2-ES model (2015-2039) was used for radiative forcing 8.5 (RCP8.5), included in the Update

(SAGARPA-SIAP, 2014), en un decenio (2004-2013) se han cultivado 166.42 kha, lo cual representa el 29.6 % del territorio estatal. La agricultura de secano se practica en el 56 % de la superficie laborable. El cultivo de mayor importancia es el maíz en sus diferentes variedades: blanco, amarillo y forrajero (GOBAGS, 2011).

Climatología base y escenario de cambio climático empleado

La climatología base empleada fue la propuesta por Hijmans, Parra, Jones, y Jarvis (2005), correspondiente al periodo 1950-2000, la cual por su consistencia ha

of CC Scenarios for Mexico as part of the products of the Fifth National Communication developed by the working group headed by Cavazos et al. (2013). This model was previously described by Jones et al. (2011) and evaluated by Collins et al. (2011).

The HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR (Max-Plank Institute) and GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) models were reanalyzed from the observed anomalies and, when considering the topographic factor, were improved by Fernández-Eguiarte, Zavala-Hidalgo, and Romero-Centeno (2010), which changed the geographic scale from 55 km² to 926 m² for the region consisting of Mexico, the southern United States, the Caribbean and Central America. The reanalyzed models are available in txt and Geotiff formats. The model was downloaded in the Computer Science Unit for Environmental and Atmospheric Sciences (UNIATMOS, for its initials in Spanish) at the National Autonomous University of Mexico's Institute of Atmospheric Sciences (<http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/Docs/despliegues.html>).

Suitability analysis of rainfed agriculture

The suitability analysis of rainfed agriculture in the SU was carried out using the method proposed by SEDESOL-INE (1998). For this, we used the *PECRE* index, defined as the number of days during the year with water availability and favorable temperatures for the development of a crop. The *PECRE* is based on historical MAP and the near future 2015-2039 (NF₁₅₋₃₉), and is expressed as:

$$PECRE = (0.24089 \times MAP) - (0.0000387 \times MAP^2) - 33.1919 \quad (1)$$

For the evaluation of current and future RA, *PECRE* was used in determining the extension of maize (*EXPEM*):

$$EXPEM = 80.3840 - (0.4126 \times PECRE) \quad (2)$$

sido empleada tanto en el AR4 (IPCC, 2007), como en el AR5 (IPCC, 2014); también, esa climatología base fue empleada por Conde, Estrada, Martínez, Sánchez, y Gay (2011) en los estudios regionalizados de cambio climático en México.

El modelo HadGEM2-ES (2015-2039) se empleó para un forzamiento radiativo 8.5 (RCP8.5), incluido en la Actualización de Escenarios de CC para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional, desarrollado por el grupo de trabajo encabezado por Cavazos et al. (2013); ese modelo fue previamente descrito por Jones et al. (2011) y evaluado por Collins et al. (2011).

Los modelos HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR (Max-Plank Institute) y GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) se reanalizaron a partir de las anomalías observadas y, al considerar el factor topográfico, fueron mejorados por Fernández-Eguiarte, Zavala-Hidalgo, y Romero-Centeno, (2010) por escala geográfica al pasar de 55 km² a 926 m² para la Región México, Sur de los Estados Unidos de América, El Caribe y Centro América. Los modelos reanalizados están disponibles en formato txt y Geotiff. La descarga del modelo empleado se llevó a cabo en la Unidad de Informática para las Ciencias Ambientales y Atmosféricas (UNIATMOS) del Instituto de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (<http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/Docs/despliegues.html>).

Análisis de aptitud de la agricultura de secano

El análisis de aptitud de la agricultura de secano de la UE se llevó a cabo mediante el método propuesto por la SEDESOL-INE (1998). Para ello, se utilizó el índice *PECRE* definido como el número de días durante el año con disponibilidad de agua y temperaturas favorables para el desarrollo de un cultivo. El *PECRE* está basado

Table 1. Potential for rainfed maize as defined by MAT and MAP

Cuadro 1. Potencial para el maíz de secano definido mediante TMA y PMA.

MAP ^b ranges for yields/ Rangos de PMA ^b para rendimientos	MAT ^a ranges for yields /Rangos de TMA ^a para rendimientos		
	High 18 to 26 °C/ Alto 18 a 26 °C	Medium 12 to 18 °C and 26 to 30 °C/ Medio 12 a 18 °C y 26 a 30 °C	Low potential <12 °C / Potencial Bajo <12 °C
High: 500 mm/Alto: 500 mm	High potential/ Alto potencial	Medium potential/ Potencial medio	Medium-low potential/ Potencial medio bajo
Medium: 500-300 mm/ Medio: 500-300 mm	Medium potential / Potencial medio	Medium-low potential / Potencial medio bajo	Low or null potential/ Bajo o nulo potencial
Low yields:<300 mm/ Bajo rendimientos:<300 mm	Low or null potential/ Bajo o nulo potencial	Low or null potential / Bajo o nulo potencial	Low or null potential/ Bajo o nulo potencial

Source: ^aINIFAP, 2008; ^bLuna, 2008. / Fuente: ^aINIFAP, 2008; ^bLuna, 2008.

*EXP*EM is an index that was correlated with rainfed agriculture areas primarily devoted to maize cultivation, which were graded according to INIFAP (2008) and Luna (2008), who classify the productive potential of rainfed maize based on two bioclimatic variables: mean annual precipitation (MAP) and temperature (MAT), as indicated in Table 1.

Likewise, the methodologies by Reveles-Torres, Luna, Mejía, Hernández, and García (2014) were taken as a reference, particularly in relation to the potential defined for mean height above sea level.

Suitability of SU soils for agricultural use

The definition of soil suitability in the SU was made from the INEGI (2007) series II soil vector dataset, at 1:250,000 scale (F13-06, F13-09, F14-04 and F14-07). The series was created using the World Reference Base for Soil Resources (WRBS) (IUSS Working Group WRB, 2014). The soil units (Edaphology, Series II) identified as dominant at 0.30 m deep in the SU were grouped by map algebra in ArcGis 10.1® (ESRI-Redlands, CA, USA), as described in the IPCC Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry (2003), for six Soil Groups as described below (Table 2).

Territorial suitability of the SU based on topographic conditions

To determine suitability based on topographic conditions, the SU's relief data were obtained from the INEGI (2015) Mexican elevation continuum (CEM 3.0) in raster format with 30-m resolution. Three slope classes were determined as shown below (Table 3).

Spatial distribution of changes and detection of impacts

The technique of climate change impact analysis was based on the comparison of ranges adjusted to similar limits between the baseline or historical period (1950-2000) values and the scenario for NF_{15-39} , as described by López-Santos, A., Pinto Espinoza, J., Ramírez López, E.M., & Martínez Prado, M.A. (2013). The relative importance of the changes for three defined classes (large, medium and small) was obtained as follows:

$$IR_{ci} = \frac{S_{ci} * 100}{\sum_{i=1}^n ci} \quad (3)$$

Where R_{ci} is the relative value in percent of the i -th defined class; S_{ci} is the geospatially estimated area of the i -th class; n is the number of defined classes; $\sum_{i=1}^n ci$ is the sum of the area of each class (ci), from 1 to n .

en la PMA histórica y para el futuro cercano 2015-20139 (FC_{15-39}) y se expresa como:

$$PECRE = (0.24089 \times PMA) - (0.0000387 \times PMA^2) - 33.1919 \quad (1)$$

Para la evaluación de la AS actual y futura se utilizó el *PECRE* en la determinación de la extensión de maíz (*EXP*EM):

$$EXP\text{EM} = 80.3840 - (0.4126 \times PE\text{CRE}) \quad (2)$$

La *EXP*EM es un índice que se correlacionó con las superficies de agricultura de secano dedicadas primordialmente al cultivo de maíz, las cuales fueron calificadas con base en lo descrito por el INIFAP (2008) y Luna (2008), quienes clasifican el potencial productivo del maíz de secano con base en dos variables bioclimáticas: promedios anuales de lluvia (PMA) y temperatura (TMA), como se indica en el Cuadro 1.

Asimismo, lo descrito por Reveles-Torres, Luna, Mejía, Hernández, y García (2014) se tomó como referencia particularmente con relación al potencial definido para la altura media sobre el nivel del mar.

