

Aplicación del modelo EPIC para evaluar el efecto del cambio climático y prácticas de manejo sobre el rendimiento de grano en maíz de temporal*

Applying the model EPIC to assess the impact of climate change and management practices on grain yield in rainfed maize

Hugo Ernesto Flores López^{1§}, José Ariel Ruíz Corral¹, Celia de la Mora Orozco¹, Patricia Zarazúa-Villaseñor², Álvaro Agustín Chávez Durán¹, Humberto Ramírez Vega² y Miguel Agustín Velásquez Valle³

¹Campo Experimental Centro Altos de Jalisco-INIFAP. Carretera Tepatitlán de Morelos-Lagos de Moreno, km 8, Tepatitlán de Morelos, Jalisco. C. P. 47600. Tel. (378) 7820355 ext. 142. (ruiz.ariel@inifap.gob.mx; delamora.celia@inifap.gob.mx; chavez.alvaro@inifap.gob.mx). ²Departamento Producción Agrícola. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara. Carretera Guadalajara-Nogales, km 15.5. (paty.zarazua@hotmail.com; hramirez@cualtos.udg.mx). ³CENID-RASPA-INIFAP. Margen derecha Canal Sacramento, km 6.5. C. P. 35140. Gómez Palacio, Durango. México. Tel. (871) 7191076. (velasquez.agustin@inifap.gob.mx). [§]Autor para correspondencia: flores.hugo@inifap.gob.mx.

Resumen

Se calibró y validó el modelo EPIC, para estudiar el efecto de prácticas de manejo y cambio climático sobre el rendimiento de grano de maíz de temporal para las regiones Altos-Sur y Ciénega de Jalisco. Se utilizó el escenario de cambio climático con el patrón de concentración representativa (PCR) de 2.6 W/m², propuesto por el IPCC (2013). La calibración y validación de EPIC utilizó la información experimental con sistemas de cultivo de maíz de temporal obtenidos en el Campo Experimental Centro Altos de Jalisco (CECEAJAL) de INIFAP de 1985 a 2013. La información de clima procedió de la estación climática del La Barca de la CNA y la estación agroclimática de CECEAJAL. Los datos de suelo se obtuvieron de los perfiles de INIFAP, aunque para cada año y localidad se utilizó los resultados del análisis de suelos de la capa Ap. Se utilizó el generador climático del EPIC con los valores de las estadísticas básicas requeridas de las estaciones antes mencionadas. Se simuló el rendimiento de grano cada cinco años hasta alcanzar un periodo de 100 años, con el manejo de nueve sistemas de cultivo, tres para la región altos sur y seis para la región Ciénega. De esta última se incluyeron dos sistemas de labranza del suelo convencional y cuatro la incorporación

Abstract

The model EPIC was calibrated and validated for studying the effect of management practices and climate change on the grain yield of rainfed maize for Altos-Sur and Ciénega regions of Jalisco. The climate change scenario was used with the pattern of representative concentration (PCR) of 2.6 W/m², proposed by the IPCC (2013). The calibration and validation of EPIC used the experimental data with maize rainfed cropping systems obtained in the Experimental Center Altos de Jalisco (CECEAJAL) of INIFAP from 1985 to 2013. The information came from the weather station La Barca of the CNA and the agroclimatic station CECEAJAL. The soil data were obtained from profiles INIFAP although for each year and location the results of soil analysis in the Ap layer was used. Climate generator EPIC was used with the values of the basic statistics required of the above stations. Grain yield was simulated every five years up to a period of 100 years, managing nine cropping systems, three for the Altos-Sur region and six for the region, Ciénega. Of the latter, two tillage systems and four conventional soil incorporation of crop residues were included, with a high content of organic matter. The results showed that, the grain yield management practice in the Altos-Sur of Jalisco with

* Recibido: septiembre de 2014
Aceptado: enero de 2015

de residuos de cosecha, con un alto contenido de materia orgánica. Los resultados mostraron que el rendimiento de grano con la práctica de manejo en la región Altos Sur de Jalisco de baja densidad de siembra colapsa después de 2075, mientras que el maíz con mayor densidad de siembra el rendimiento comienza a decaer en tiempo posterior. Para la región Ciénega el maíz con incorporación de residuos de cosecha tiene un rendimiento más estable, pero después de 2075 tiende a decaer el rendimiento.

Palabras clave: cambio climático, maíz, prácticas de manejo.

Introducción

El maíz de temporal es el cultivo más importante de México con una superficie de siembra mayor de 56% de la superficie agrícola y rendimiento promedio 2.26 t ha⁻¹. Jalisco resulta el estado con mayor superficie sembrada con 565 486 ha y un rendimiento promedio de 5.37 t ha⁻¹ (SIAP, 2012); en este estado se destaca la región Ciénega con una superficie de siembra cercana a 25% y el rendimiento de grano del orden de 7.33 t ha⁻¹. Otra región importante es los Altos de Jalisco, particularmente por la relación tan estrecha que tiene el maíz con la producción ganadera, en particular la lechería familiar (Flores *et al.*, 2007). La productividad que tiene el maíz de temporal en la región Ciénega de Jalisco se caracteriza por ser un sistema de monocultivo, con elevado uso de insumos, particularmente de fertilizantes, semilla mejorada e plaguicidas para el control de plagas y malezas, con dos variantes importantes en el manejo de residuos, uno es la extracción de estos en alrededor de 90% y otra es la incorporación de 100% de residuos (Flores *et al.*, 2011); en cambio los Altos de Jalisco tiene además alta disponibilidad de estiércoles, insumo típico de maíz en esta región (Flores *et al.*, 2009).

El rendimiento de maíz en Jalisco durante los últimos 10 años ha presentado un incremento sostenido del orden de 285 kg/ha/año (Flores *et al.*, 2011), pero la baja eficiencia de las prácticas de manejo al aplicar los insumos en el maíz, hacen que sea un cultivo de alto costo económico e importante fuente de contaminación difusa que provocan deterioro del suelo y del agua superficial (Flores-López *et al.*, 2012).

En este contexto, la agricultura es una actividad constituida por cuatro componentes a escala de sitio: el clima, el suelo, el cultivo y el manejo tecnológico del agricultor sobre estos tres

low planting density region collapses after 2075, while in the high density the yield begins to decline at a later time. For the region Ciénega the maize crop residue incorporation has a more stable yield, but after 2075 tends to fade as well.

Keywords: climate change, maize, management practices.

Introduction

Rainfed maize is the most important crop in Mexico with an area of increased plantings of 56% of the agricultural area, and average 2.26 t ha⁻¹. Jalisco is the State with the largest area planted 565,486 ha and an average yield of 5.37 t ha⁻¹ (SIAP, 2012); in this State the region Ciénega stands with an area of close to 25% seed and grain yield by 7.33 t ha⁻¹. Another important area is the Altos de Jalisco, particularly the close relationship that has maize to livestock production, particularly family dairy (Flores *et al.*, 2007). Productivity in rainfed maize in the region Ciénega, Jalisco, characterized by a system of monocropping with high use of inputs, particularly fertilizer, improved seeds and pesticides to control pests and weeds, with two variants important in the management of waste, one is the extraction of these at about 90% and another is the inclusion of 100% of waste (Flores *et al.*, 2011); instead the Altos de Jalisco also has high availability of manure, typical input maize in this region (Flores *et al.*, 2009).

The yield of maize in Jalisco during the last 10 years has shown a sustained increase in the order of 285 kg/ha/year (Flores *et al.*, 2011), but the low efficiency of management practices by applying inputs in maize make it a high economic cost cult and important source of diffuse pollution caused deterioration of soil and surface water (Flores-López *et al.*, 2012).

In this context, agriculture is an activity consisting of four site-scale components: climate, soil, and crop and farmer management technology on these three components. Of particular importance is the dependence of agriculture on climate, because of its high sensitivity to global climate change and climate variability, because is essential to understand the interactions between climate change and agricultural production for the stable development of society (Hui *et al.*, 2013). However, this same activity with industry and urbanization, emit greenhouse gases contributing significantly to global warming and climate change, global temperature increase of 0.74 °C from 1906-2005 (IPCC, 2007).

componentes. Es de particular importancia la dependencia que tiene la agricultura del clima, por su alta sensibilidad al cambio climático global y variabilidad climática, razón que hace esencial entender las interacciones entre el cambio climático y la producción agrícola para el desarrollo estable de la sociedad (Hui *et al.*, 2013). Sin embargo, esta misma actividad junto con la industria y urbanización, emiten gases con efecto invernadero contribuyendo de manera significativa al calentamiento global y cambio climático, con incremento de la temperatura mundial de 0.74 °C de 1906 hasta 2005 (IPCC, 2007).