Aptitud de los suelos de la UE para uso agrícola

La definición de aptitud de los suelos de la UE se realizó a partir de los conjuntos de datos vectoriales edafológicos, Serie II del INEGI (2007) en escala 1:250,000 (F13-06, F13-09, F14-04 y F14-07). La serie fue creada mediante el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRBS, por sus siglas en inglés) (IUSS Working Group WRB, 2014). Las unidades de suelo identificadas (Edafología, Serie II) como dominantes a 0.30 m de profundidad en la UE fueron agrupadas, mediante álgebra de mapas en ArcGis 10.1® (ESRI-Redlands, CA, USA), conforme a lo descrito en el Manual de las Buenas Prácticas del IPCC (2003), para seis Grupos de Suelo como se describe a continuación (Cuadro 2).

Aptitud territorial de la UE por condiciones topográficas

Para determinar la aptitud por condiciones topográficas, los datos de relieve de la UE del Continuo de Elevación Mexicano (CEM 3.0) en formato raster con una resolución de 30 m se obtuvieron del INEGI (2015). Tres clases de pendiente se determinaron como se muestra a continuación (Cuadro 3).

Distribución espacial de cambios y detección de impactos

La técnica de análisis de impacto del cambio climático se basó en la comparación de rangos ajustados en

Table 2. Soil groups defined by the IPCC to determine soil organic carbon (SOC) reserves according to WRB and USDA classifications.**Cuadro 2. Grupos de suelo definidos por el IPCC para determinar reservas carbono orgánico en el suelo (COS) conforme a las clasificaciones de la WRB y USDA.**

Groups IPCC/ Grupos IPCC	Main characteristic/ Característica principal	INEGI-WRB ^a soil unit/ Unidad suelo INEGI-WRB ^a	USDA ^b soil unit/ Unidad, suelo USDA ^b
Group 1. HAC/ Grupo 1. AAA	Soils with high-activity clay minerals (HAC) are soils with a level of wear between mild and moderate, in which silicate clay minerals predominate 2:1 Los suelos con minerales de arcilla de alta actividad (AAA) son suelos con un nivel de desgaste entre leve y moderado, en los que predominan minerales de arcilla silicatada 2:1.	Leptosols, Vertisols, Kastanozems, Chernozems, Phaeozems, Luvisols, Alisols, Solonetz, Calcisols, Gypsisols, Umbrisols, Cambisols and Regosols./ Leptosoles, Vertisoles, Kastanozems, Chernozems, Phaeozems, Luvisoles, Alisoles, Solonetz, Calcisoles, Gypsisoles, Umbrisoles, Cambisoles y Regosoles	Mollisols, very alkaline Alfisols, Aridisols, Inceptisols/ Mollisoles, Alfisoles muy alcalinos, Aridisoles, Inceptisoles
Group 2. LAC/ Grupo 2. ABA	Soils with low-activity clay minerals (LAC) are very worn soils in which clay minerals 1:1 and amorphous iron predominate, as well as aluminum oxides/ Los suelos con minerales de arcilla de baja actividad (ABA) son suelos muy desgastados en los que predominan los minerales de arcilla 1:1 y el hierro amorfo, así como los óxidos de aluminio.	Acrisols, Lixisols, Nitisols, Ferralsols, Durisols/ Acrisoles, Lixisoles, Nitisoles, Ferralsoles, Durisoles	Ultisols, Oxisols, acid Alfisols/ Ultisoles, Oxisoles, Alfisoles ácidos
Group 3. Sandy soils/ Grupo 3. Arenosos	It includes all types of soils (irrespective of their taxonomic classification) containing more than 70 % sand and less than 8 % clay, based on typified texture analysis/ Incluye todo tipo de suelos (con independencia de su clasificación taxonómica) que contengan más de un 70 % de arena y menos de un 8 % de arcilla, con base en el análisis de textura tipificados	Arenosols / Arenosoles	Psamments / Psammentos
Group 4. Spodic soils/ Grupo 4. Espódicos	Very podzolized soils / Suelos muy podzolizados	Podzols / Podzoles	Spodosols / Espodosoles
Group 5. Volcanic soils/ Grupo 5. Volcánicos	Soils derived from volcanic ash with allophonic mineralogy / Suelos derivados de cenizas volcánicas con mineralogía alofánica.	Andosols / Andosoles	Andisols / Andisoles
Group 6. Wetland soils/ Grupo 6. Humedal	Soils with restricted drainage that causes periodic flooding and anaerobic conditions / Suelos con drenaje restringido que ocasiona crecidas periódicas y condiciones anaeróbicas	Gleysols / Gleysoles	Aquic suborders / Subórdenes ácuicos

Source: IPCC, 2003; ^aINEGI-WRB = Matching Soil Classification of INEGI, Series II and the WRB; ^bUSDA = United States Department of Agriculture.

Fuente: IPCC, 2003; ^aINEGI-WRB = Correspondencia Clasificación Edafológica del INEGI, Serie II y la WRB; ^bUSDA = Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América.

Table 3. Classification of slope and landforms by suitability analysis based on topographic conditions in the SU
Cuadro 3. Clasificación de la pendiente y topofomas para el análisis de aptitud por condiciones topográficas de la UE.

Slope class /Clase de pendiente	Range /Rango	Landform /Topoforma
A	0-8 %	Valley, plain and plateau with variation of 500 m / Valle, llanura y meseta con variación de 500 m
OB/B	8-30 %	Rolling hills and plateaus with variation of 500 to 750 m / Lomeríos y mesetas con variación de 500 a 750 m
C	>30 %	Sierra, slope and plateau with variation >750m / Sierra, bajada y meseta con variación >750m

Results and discussion

The evaluation of the potential impact of CC on RA in Aguascalientes for NF₁₅₋₃₉ is based on the analysis of the soil and topographic characteristics in which this activity is currently undertaken. Also, the evaluation is complemented by the impact analysis of CC on MAP for NF₁₅₋₃₉ considering the HadGEM2-ES, RCP8.5 model. The results are presented below.

Suitability of the SU based on soil conditions for RA

Of the 23 Soil Units covering Mexican territory, 10 of the most important are in the territory of Aguascalientes (Xix-Ake, 2010). According to the reference soil homologation (IPCC-INEGI-WRB-USDA), two of the six previously described Soil Groups were identified (Table 2).

Soils with high-activity clays (Group 1. HAC Soils) are the ones with the greatest presence (Phaeozems, PH; Leptosols, LP; Regosols, RG; Calcisols, CL, Luvisols, LV; and Cambisols, CM), covering 72 % of the territory, while the remaining 27.2 % (Durisols, DU; Kastanozems, KS; Planosols, PL; Fluvisols, FL) corresponds to the Soils Group with low-activity clays (Group 2. LAC Soils). Of the two soil groups, the PH, LP and DU stand out because they together cover an area equivalent to 73.7 %, although it is important to highlight that the first two from Group 1 of HAC Soils (PH and LP) total 54.3 % with 177.5 and 120.1 kha, respectively (Table 4).

In addition, RA is carried out on the ten identified Soil Units. In Group 1 it was detected that the PH, LP and RG have a wide distribution, both in the South Central (Aguascalientes, Jesús María, San Francisco de los Romo) and North (Rincón de Romos and Cosío), as well as in the easternmost (El Llano and Asientos) and westernmost (Calvillo and San José de Gracia) sections, covering a 57.2-kha area, which represents 63.8 % of the soil inventory; in Group 2, the DU and KS Units stand out the most because they cover a 15.7-kha area, accounting for 22.2 % of the total inventoried (Figure 2).

límites semejantes entre los valores del periodo base o histórico (1950-2000) y el escenario para el FC₁₅₋₃₉, de acuerdo a lo descrito por López-Santos, A., Pinto Espinoza, J., Ramírez López, E. M., & Martínez Prado, M. A. (2013). La importancia relativa de los cambios para tres clases definidas (grande, mediano y pequeño) se obtuvo de la siguiente forma:

$$RI_{ci} = \frac{S_{ci} * 100}{\sum_{i=1}^n ci} \quad (3)$$

Donde $IRci$ es el valor relativo en porcentaje de la i -ésima clase definida; Sci es la superficie geoespacialmente calculada de la i -ésima clase; n es el número de clases definidas; $\sum_{i=1}^n ci$ es la sumatoria de la superficie de cada clase (ci), desde la 1 a la n .