Esta es la razón que un tema de investigación recurrente sea el efecto del cambio climático orientado a entender el efecto de las prácticas de manejo de los cultivos sobre el rendimiento de grano a largo plazo y su efecto en la economía (Chavas *et al.*, 2009), en los procesos relacionados con la dinámica de la materia orgánica del suelo (Aurbacher *et al.*, 2013), en la dinámica del agua del suelo (Huszar *et al.*, 1999), la reducción del ciclo de los cultivos (Gohari *et al.*, 2013), entre otros.

De acuerdo con el IPCC (2013), las emisiones de CO₂ por actividades antropogénicas se consideran la principal causa del cambio climático, tal que en el año 2011 la emisiones de CO₂ fueron del orden 390 ppm con un incremento promedio anual de los últimos 15 años del orden de 1.35 ppm; de acuerdo con los patrones de concentración representativa (PCR) que actúan sobre las fuerzas radiativas (FR), se presentan cuatro escenarios posibles de cambios futuros: PCR con FR de 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 W/m². De acuerdo con esto escenarios, los modelos de simulación muestran que temperatura de la superficie en promedio global podrá ser del orden de 0.3 a 1.7 °C para el PCR2.6, de 1.1 a 2.6 °C para el PCR4.5, de 1.4 a 3.5 °C para el PCR6.0 y de 2.6 a 4.8 °C para el PCR8.5. Con respecto al ciclo del agua, el IPCC (2013) reporta un contraste importante de la lluvia entre regiones secas y húmedas, pero también entre las estaciones secas y húmedas, con excepción de algunas regiones, pero con incremento de eventos extremos de lluvia.

El cambio climático tiene una influencia ambivalente en la agricultura, de manera que mientras aumenta las temperaturas medias y contenido de CO₂ atmosférico, el resultado supone un aumento de los rendimientos (Farina *et al.*, 2011), pero también menor cantidad de precipitación durante el verano y la creciente variabilidad de la precipitación y patrones de lluvias, así como mayor evapotranspiración y cantidades de vapor de agua en la atmósfera con serias implicaciones en el ciclo hidrológico global (Gohari *et al.*, 2013; Aurbacher *et al.*, 2013).

This is the reason that a recurring theme is the effect of research aimed at understanding the effect of management practices on crop grain yield and its long term effect on the economy (Chavas *et al.*, 2009) in the processes related to the dynamics of soil organic matter (Aurbacher *et al.*, 2013), the soil water dynamics (Huszar *et al.*, 1999), reduced crop cycle (Gohari *et al.*, 2013), among others.

According to the IPCC (2013), the emissions of CO₂ by human activities are considered the main cause of climate change, in 2011 the CO₂ emissions were around 390 ppm with an average annual increase of the last 15 years in the order of 1.35 ppm; according to the patterns of representative concentration (PCR) acting on the radiative forces (FR), four possible scenarios for future changes occur: PCR with FR of 2.6, 4.5, 6 and 8.5 W/m². According to this scenario, the simulation models show that, the surface temperature on overall average will be about 0.3 to 1.7 °C for the PCR2.6, from 1.1 to 2.6 °C for the PCR4.5, 1.4 to 3.5 °C for PCR6.0 and 2.6 to 4.8 °C for PCR8.5. With regard to the water cycle, the IPCC (2013) reports a significant contrast between dry and wet rainfall regions, but also between the dry and wet seasons, except for some regions, but with increase in extreme rainfall events.

Climate change has an ambivalent impact on agriculture, so that while increasing mean temperatures and atmospheric CO₂ content, the result is an increase in yields (Farina *et al.*, 2011), but also smaller amount of precipitation during summer and increased precipitation variability and patterns of rainfall and evapotranspiration and larger amounts of vapour in the atmosphere with serious implications for the global hydrological cycle (Gohari *et al.*, 2013; Aurbacher *et al.*, 2013).

In Mexico, there is a tendency in some agricultural areas to increase the temperature perceptibly from 1990 to date is shown (Ruiz *et al.*, 2011; Zarazúa *et al.*, 2011) and a slight decrease in annual precipitation in producing areas (Ruiz *et al.*, 2011). The consequence of these changes is expected to be reflected in increases in potential evapotranspiration, with a water balance less favourable, reducing the growing season in tropical and subtropical areas, but with equal or higher accumulation of heat units and growing season equal to or larger in the high valley (Hatfield *et al.*, 2011), with a reduction in the ability of the land to produce maize, lower profitability, but in general, the reduction of the production potential of the crops will be associated with greater dynamism in the presence of pests, diseases and weeds (FAO, 2007).

En México se muestra una tendencia de algunas áreas agrícolas de México de incrementar la temperatura de manera perceptible desde 1990 a la fecha (Ruiz *et al.*, 2011; Zarazúa *et al.*, 2011) y una ligera disminución de la precipitación anual en las zonas de cultivo (Ruiz *et al.*, 2011). La consecuencia de estos cambios se espera se refleje en aumentos de la evapotranspiración potencial, con un balance hídrico menos favorable, una reducción de la estación de crecimiento en zonas tropicales y subtropicales, pero con igual o mayor acumulación de unidades calor, y estación de crecimiento igual o más amplia en la zona de los valles altos (Hatfield *et al.*, 2011), con reducción en la aptitud de las tierras para producir maíz, menor rentabilidad, pero en general, la reducción del potencial productivo de los cultivos estará asociado con mayor dinamismo en la presencia de plagas, enfermedades y maleza (FAO, 2007).

En este contexto, los sistemas agrícolas tienen una respuesta particular cuando se utilizan prácticas de manejo en el sitio, por lo que es necesario identificar su impacto a largo plazo y como orientarlas a la mitigación/adaptación al cambio climático y la contribución que tienen al mantenimiento de la productividad agrícola (Lal *et al.*, 2011). Con esta consideración del manejo del sistema agrícola, es probable que la respuesta de cultivos como maíz en Jalisco, pueda amortiguarse, lo que puede conducir a la mitigación-adaptación de los grandes problemas ecológicos, económicos y sociales que se están previendo para este cultivo.

La complejidad inherente a los sistemas agrícolas dificulta tomar decisiones acertadas en el manejo del cultivo, problema acentuado en los últimos años con el cambio climático. Una opción de solución a este problema es el uso de modelos de simulación basados en procesos para predecir el resultado del cultivo, los cuales proporcionan explicaciones del comportamiento dinámico del sistema ante los cambios en el entorno, el genotipo y el manejo, que justifica su aplicación en la proyección de los impactos del cambio climático y adaptación en la producción agrícolas. Uno de estos modelos de simulación (MS) es el EPIC, que originalmente se construyó para cuantificar los efectos de la erosión en la productividad del suelo (Williams, 1990).

En la actualidad se ha convertido en una herramienta para describir con elevado grado de certidumbre el rendimiento de cultivos con rotaciones complejas y operaciones de labranza en más de 100 cultivos, con rutinas para evaluar el

In this context, the agricultural systems have a particular response with the management practices used on the site, so we need to identify their long-term impact and how to direct them to the mitigation/adaptation to climate change and the contribution they have to maintain for agricultural productivity (Lal *et al.*, 2011). With this consideration the management of the agricultural system it is likely that the response of crops like maize in Jalisco, can be damped, which can lead to mitigation-adaptation of the great ecological, economic and social problems that are expected for this crop.

The inherent complexity of agricultural systems makes it difficult to make decisions on crop management, a problem exacerbated in recent years with climate change. One option for solving this problem is the use of simulation models to predict process-based cultivation results, which provide explanations of the dynamic behaviour of the system to changes in the environment, genotype and management, justifying its application in projecting the impacts of climate change and adaptation in agricultural production. One of these simulation models (MS) is the EPIC which originally was constructed to quantify the effects of erosion on soil productivity (Williams, 1990).

Today it has become a tool to describe high degree of certainty the yield of crops with complex rotations and tillage operations in more than 100 crops, with routines to evaluate the management of the effects of fertilization, the increase in CO₂ and temperature in the atmosphere, with its implications on the use of rainwater or irrigation, plant growth, nutrient cycling N and P fertilizers or chemical form, the dynamics of crop residues, and density changes soil tillage, erosion and leaching (Kiniry *et al.*, 1995; Hilger *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2006; Gaiser *et al.*, 2010), which makes it a suitable model to evaluate the consequences of increased CO₂ and temperature on the global climate of the earth, as predicted by the IPCC (2013).

Adaptation to specific locations, requires only computer and information acquisition a few cycles of crop growth to calibrate the model in the appropriate environment (Hodges, 1987), where the main obstacle to its use is the availability of information for calibration and validation (Angulo *et al.*, 2013).