Resultados y discusión

La evaluación del impacto potencial del CC en la AS de Aguascalientes para un FC₁₅₋₃₉ se basa en el análisis de las características edáficas y topográficas en las cuales se practica esta actividad actualmente. También, la evaluación se complementa con el análisis del impacto del CC en la PMA para un FC₁₅₋₃₉ considerando el modelo HadGEM2-ES, RCP8.5. Los resultados se presentan a continuación.

Aptitud de la UE por condición edáfica para la AS

De las 23 Unidades de suelos que cubren el territorio mexicano, 10 de las más importantes están en el territorio de Aguascalientes (Xix-Ake, 2010). Conforme a la homologación edafológica de referencia (IPCC-INEGI-WRB-USDA), dos Grupos de Suelos de los seis descritos anteriormente fueron identificados (Cuadro 2).

Los suelos con arcillas de alta actividad (Grupo 1. Suelos AAA) son los de mayor presencia (Phaeozems, PH; Leptosoles, LP; Regosoles, RG; Calcisoles, CL; Luvisoles, LV; y Cambisoles, CM) cubriendo el 72 % del territorio, mientras que el 27.2 % restante (Durisoles,

Table 4. Soil inventory of Aguascalientes grouped according to the IPCC (2003).**Cuadro 4. Inventario edafológico de Aguascalientes agrupado de acuerdo al IPCC (2003).**

Group IPCC/ Gpo. IPCC	Soil unit/ Unidad de suelo	Inventory/ Inventario	RASUI/ ASUSI	RISSU/ IRUSE	----- kha -----	
					----- % -----	
<i>Group 1. HAC Soils/Grupo 1. Suelos AAA</i>						
	Phaeozem (PH)	177.5	35.1	19.8	8.8	32.4
	Leptosol (LP)	120.1	13.5	11.2	3.4	21.9
	Regosol (RG)	51.7	8.6	16.7	2.2	9.4
	Calcisol (CL)	13.1	1.7	13.4	0.4	2.4
	Luvisol (LV)	17.0	1.4	8.5	0.4	3.1
	Cambisol (CM)	19.1	0.8	4.1	0.2	3.5
	<i>G 1 Sum/Suma G 1</i>	<i>398.6</i>	<i>61.2</i>		<i>15.4</i>	<i>72.8</i>
<i>Group 2. LAC Soils/Grupo 2. Suelos ABA</i>						
	Durisol (DU)	106.2	7.3	6.8	4.9	19.4
	Kastanozem (KS)	15.6	8.4	54.2	5.7	2.8
	Planosol (PL)	23.5	5.1	21.9	3.5	4.3
	Fluvisol (FL)	3.9	1.0	26.9	0.7	0.7
	<i>G 2 Soil</i>	<i>149.2</i>	<i>21.9</i>		<i>14.7</i>	<i>27.2</i>
	<i>G1 + G2 Sum/Suma G1 + G2</i>	<i>547.7</i>	<i>83.1</i>		<i>30.0</i>	<i>15.2</i>

kha = Kilohectares; RASUI = Rainfed agriculture established in a specific Soil Unit of the inventory; RISSU = Relative importance with respect to a specific soil unit (RISSU = RASUI/Inventory); RISG = Relative importance with respect to a Soil Group: G1 or G2 (RISG = RASUI/ Sum, G1 or G2); RISSI = Relative importance with respect to the state soil inventory (RISSI = RASUI/G1 + G2 Sum).

kha = Kilohectáreas; ASUSI = Agricultura de secano establecida en una Unidad de suelos específico del inventario; IRUSE = Importancia relativa con respecto a una Unidad de suelo específica (IRUSE = ASUSI/Inventario); IRGS = Importancia relativa con respecto a un Grupo de Suelos: G1 o G2 (IRGS = ASUSI/Suma, G1 o G2); IRIEE = Importancia relativa con respecto al inventario estatal edafológico (IRIEE = ASUSI/Suma G1+G2).

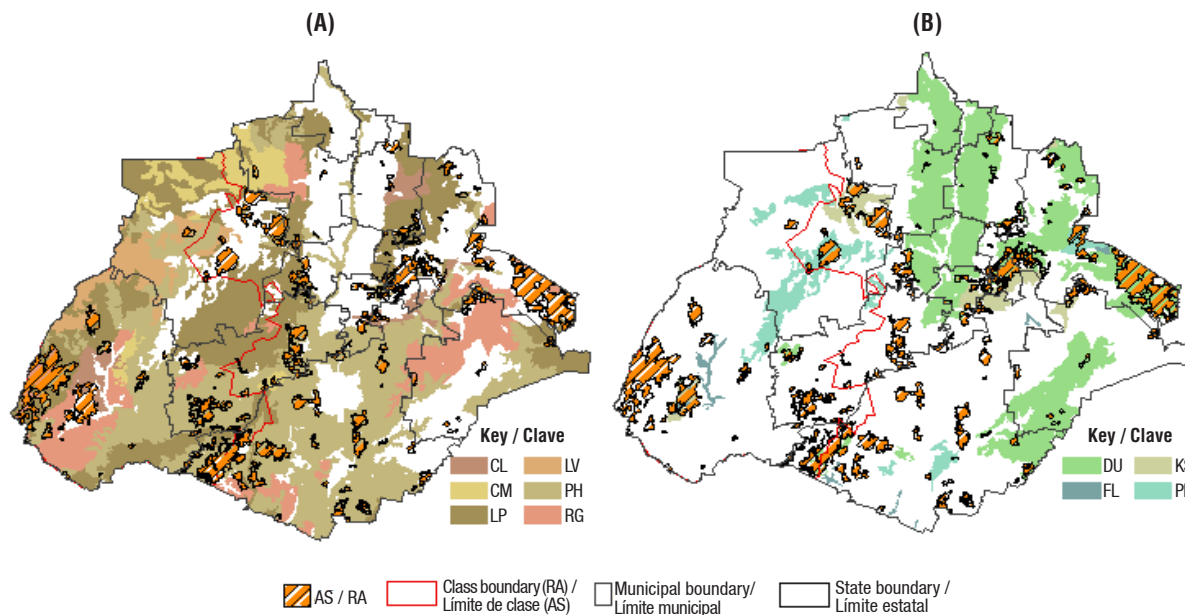


Figure 2. Spatial distribution of rainfed agriculture (RA) in Soil Units from Groups 1 (A) and 2 (B) identified in the state of Aguascalientes.

Figura 2. Distribución espacial de la agricultura de secano (AS) en las Unidades de Suelos de los Grupos 1 (A) y Grupo 2 (B) identificados en el estado de Aguascalientes.

In Group 2, of the four Soil Units the Durisol (DU) stands out due to its presence in the East Central region (Jesús María, San Francisco de los Romo, Pabellón de Arteaga, Asientos, Tepezalá, Rincón de Romos and Cosío) and in some areas of the Southeast (El Llano and Aguascalientes), at elevations ranging from 1,806 to 2,255 masl. Areas in the municipalities of Asientos, El Llano and San Francisco de los Romo are located in this Soil Unit; Asientos covers a 5.6-kha area, representing 78 % of this Soil Unit (DU) where RA is carried out (Figure 2).

Suitability of SU based on topographic condition for RA

RA in the SU was detected in areas where heights vary between 1,800 and 2,400 masl, and in slope ranges from 0 to 8 and 8 to 30 %. The first range is characterized by having valley, plain and plateau landforms with a variation of 500 m, while the second range is characterized by the presence of rolling hills and plateaus varying from 500 to 750 masl. In addition, it is important to note that RA is located on the periphery of Irrigation District 001 (Pabellón de Arteaga), the area of which does not exceed 12 kha, in valley areas with a gentle slope of less than 3 % in the

DU; Kastañozems, KS; Planosoles, PL; Fluvisoles, FL), corresponde al Grupo de Suelos con arcillas de poca actividad (Grupo 2. Suelos ABA); de ambos grupos de suelos, los PH, LP y DU destacan por cubrir en conjunto una superficie equivalente al 73.7 %; aunque es importante resaltar que los dos primeros del Grupo 1 de Suelos AAA (PH y LP) suman el 54.3 % con 177.5 y 120.1 kha, respectivamente (Cuadro 4).