The MS operating parameters basically develop individual simulation processes studied experimentally in field or laboratory tests. The process of assessment and collection

manejo de los efectos de fertilización, el incremento de CO₂ y temperatura en la atmósfera, con sus implicaciones en el uso de agua de lluvia o riego, el crecimiento de plantas, el ciclo de nutrientes N y P en forma química o con fertilizantes, la dinámica de residuos de cosecha, y los cambios de densidad del suelo, labranza, erosión y lixiviación (Kiniry *et al.*, 1995; Hilger *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2006; Gaiser *et al.*, 2010), que lo hace un modelo adecuado para evaluar las consecuencias del incremento de CO₂ y temperatura en el clima global de la tierra, como lo predice el IPCC (2013).

La adaptación a localidades específicas, requiere tan sólo de computadora y la adquisición de información de unos cuantos ciclos de crecimiento del cultivo para calibrar el modelo en el ambiente correspondiente (Hodges, 1987), donde el principal obstáculo para su utilización es la disponibilidad de información para su calibración y validación (Angulo *et al.*, 2013).

Los MS funcionan básicamente con parámetros que desarrollan procesos individuales de simulación estudiados experimentalmente en campo o con pruebas de laboratorio. El proceso de estimación y recolección de esos parámetros es conocido como parametrización; estos parámetros intervienen en múltiples procesos los cuales no pueden ser estudiados independientemente en experimentos aislados; a este proceso se le conoce como calibración del modelo (de Witt, 1978). Dentro de los parámetros que necesita el modelo para su funcionamiento existen algunos que tienen mayor efecto en su comportamiento o desempeño; la identificación de estos parámetros se le conoce como análisis de sensibilidad (de Witt, 1978; Ferrer *et al.*, 2000). En el maíz, los parámetros que han resultado más sensibles del modelo EPIC, son el índice de área foliar, el índice de cosecha, el ciclo del cultivo expresados por los grados día de desarrollo acumulados de siembra a madurez (Kiniry *et al.*, 1995).

Una vez que se ha realizado la calibración y el análisis de sensibilidad del MS, es preciso recurrir al proceso de validación, para identificar y corregir distintos aspectos del modelo que puedan distorsionar y apartar de la realidad las predicciones efectuadas, logrando la simulación adecuada del crecimiento, el desarrollo o el rendimiento, definiendo un ajuste a lo que acontece en el campo. El objetivo del presente estudio fue calibrar y validar el modelo EPIC en maíz de temporal, para evaluar el efecto del cambio climático y prácticas de manejo sobre el rendimiento de grano de este cultivo en la región Ciénega y Altos Sur de Jalisco.

of such parameters is known as parameterization; these parameters are involved in multiple processes which cannot be studied independently in separate experiments; this process is known as model calibration (Witt, 1978). Within the parameters required to operate the model there are some that have more effect on their behaviour or yield; identification of these parameters is known as sensitivity analysis (Witt, 1978; Ferrer *et al.*, 2000). In maize, the parameters that have been most sensitive model EPIC are the leaf area index, harvest index, crop cycle expressed by accumulated degree days from planting to maturity development (Kiniry *et al.*, 1995).

Once the calibration and sensitivity analysis of MS have been done, it is necessary to resort to the validation process to identify and correct various aspects of the model that can distort and distract from the fact the predictions made, achieving adequate growth simulation, development or yield, defining an adjustment to what happens on the field. The aim of this study was to calibrate and validate the model EPIC on rainfed maize to assess the effect of climate change and management practices on grain yield of rice in the region, Ciénega and Altos Sur of Jalisco.

Materials and methods

Model calibration EPIC. Model calibration in rainfed maize used the experimental data of maize described in Table 1.

Model validation EPIC. Model validation used the experimental data of maize described in Table 2.

Climate and soil. Climate information from weather stations listed in Table 3 were used. The simulation of long-term maize yield climate model generator EPIC was used with the parameters obtained from the stations shown in the Table 3. Regarding the soil, the database with information from laboratory analyses of soil profiles in the study area generated by INEGI was used. For experimental site used the analysis of the surface horizon (Ap) was used.

Assessing the effect of management practices for rainfed maize screened every five years, with the following considerations:

Materiales y métodos

Calibración del modelo EPIC. La calibración del modelo en el maíz de temporal utilizó la información experimental del cultivo de maíz descrita en el Cuadro 1.

Validación del modelo EPIC. La validación del modelo utilizó la información experimental del cultivo de maíz descrita en el Cuadro 2.

Clima y suelo. Se utilizó la información climática de las estaciones meteorológicas indicadas en el Cuadro 3. La simulación del rendimiento de maíz largo plazo, se utilizó el generador climático del modelo EPIC, con los parámetros obtenidos de las estaciones mostradas en el Cuadro 3. Con respecto al suelo, se utilizó la base de datos con información de análisis de laboratorio de los perfiles de suelo del área de estudio generados por INEGI. Para sitio experimental se utilizó el análisis de usó el del horizonte superficial (Ap).

1) The change in the average temperature 0.01 °C/year, according to the pattern of concentration representative PCR2.6, conservative scenario in which we could expect a change in temperature from 07 to 1.06 °C (IPCC, 2013).

2) The rate of change in the concentration of CO₂ was 1.4 ppm CO₂/year, according to the pattern of concentration representative PCR2.6, also expecting a concentration of 480 ppm of CO₂ at the end of 2100, with a range of 450-520 ppm CO₂ (IPCC, 2013).

3) We did not included change on the amount of precipitation, only including this element on the water balance (IPCC, 2013).

Yield evaluation model EPIC.

Statistical evaluation of model yield EPIC, used the following tests:

Cuadro 1. Relación de manejo de productores de maíz, utilizada en la calibración del modelo EPIC.
Table 1. Relationship management producers of maize, used in model calibration EPIC.

Genotipo	Año	Fecha de siembra	GDD 10 S-MF	Densidad de población (miles plantas ha ⁻¹)	Índice de área foliar	Índice de cosecha meta
HV313	1985	12 de junio	1089	40	3.4	0.408
HV313	1985	12 de junio	1089	80	7.3	0.366
H303	1985	12 de junio	1100	80	7.1	0.488
VS223	1985	12 de junio	982	60	4.6	0.453
HV313	1986	12 de junio	1117	50	5.2	0.249
H311	1986	12 de junio	1136	50	5.1	0.354
HV313	1987	9 de junio	1170	50	5.2	0.363
H303	1987	9 de junio	1214	50	5	0.423
H311	1987	9 de junio	1195	50	5.1	0.385
A747	1987	9 de junio	1159	50	5	0.386
HV313	2002	6 de junio	1429	70	6.4	0.391
Novasem	2002	4 de junio	1140	64	6.3	0.39
Tigre-Asgrow	2007	13 de junio	1678	73	8.3	0.259
CRM50	2007	13 de junio	1492	63	6.2	0.392
Tigre-Asgrow	2007	13 de junio	1678	48	3.9	0.54
H375	2010	7 de junio	1657	111	8.8	0.442
Cebú- Asgrow	2010	3 de junio	1700	70	7.7	0.54
Tigre-Asgrow	2012	16 de junio	1196	81	7.6	0.295
Caimán- Asgrow	2013	7 de junio	1390	71	7	0.498

Cuadro 2. Relación de manejo de productores de maíz utilizada en la validación del modelo EPIC.
Table 2. Relationship management maize producers used in the model validation EPIC.

Genotipo	Año	Fecha de siembra	GDD 10 S-MF	Densidad de población (miles plantas ha ⁻¹)	Índice de área foliar	Índice de cosecha meta
HV313	1985	12 de junio	1089	60	5.3	0.392
H303	1985	12 de junio	1100	40	3.5	0.374
VS223	1985	12 de junio	982	40	3.2	0.488
VS223	1985	12 de junio	982	80	5	0.437
H303	1986	12 de junio	1149	50	5	0.452
A747	1986	12 de junio	1102	50	5	0.358
HV313	1987	19 de junio	1121	50	5.2	0.316
H303	1987	19 de junio	1156	50	5	0.389
H311	1987	19 de junio	1149	50	5.1	0.375
A747	1987	19 de junio	1090	50	5	0.354
Novasem	2002	4 de junio	1140	49	4	0.31
Tigre (Asgrow)	2007	13 de junio	1678	76	8.1	0.54
H375	2008	18 de junio	1646	72	6	0.442
Pionner30b74	2010	1 de junio	1700	64	6.3	0.54
Pionner3251	2010	4 de junio	1700	101	10	0.54
Tigre (Asgrow)	2010	5 de junio	1678	87	9	0.54
Tigre (Asgrow)	2012	16 de junio	1196	84	7.7	0.337
Caimán (Asgrow)	2013	7 de junio	1390	71	7	0.465

Parametrización del modelo EPIC para la simulación del sistema de producción de maíz.