Además, la AS se asienta en las diez Unidades de suelos identificadas. En el Grupo 1 se detectó que los PH, LP y RG tienen amplia distribución, tanto en el Centro sur (Aguascalientes, Jesús María, San Francisco de los Romo) y Norte (Rincón de Romos y Cosío) como en los extremos Oriente (El Llano y Asientos) y Occidente (Calvillo y San José de Gracia) ocupando una superficie de 57.2 kha, lo que representa el 63.8 % del inventario edafológico; en tanto que en el Grupo 2, las Unidades DU y KS son las más sobresalientes por cubrir una superficie de 15.7 kha que representa el 22.2 % del total inventariado (Figura 2).

En el Grupo 2, de las cuatro Unidades de suelo sobresale el Durisol (DU) por su localización en la parte Centro-Oriente (Jesús María, San Francisco de los Romo,

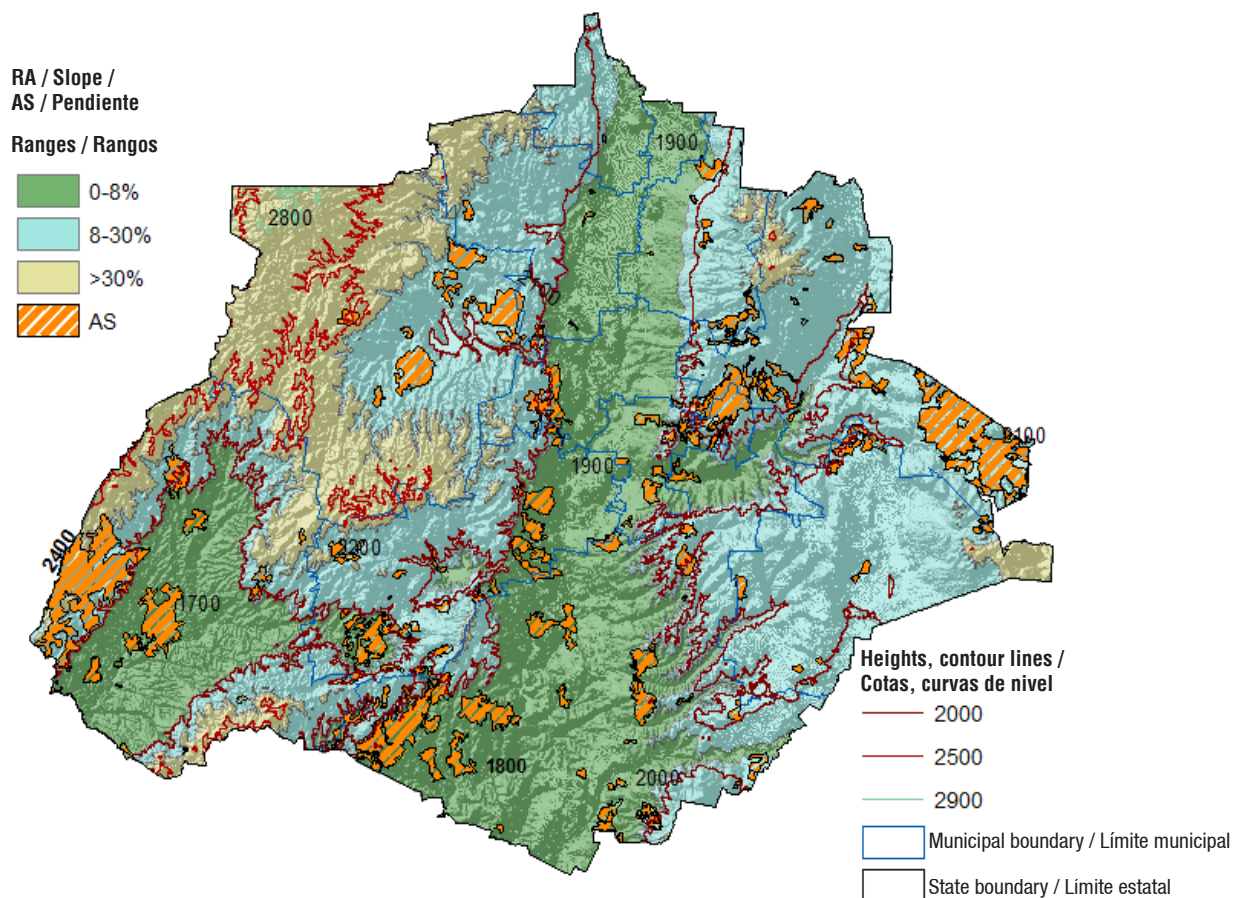


Figure 3. Relationship between the spatial distribution of RA and slope ranges.
Figura 3. Relación entre la distribución espacial de la AS y rangos de pendiente.

San Pedro River basin, the main surface hydrological system of Aguascalientes (Figure 3).

It should be noted that in the state's northern municipalities, Cosío and Rincón de Romos, average heights range between 1,900 and 2,100 masl and they have areas open to cultivation, as can be seen in the satellite image. In the consulted inventory (INEGI, 2013), the areas detected with recent activity were of very little importance and value in both municipalities; this is undoubtedly due to the fact that it is the area with the highest degree of aridity (Figure 3).

Current suitability and probable changes in the rainfall regime of the SU

MAP is the most important environmental element that determines the viability of rainfed agriculture. Thus, the study of its behavior in terms of magnitude and distribution has allowed establishing the characteristics and potentialities of territorial suitability (INIFAP, 2008; Sánchez *et al.*, 2014; SEDESOL-INE, 1998). The origin of RA is associated with the growth and development of Mesoamerican culture (Bellon *et al.*, 2011, Carrillo-Trueba, 2009, Reveles-Torres *et al.*, 2014); Therefore, the SU's suitability (current and future) analysis is specifically applied to maize grown under rainfed conditions.

Current suitability of the SU

Maize, given its wide genetic diversity (Reveles-Torres *et al.*, 2014), is planted from sea level up to 3,000 masl (Carrillo-Trueba, 2009); thus, efforts have been made to define and classify land on the basis of environmental suitability (Criterion 1) or productive potential (Criterion 2). For example, the SEDESOL-INE (1998) land zoning method defines a suitable fit when MAP is ≥ 720 mm and the PECRE and EXPEN indices are ≥ 121 and ≤ 30 , respectively, whereas Luna (2008) proposes three environmental classes ranging between 720 mm and less than 300 mm (Table 5).

Pabellón de Arteaga, Asientos, Tepezalá, Rincón de Romos y Cosío) y en porciones del Suroriente (El Llano y Aguascalientes), a alturas desde 1,806 hasta 2,255 msnm; en esta Unidad de Suelo se localizan áreas en los municipios de Asientos, El Llano y San Francisco de los Romo; el primero con una superficie de 5.6 kha, lo que representa el 78 % de esta Unidad de Suelo (DU) donde se practica la AS (Figura 2).

Aptitud de la UE por condición topográfica para la AS

La AS de la UE se detectó en áreas cuyas alturas varían entre 1,800 y 2,400 msnm, en los rangos de pendientes de 0 a 8 y 8 a 30 %; el primer rango es caracterizado por presentar topofomas de valles, llanuras y mesetas con variación de 500 m; en tanto que el segundo rango es caracterizado por la presencia de lomeríos y mesetas con variación de 500 a 750 msnm. Además, es importante destacar que la AS se localiza en la periferia del Distrito de Riego 001 (Pabellón de Arteaga), cuya superficie no supera las 12 kha, en áreas de valle con pendiente suave menor al 3 % en la cuenca del Río San Pedro, principal sistema hidrológico superficial de Aguascalientes (Figura 3).

Cabe hacer notar que en los municipios del norte del estado, Cosío y Rincón de Romos, las alturas promedio son de entre 1,900 y 2,100 msnm y presentan áreas abiertas al cultivo, según se pudo apreciar en la imagen de satélite. En el inventario consultado (INEGI, 2013), las superficies detectadas con actividad reciente fueron de muy poca importancia e inapreciable en ambos municipios; esto sin duda se debe a que es la zona donde se presenta el mayor grado de aridez (Figura 3).