Cuadro 3. Estaciones climatológicas utilizadas en la calibración y validación de EPIC y las características de clima y suelo.
Table 3. Weather stations used in the calibration and validation of EPIC and characteristics of climate and soil.

Estación	Municipio	Longitud	Latitud	Altitud (m)	Temperatura promedio anual		Lluvia promedio anual (mm)	pH	Unidad de suelo
					Máxima (°C)	Mínima (°C)			
CECEAJAL	Tepatitlán de Morelos, Jal.	-102.71289	20.87311	1930	25.9	8	879	5.3	Luvisol férrico
La Barca	La Barca, Jal.	-102.53333	20.28333	1370	28.6	11.7	744	5.1	Vertisol pélico

La evaluación del efecto de las prácticas de manejo para maíz de temporal se proyectó cada cinco años, con las consideraciones siguientes:

1) El cambio de la temperatura media se consideró de 0.01 °C/año, de acuerdo con el patrón de concentración representativa PCR2.6, escenario más conservador con el que se podría esperar un cambio en la temperatura de 07 a 1.06 °C (IPCC, 2013).

1) Mean square root of the error (MSRE):

$$RCME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

2) Efficiency of the Nash-Sutcliffe model (E):

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

2) La tasa de cambio en la concentración de CO₂ fue de 1.4 ppm CO₂/año, de acuerdo con el patrón de concentración representativa PCR2.6, se podría esperar una concentración de 480 ppm de CO₂ al final de 2100, con un rango de 450 a 520 ppm de CO₂ (IPCC, 2013).

3) No se incluyó cambio en la cantidad de precipitación, solo se involucró este elemento en el balance de agua (IPCC, 2013).

Evaluación del desempeño del modelo EPIC.

La evaluación estadística del desempeño del modelo EPIC, utilizó las siguientes pruebas:

1) Raíz del cuadrado medio del error (RCME):

$$RCME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

2) Eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (E):

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

3) Índice de concordancia (d):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

4) Error promedio (EP):

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

5) Coeficiente de determinación (r²):

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i - \frac{(\sum_{i=1}^n O_i)(\sum_{i=1}^n P_i)}{n}}{\left(\sum_{i=1}^n O_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n O_i)^2}{n} \right) \left(\sum_{i=1}^n P_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n P_i)^2}{n} \right)}$$

Donde: n es el número de muestras, P_i y O_i son los valores predichos y observados, y O es la media de los datos observados. Con un valor cercano a cero de la raíz del cuadrado medio del error (RCME), más preciso es el modelo. La eficiencia del modelo (E) oscila entre -∞ y 1; una eficiencia de 1 corresponde a una combinación perfecta entre valores estimados con el modelo y datos observados; con una E igual a cero, indica que las predicciones del modelo son tan precisas como la media de los datos observados, mientras que una eficiencia menor de cero (-∞ < E < 0) se produce cuando la media observada es un mejor predictor que el modelo. El Índice de concordancia (d) representa

3) Index of agreement (d):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

4) Average error (EP):

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

5) Coefficient of determination (r²):

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i - \frac{(\sum_{i=1}^n O_i)(\sum_{i=1}^n P_i)}{n}}{\left(\sum_{i=1}^n O_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n O_i)^2}{n} \right) \left(\sum_{i=1}^n P_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n P_i)^2}{n} \right)}$$

Where: n is the number of samples, P_i and O_i are the predicted and observed values, and O is the mean of the observed data. With close to zero the root mean square error (MSRE), the more accurate is the model. The model efficiency (E) is between ∞ and 1; an efficiency of 1 corresponds to a perfect match between the model estimates and observed data values; with E equal to zero indicates that the model predictions are as accurate as the mean of the observed data, while a lower efficiency than zero (-∞ < E < 0) occurs when the observed mean is a better predictor than the model. The index of agreement (d) represents the ratio of the mean square error and potential error, so that a value of d equal to 1 represents a perfect match between the measurement and the model prediction. The coefficient of determination (r²) and the slope and intercept compares the predicted with the observed value. Test "t" was used for comparison between management practices.