Aptitud actual y cambios probables del régimen pluviométrico de la UE

La PMA es el aspecto ambiental más relevante que determina la viabilidad de la agricultura de secano, de tal

Table 5. Relationship between MAP and PECRE and EXPEN indices from which suitability and potential for rainfed agriculture are established.

Cuadro 5. Relación entre PMA e índices PECRE y EXPEN a partir de los cuales se establece aptitud y potencial para agricultura de secano.

Class/Clase	MAP/PMA	PECRE	EXPEN	Criterion 1/Criterio 1	Criterion 2/Criterio 2
	mm	---- Index ----	/----- Índice ----		
C1	≥ 720	≥ 121	≤ 30	Suitable/Apto	Very high/Muy alto
C2	500-720	78-121	30-48	Unsuitable/No apto	High/Alto
C3	300-500	36-78	48-66	Unsuitable/No apto	Medium/Medio
C4	< 300	> 35.5	> 65.6	Unsuitable/No apto	Low or null/Bajo o nulo

Criterion 1 = SEDESOL-INE, 1998; Criterion 2 = Luna, 2008.
Criterio 1 = SEDESOL-INE, 1998; Criterio 2 = Luna, 2008.

Table 6. Analysis of CC impact on MAP for the SU.**Cuadro 6. Análisis del impacto del CC en la PMA para la UE.**

Range/Rango	HMAP/PMAH	MAPNF ₅₋₃₉ /PMAFC ₁₅₋₃₉	----- Impact -----/----- Impacto -----	
			AC/CA	RI/IR
		----- mm -----		%
Lower/Inferior	358	435	77	22
Upper/Superior	617	733	116	19
Average/Promedio	487.5	584	96.5	20

HMAP = Historical Mean Annual Precipitation; MAPNFFC₁₅₋₃₉ = Mean annual precipitation for the Near Future 2015-2039; AC = Absolute Change; IR = Relative Importance.

PMAH = Precipitación Media Anual Histórica; PMAFC₁₅₋₃₉ = Precipitación Media Anual para el Escenario Futuro 2015-20139; Ca = Cambio Absoluto; IR = Importancia Relativa.

Future suitability, likely changes of SU

The information analyzed, both from the historical data and NF₁₅₋₃₉, indicates that MAP in the SU may increase by a magnitude of just over 96 mm, which would represent a rain depth 20 % higher than that that has been recorded as an annual average of the period defined as historical (1950-2000); that is, rainfall in the lower and upper ranges would increase from 358 to 435 and from 617 to 733 mm, representing relative changes of 22 and 19 %, respectively (Table 6).

The changes in the rainfall regime described above (Table 6), considering the suitability Classes defined on the basis of MAP and the *PECRE* and *EXPEM* indices (Table 5), show that the SU could experience a significant loss in NF₁₅₋₃₉ compared to the current environmental suitability estimated for Classes C2 and C3, with current areas covering 33 and 66 %, respectively, of the total SU area (Figure 4), the description of which is as follows.

Class 2, with MAP of 500-720 mm, occupies an area of 185 kha (33 %) in the western part of the SU; it comprises Calvillo and part of the municipalities of San José de Gracia and Jesús María. Class 3, with MAP of 300-500 mm, occupies an area of 376 kha (66 %), comprising all other municipalities in the SU (Figure 4A).

The result of the HadGEM2-ES model for radiative forcing 8.5 in a NF₁₅₋₃₉ indicates that the current extent of classes 2 and 3 could undergo changes of 85 and 42 % compared to the area they currently cover; that is, while class 2 goes from 187 to 347 kha, representing an 85 % expansion, class 3 goes from 375 to 216 kha, decreasing by 42 % (Figure 4B).

The alterations described above in one of the fundamental variables (rainwater availability) determine RA viability because they produce a critical total change area of 155.7 kha. This represents a little more than 27 % of the entire SU, which extends in

manera que el estudio de su comportamiento en cuanto a magnitud y distribución ha permitido establecer características y potencialidades de aptitud territorial (INIFAP, 2008; Luna, 2008; Sánchez *et al.*, 2014; SEDESOL-INE, 1998), cuyo origen está asociado al crecimiento y emancipación de la cultura Mesoamericana (Bellon *et al.*, 2011; Carrillo-Trueba, 2009; Reveles-Torres *et al.*, 2014); por ello, el análisis de la aptitud (actual y futura) de la UE se aplica de modo específico para el maíz cultivado en condiciones de secano.

Aptitud actual de la UE

El cultivo de maíz, dada su amplia diversidad genética (Reveles-Torres *et al.*, 2014), se siembra desde niveles del mar hasta los 3 mil metros de altura (Carrillo-Trueba, 2009), por ello se ha tratado de definir y clasificar con base en la aptitud ambiental (Criterio 1) o potencial productivo (Criterio 2); por ejemplo, en el método para el ordenamiento del territorio la SEDESOL-INE (1998) define una aptitud adecuada cuando el valor de la PMA ≥ 720 mm y los índices *PECRE* y *EXPEM* son ≥ 121 y ≤ 30 , respectivamente; en tanto que Luna (2008) propone tres clases de ambientes que varían entre los 720 mm y menos de 300 mm (Cuadro 5).

Aptitud futura, cambios probables de la UE

La información analizada, tanto de los datos históricos como del FC₁₅₋₃₉, indica que la PMA en la UE podrá incrementarse en una magnitud de poco más de 96 mm, lo cual representaría una lámina de lluvia 20 % mayor a la que se ha registrado como promedio anual del periodo definido como histórico (1950-2000); es decir, la lluvia en los rangos inferior y superior pasaría de 358 a 435 y de 617 a 733 mm, lo que representa cambios relativos de 22 y 19 %, respectivamente (Cuadro 6).

Los cambios en el régimen pluviométrico antes descrito (Cuadro 6), considerando las Clases de aptitud definidas a partir de la PMA y de los índices *PECRE* y *EXPEM* (Cuadro 5), muestran que la UE podría experimentar

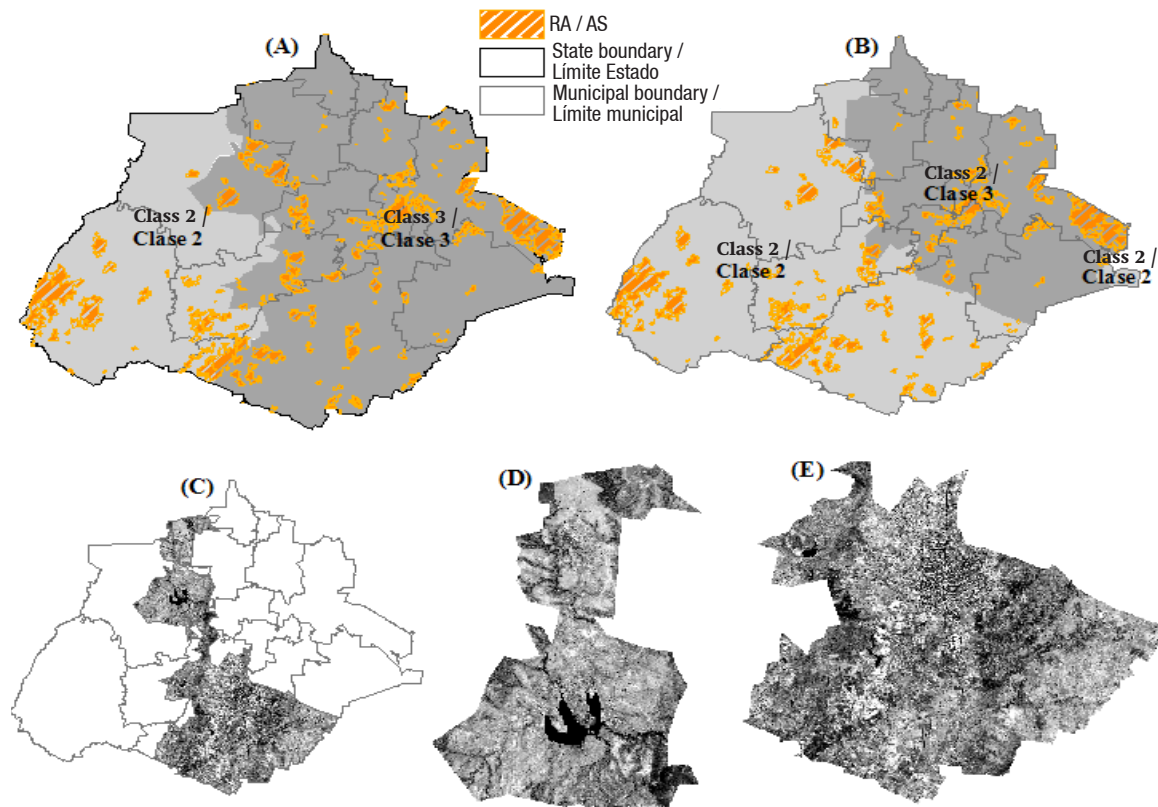


Figure 4. Spatial distribution of the two territorial suitability classes, current (A) and future (B), identification of the critical change area (C) and SPOT satellite image of the North (D) and South (E) portions of the SU.
Figura 4. Distribución espacial de las dos Clases de aptitud territorial actual (A), futura (B) y definición de la zona crítica de cambios (C) e imagen de satélite SPOT de la porción Norte (D) y Sur (E) de la UE.

a strip through the central SU region from North to South (Figure 4C), mainly affecting the municipalities of San José de Gracia, exactly where the Plutarco Elías Calles Dam is located (Figure 4D), part of Jesús María and all of Aguascalientes (Figure 4E).

Analysis of the future impact on maize RA in the SU

Importance of rainfed maize crop

Mexico's agricultural area covers 21,000 kha (10.5 % of the national territory), of which 14,500 kha (69 %) are devoted to RA, with maize cultivation occupying on average 6,957 kha (± 12 %) in a 32-year period (1980-2012) and accounting for 48 % of the total RA area (SAGARPA - SIAP, 2014), making it the country's main cyclical crop (Guzmán, De la Garza, González & Hernández, 2014; INEGI, 2012); 23 million people live in these RA areas (Sánchez *et al.*, 2014). In the same period, the SU had an average of 61 kha cultivated with the same crop (maize), which represented 0.4 % of the national total (SAGARPA-SIAP, 2014). Nationwide, the average yield is 300 kg·ha⁻¹ with maximums of up to 900 kg·ha⁻¹ (AgroDer, 2012).

una afectación significativa en FC_{15-39} en cuanto a la aptitud ambiental actual estimada para las Clases C2 y C3, con superficies actuales que cubren 33 y 66 %, respectivamente, de la superficie total de la UE (Figura 4), cuya descripción es la siguiente.

La Clase 2 con una PMA entre 500-720 mm ocupa una superficie de 185 kha (33 %) en la parte Oeste de la UE, comprende a Calvillo y parte de los municipios San José de Gracia y Jesús María; la Clase 3 con una PMA entre 300 y 500 mm ocupa una superficie de 376. kha (66 %), comprendiendo el resto de los municipios de la UE (Figura 4A).

El resultado del modelo HadGEM2-ES para el *forzamiento radiativo* 8.5 en un FC_{15-39} indica que la extensión actual de las clases 2 y 3 podría tener cambios del 85 y 42 % con respecto a la superficie que cubren actualmente; es decir, mientras que la clase 2 pasa de 187 a 347 kha, representando una expansión del 85 %; la clase 3 pasa de 375 a 216 kha, disminuyendo un 42 % (Figura 4B).

Las alteraciones antes descritas en una de las variables fundamentales (disponibilidad de agua de lluvia) determinan la viabilidad de la AS pues producen una

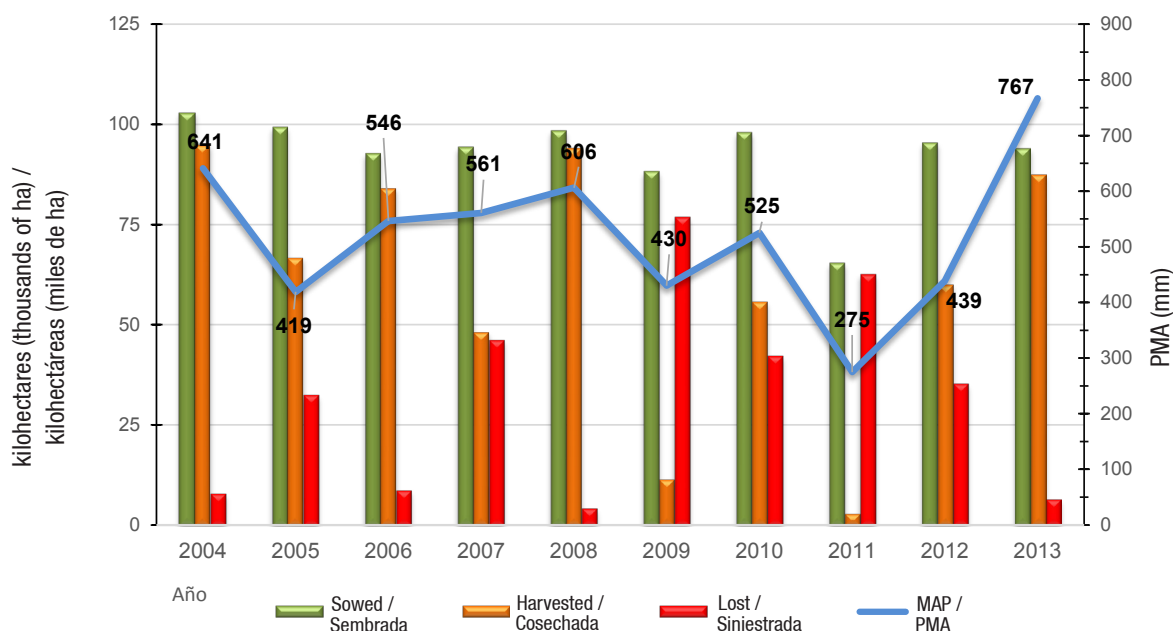


Figure 5. Annual rainfed area sowed, harvested and lost and its relationship to MAP from 2004 to 2013 in Aguascalientes.

Figura 5. Superficie de secano anual sembrada, cosechada y siniestrada y su relación con la PMA del 2004 al 2013 en Aguascalientes.

RA sensitivity in the SU

The recent history (2004-2013) of rainfed maize production in the SU indicates that there were significant impacts on the 93 kha established on average per year. One of every two years had a greater than 30 % loss, due to the recurrent MAP variability that was recorded by the National Network of Agroclimatic Stations operated by INIFAP (2014), with the greatest losses occurring in 2005, 2009 and 2011. In particular, 2011 had such little rainfall that 96 % of the total area established was affected (Figure 5).

The behavior of the described losses (Figure 5) is consistent with that reported by Luna and Gutiérrez (2000) for the Central North Region of Mexico, which included the state of Aguascalientes.

Maize is a C4 photosynthetic-type species with great genetic plasticity, so it is adapted to grow in tropical, subtropical and temperate regions (Bellon et al., 2011; Carrillo-Trueba, 2009; Reveles-Torres et al., 2014; Tinoco-Rueda, Gómez-Díaz, & Monterroso-Rivas, 2011). The minimum critical temperature and precipitation values established (INIFAP, 2008, Luna, 2008, Ortiz-Solorio, 1987) are 12 °C and 300 mm, respectively (Table 1). However, the best crop results are achieved when MAP ranges from 700 to 1,100 mm per year (INIFAP, 2005; Ruíz, 1998).

For example, Ruíz (1998) mentions that, in the Central Valleys of Oaxaca, the best maize yields (> 1,500 kg) occur in places where a good rainfall regime (≥ 700

zona crítica de cambios de 155.7 kha. Ello representa poco más del 27 % de la UE en su totalidad, misma que se extiende en una franja por el Centro de la UE de Norte a Sur (Figura 4C), afectando primordialmente a los municipios San José de Gracia, justamente donde se ubica la Presa Plutarco Elías Calles (Figura 4D), parte de Jesús María y Aguascalientes en su totalidad (Figura 4E).

Análisis del impacto futuro en la AS de maíz de la UE

Importancia del cultivo de maíz de secano

La superficie agrícola en México es de 21,000 kha (10.5 % del territorio nacional) de las cuales 14,500 kha (69 %) son dedicadas a la AS, donde el cultivo de maíz grano ocupó un promedio de 6,957 kha (± 12 %) en un lapso de 32 años (1980-2012) y representó el 48 % de dicha superficie (AS) (SAGARPA - SIAP, 2014), convirtiéndolo en el principal cultivo cíclico del país (Guzmán, De la Garza, González & Hernández, 2014; INEGI, 2012); en estas áreas de AS viven 23 millones de personas (Sánchez et al., 2014). En ese mismo periodo, la UE abarcó 61 kha promedio con el mismo cultivo (maíz), lo que representó el 0.4 % del total nacional (SAGARPA-SIAP, 2014); a nivel nacional, el rendimiento promedio es de 300 kg·ha⁻¹ con máximos de hasta 900 kg·ha⁻¹ (AgroDer, 2012).

Sensibilidad de la AS en la UE

La historia reciente (2004-2013) de producción de maíz de secano en la UE indica que hubo impactos importantes ya que de las 93 kha establecidas en promedio anual.

mm) is combined with soils with adequate depth and good moisture retention (defined by the textural type) and gentle slopes. Ruíz (1998) also mentions that the lowest yields were obtained in areas with shallow soils located on rolling hills and identified as Litosols, which belong to the WRBS Series II Leptosol Group described above (Table 2).

By moisture condition, for this same crop, four critical periods are identified: 1) sowing, 2) seed germination, 3) the first three weeks of development, and 4) the period between 15 days before and 30 days after flowering. In addition, from 30 days after flowering or when the ear leaf dries, the crop should not receive more water (INIFAP, 2005; Luna & Gutiérrez, 2000).

On the other hand, maize thrives best on silt loam, clay loam, and silty clay loam soils with good drainage, pH between 5.5 and 7.5 and salinity not higher than 7 dS·m⁻¹. In addition, the roots can have a length of 2 m in deep soils. Usually, 100 % of the absorbed water comes from a depth of 1 to 1.7 m (INIFAP, 2005, Luna & Gutiérrez, 2000).

Finally, it is important to mention that the Phaeozem (pH) are soils on which the largest rainfed area in the SU is established (Table 4), due to their natural fertility - even greater than that of the Chernozem and Kastanozem - although it is also reported that they have an absence of carbonates and great susceptibility to leaching and erosion (IUSS Working Group WRB, 2014); consequently, the pH requires appropriate regular management practices such as incorporation of crop residues, mechanical tillage according to the slope of the terrain and pH control, among others (Verhulst et al., 2011).

Conclusions

At present, the two Rainfed Classes defined, C2 and C3, for the SU have characteristics associated with a rainfall regime, according to the HadGEM2-ES model for radiative forcing 8.5, which could consist of increases in a magnitude equivalent to 20 % of MAP for the near future (2039). This increase in mean annual precipitation does not necessarily ensure that a positive impact on maize crop productivity will occur, since there are factors associated with soil and topographic conditions that determine its success and the conditions under which the best yields are obtained.

Likewise, other current land uses, as well as the distribution and type of tenure, both private and social, should be considered. This represents a conflict with a hypothetical change or expansion of the rainfed agriculture frontier.

End of English version

Uno de cada dos años presentó siniestralidad mayor al 30 %, debido a la variabilidad recurrente de la PMA que fue registrada por la Red Nacional de Estaciones Agroclimáticas del INIFAP (2014), destacando los años 2005, 2009 y 2011. Este último con mucho menos lluvia que generó una siniestralidad que afectó al 96 % de la superficie total establecida (Figura 5).

El comportamiento de la siniestralidad descrita (Figura 5) es consistente con lo reportado por Luna y Gutiérrez (2000) para la Región Centro Norte de México, quienes incluyeron en su estudio específicamente al estado de Aguascalientes.

El maíz es una especie de tipo fotosintético C4, de gran plasticidad genética, por lo que está adaptada a crecer en regiones tropicales, subtropicales y templadas (Bellon et al., 2011; Carrillo-Trueba, 2009; Reveles-Torres et al., 2014; Tinoco-Rueda, Gómez-Díaz, & Monterroso-Rivas, 2011). Los valores críticos mínimos de temperatura y precipitación establecidos (INIFAP, 2008; Luna, 2008; Ortiz-Solorio, 1987) son 12 °C y 300 mm, respectivamente (Cuadro 1). Sin embargo, los mejores resultados del cultivo se logran cuando la PMA está en un rango de 700 a 1,100 mm anuales (INIFAP, 2005; Ruíz, 1998).

Por ejemplo, Ruíz (1998) menciona que, en los Valles Centrales de Oaxaca, los mejores rendimientos de maíz (>1,500 kg) se dan en los lugares donde se combina un buen régimen de lluvia (≥700 mm), suelos de profundidad adecuada y buena retención de humedad (definida por el tipo textural) y pendientes suaves. Ruíz (1998) menciona también que los menores rendimientos se obtuvieron en áreas con suelos someros ubicados en condición de lomerío e identificados como Litosoles que pertenece al Grupo Leptosoles de la Serie II de la WRBS antes descrita (Cuadro 2).

Por condición de humedad, para este mismo cultivo, se identifican cuatro periodos críticos: 1) la siembra, 2) germinación de la semilla, 3) las primeras tres semanas de desarrollo, y 4) el periodo comprendido entre 15 días antes y de 30 días después de la floración. Además, desde los 30 días después de la floración o cuando la hoja de la mazorca se seca, el cultivo no debería recibir más agua (INIFAP, 2005; Luna & Gutiérrez, 2000).

Por otro lado, el maíz prospera mejor en suelos franco-limosos, franco-arcillosos y franco-arcillo-limosos con buen drenaje, pH entre 5.5 y 7.5 y salinidad no mayor a 7 dS·m⁻¹. Además, las raíces pueden tener una longitud de 2 m en suelos profundos; normalmente, el 100 % del agua absorbida proviene de una profundidad de 1 a 1.7 m (INIFAP, 2005; Luna & Gutiérrez, 2000).

Por último, es importante mencionar que los Phaeozem (pH) son suelos en los que está establecida

References / Referencias

- AgroDer. (2012). Producción de Maíz, México, 2010. Comparativo Estatal, modalidad de secano y riego. Recuperado Enero 1, 2015, de http://www.agroder.com/Documentos/Publicaciones/Produccion_de_Maiz_en_Mexico-AgroDer_2012.pdf.
- Bellon, M. R., Hodson, D., & Hellin, J. (2011). Assessing the vulnerability of traditional maize seed systems in Mexico to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(33), 13432–13437. doi:10.1073/pnas.1103373108.
- Carrillo-Trueba, C. (2009). El origen del maíz. *Naturaleza y cultura en Mesoamérica. Ciencias*, 92-93, 4–13.
- Cavazos, T., Salinas, J. A., Martínez, B., Colorado, G., Grau, P. de, González, R. P., & Bravo, M. E. (2013). *Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional. Informe Final del Proyecto*. Recuperado de <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html>.
- Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., & Woodward, S. (2011). Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, 4(4), 1051–1075. doi:10.5194/gmd-4-1051-2011.
- Conde, C., Estrada, F., Martínez, B., Sánchez, O., & Gay, C. (2011). Regional climate change scenarios for México. *Atmósfera*, 24(1), 125–140. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-62362011000100009&script=sci_arttext&tlng=pt.
- Conde, C., Liverman, D., Flores, M., Ferrer, R., Araújo, R., Betancourt, E., & Gay, C. (1997). Vulnerability of rainfed maize crops in Mexico to climate change. *Climate Research*, 9, 17–23. doi:10.3354/cr009017.
- Fernández-Eguiarte, A., Zavala-Hidalgo, J., & Romero-Centeno, R. (2010). Atlas climático digital de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Available online: <http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml>.
- GOBAGS (Gobierno de Aguascalientes). (2011). *Desarrollo Económico. Programa Sectorial 2010 - 2016*. Recuperado de http://www.aguascalientes.gob.mx/transparencia/informacion/PROGRAMAS/Sector_Desarrollo.pdf.
- Guzmán, E. S., De la Garza, M. T. C., González, J. P. F., & Hernández, J. M. (2014). Análisis de los costos de producción de maíz en la Región Bajío de Guanajuato. *Análisis Económico*, 29(70), 145–156. Recuperado de <http://www.analisiseconomico.com.mx/pdf/7008.pdf>.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978. doi:10.1002/joc.1276.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2005). *Anuario Estadístico Aguascalientes. Edición 2005*. Recuperado de <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/aee05/info/ags/mapas.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2007). Conjuntos de datos vectoriales edafológicos de la Serie II, escala 1:250,000.
- la mayor superficie de secano en la UE (Cuadro 4), debido a su fertilidad natural -incluso más que los Chernozem y Kastañozem- aunque también se reporta que presentan ausencia de carbonatos y gran susceptibilidad a la lixiviación y erosión (IUSS Working Group WRB, 2014); de manera que los pH requieren prácticas regulares de manejo adecuadas como son incorporación de residuos de cosecha, laboreo mecánico acorde a la pendiente del terreno y control del pH, entre otros (Verhulst et al., 2011).

Conclusiones

En la actualidad, las dos Clases de Secano definidas, C2 y C3, para la UE presentan características asociadas a un régimen pluviométrico, según el modelo HadGEM2-ES para un forzamiento radiativo 8.5, que podría constar de incrementos en una magnitud equivalente al 20 % de la PMA para el futuro cercano al 2039. Este incremento en la precipitación media anual, no necesariamente garantiza que se pueda manifestar un impacto positivo en la productividad del cultivo de maíz, ya que hay factores asociados a las condiciones edáficas y topográficas que determinan el éxito del mismo y las condiciones en las cuales se dan mejores rendimientos.

Asimismo, los otros usos actuales del suelo, así como la distribución y tipo de tenencia, tanto la privada como la social deberían ser considerados. Ello representa un conflicto ante un cambio o ampliación hipotéticos de la frontera de la agricultura de secano.

Fin de la versión en español

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2012). *El sector alimentario en México 2012. Serie estadísticas sectoriales. Número 26*. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/sociodemografico/SAM/2012/sam2012.pdf.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013). Conjunto de datos vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación del Estado de Aguascalientes en escala 1:50,000.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0). Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2005). *Requerimientos agroecológicos de cultivos*. Recuperado de <http://www.inifapcirpac.gob.mx/PotencialProductivo/Jalisco/AltosNorte/RegionAltosNorteReqAgroecologicos.pdf>.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2008). *Requerimientos agroecológicos del maíz (Zea mays L.) ciclo primavera-verano bajo*

- condiciones de secano en México. Recuperado de <http://www.agromapas.inifap.gob.mx/potencialproductivo/requerimientos/requerimientomaizpvtemporal.html>.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2014). Red de Estaciones Meteorológicas. Recuperado de <http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2003). *Intergovernmental Panel on Climate Change Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. (K. T. and F. W. Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraiishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara & IPCC, Eds.). Recuperado de the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC ©.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. (R. K. Pachauri & A. Reisinger, Eds.) *Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza. Recuperado de http://ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014 Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (R. K. Pachauri & L. A. Meyer, Eds.). Geneva, Switzerland: IPCC. Recuperado de http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf.
- IUSS Working Group WRB. (2014). *World reference base for soil resources 2014. World Soil Resources Reports*. Rome: FAO. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-i3794e.pdf>.
- Jean-François B., N. Berrahmouni, A. Grainger, D. Maniatis, D. Mollicone, R. Moore, Ch. Patriarca. (2017). The extent of forest in dryland biomes. *Science* 356(may): 635-638. doi: 10.1126/science.aam6527
- Jones, C. D., Hughes, J. K., Bellouin, N., Hardiman, S. C., Jones, G. S., Knight, J., & Zerroukat, M. (2011). The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geoscientific Model Development Discussions*, 4(1), 689–763. doi:10.5194/gmdd-4-689-2011.
- López-Santos, A., & Martínez-Santiago, S. (2015). Use of two indicators for the socio-environmental risk analysis of Northern Mexico under three climate change scenarios. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8(4), 331–345. doi:10.1007/s11869-014-0286-3.
- López-Santos, A., Pinto Espinoza, J., Ramírez López, E. M., & Martínez Prado, M. A. (2013). Modeling the potential impact of climate change in northern Mexico using two environmental indicators. *Atmósfera*, 26(4), 479–498.
- Luna, F. M. (2008). *El cultivo del maíz en Zacatecas* (Primera Ed.). Zacatecas, México: Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Luna, F. M., & Gutiérrez, S. J. R. (2000). Investigación fisiotécnica de maíz de temporal en la Región Alta del norte de México. *Revista Fitotécnica Mexicana*, 23(2), 195-209.
- Magaña, V. (2013). *Guía Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad ante Cambio Climático*. México, D.F. Recuperado de http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2012_estudio_cc_vyagef3.pdf.
- Monterroso, A. I., Conde, C., Rosales, G., Gómez, J. D., & Gay, C. (2011). Assessing current and potential rainfed maize suitability under climate change scenarios in México. *Atmósfera*, 24(1), 53–67.
- Ortiz-Solorio, C. A. (1987). *Elementos agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la República Mexicana* (Tercera Ed.). Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo.
- Reed, M. S., & Stringer, L. C. (2015). *Impulse Report. Climate change and desertification: Anticipating, assessing & adapting to future change in drylands*. Cancún, México. Recuperado de http://www.unccd.int/en/programmes/Science/Conferences/Documents/3sc_unccd_impulse-report.pdf.
- Revelles-Torres, L. R., Luna, M. F., Mejía, A. G., Hernández, J. M., & García, S. H. (2014). Razas actuales de maíz de secano en el estado de Zacatecas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(7), 1155 – 1168. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/2631/263131533002.pdf>.
- Ruiz, J. V. (1998). Zonificación agroecológica del maíz de temporal en los valles centrales de Oaxaca. I. Determinación del potencial productivo. *Terra Latinoamericana*, 16(3), 269–275. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57316310>.
- Sánchez, I. C., Esquivel, G. A., Velasquez, M. A. V., Inzunza, M. A. I., Muñoz, A. V., & Bueno, P. H. (2014). Climate based risk assessment for maize producing areas in rainfed agriculture in Mexico. *Journal of Water Resource and Protection*, 6(13), 1228–1237. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2014.613112>.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Sistema Agroalimentaria y Pesquera (SAGARPA-SIAP). (2014). El Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON). Periodo 1980-2013. *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación - Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*. Recuperado Enero 1, 2014, de <http://www.siap.gob.mx/optestadisticasiacon2012parcialsiacion-zip/>.
- Secretaría de Desarrollo Social-Instituto Nacional de Ecología (SEDESOL-INE). (1998). *Ordenamiento Ecológico del Territorio. Memoria Técnica y Metodológica*.
- Secretaría de Medio Ambiente y recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (SEMARNAT-INECC). (2012). *México Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Mexico, D.F. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Recuperado de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/685.pdf>.
- Tinoco-Rueda, J. A., Gómez-Díaz, J. D., & Monterroso-Rivas, A. I. (2011). Efectos del cambio climático en la distribución potencial del maíz en el estado de Jalisco, México. *Terra Latinoamericana*, 29(2), 161-168. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57321257006>.

United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). (2013). *Aspectos económicos de la desertificación, la degradación de las tierras y la seguía: Metodologías y análisis para la toma de decisiones. 2da conferencia científica de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación - CNULD*. United Nations Convention to Combat Desertification.

Verhulst, N., Nelissen, V., Jespers, N., Haven, H., Sayre, K. D., Raes, D., Govaerts, B. (2011). Soil water content, maize

yield and its stability as affected by tillage and crop residue management in rainfed semi-arid highlands. *Plant and Soil*, 344(1), 73-85.

Xix-Ake, G. R. (2010). *Estado Actual y Futuro de la Cartografía de Suelos en México*. Recuperado de http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/LatinAmerica_AtlasMeeting2010/08Sep9_Mexico.pdf