Results and discussion

Calibration and validation of the model EPIC

The Table 4 shows the results of statistical tests for calibration and validation of the simulation model yield EPIC. The MSRE has over 1.25 t h⁻¹ in the prediction for the calibration and validation of the model, particularly with the middle and high yields, a situation that affects the efficiency (E) of the model with values of 0.7 and 0.68, respectively. With respect to the index of agreement (d), the simulations show high coherence values between simulated and measured yields.

In Figure 1a and b diagrams shown with maize yields estimated versus observed for model calibration and validation EPIC with its linear regression. The coefficient of

la relación entre el cuadrado medio del error y el error potencial, de manera que un valor de d igual a 1, representa una combinación perfecta entre la medición y la predicción del modelo. El valor del coeficiente de determinación (r^2) y la pendiente e intercepto compara el valor predicho con el observado. Se utilizó la prueba de “t” para la comparación entre prácticas de manejo.

Resultados y discusión

Calibración y validación del modelo EPIC

El Cuadro 4 muestra los resultados de las pruebas estadísticas para la calibración y validación de la simulación de rendimiento del modelo EPIC. La RCME presenta más de 1.25 t h⁻¹ en la predicción para la calibración y validación del modelo, particularmente con los rendimientos medios y altos, situación que repercute en la eficiencia (E) del modelo con valores de 0.7 y 0.68, respectivamente. Con respecto al índice de concordancia (d), las simulaciones presentan valores alta coherencia entre los rendimientos simulados y los medidos.

Cuadro 4. Resultados de las pruebas estadísticas del modelo EPIC en el proceso de calibración y validación.
Table 4. Results of statistical tests of the model EPIC in the calibration and validation.

Prueba estadística	Resultados de prueba		
	Valor ideal	Calibración	Validación
RMSE	0	1.258	1.252
E	1	0.7	0.681
d	1	0.978	0.976
EP	0	-0.388	-0.44

En la Figura 1a y b se muestra los diagramas de dispersión con los rendimientos de maíz estimados contra los observados para la calibración y validación del modelo EPIC, con su recta de regresión lineal. El coeficiente de determinación (r^2) presenta valores de 0.82 y 0.78, respectivamente, y una pendiente de la recta superior a la unidad e intercepto menor de cero, lo que indica tendencia a subestimar altos rendimientos y sobrestimar ligeramente bajos rendimientos.

Los resultados de la calibración y validación del modelo EPIC obtenidos en el presente estudio son similares a los observados por Gaiser *et al.* (2010), en la calibración y validación de este modelo para simular la producción de

determination (r^2) has values of 0.82 and 0.78, respectively, and a slope higher than unity and lower intercept than zero, indicating a tendency to underestimate and overestimate high yields slightly lower yields.

The results of the calibration and validation of the model EPIC obtained in this study are similar to those observed by Gaiser *et al.* (2010), the calibration and validation of this model to simulate maize production in the humid tropics of West Africa and the semi-arid region of Brazil. However, these authors emphasize the importance of harvest index for genotypes of landrace maize and improved yield and materials are influenced by the physicochemical characteristics of the soil. Given the results presented in model validation, EPIC calibration presents a good yield for use in simulating maize yields to assess the impact of proposed climate change.

Modelling the effect of yield practices and climate change on maize yield

The EPIC calibrated and validated model, the PCR2.6 climate change scenario was used with the management practices shown in the Table 4, and assess the impact of climate change on maize production system in the rainfed

regions Altos-Sur and Cienega of Jalisco. The Figure 2 shows the yield trend for the next 100 years shown with the estimated five years to practices evaluated in the region Altos-Sur of Jalisco handling yield. The average yield between PRC1 and PRC2 and PRC3 practices, was 7.7, 9.8 and 9.1 t ha⁻¹, respectively, with significant differences between PRC2 and PRC1 against PRC3, but no significant differences between PRC2 and PRC3.

It is remarkable the difference in yield management practices with PRC2 and PRC1 PRC3, particularly after 2080, where the maize falls steeply PRC1 management. At this point, the temperature is expected to reach at least 0.8 °C increase in

maíz en el trópico subhúmedo del oeste de África y la región semiárida de Brasil. Sin embargo, estos autores hacen énfasis en la importancia que tiene el índice de cosecha para los genotipos de maíz criollos y los mejorados y el desempeño de los materiales son influenciados por las características fisicoquímicas del suelo. Dadas los resultados presentados de la calibración y validación del modelo EPIC, este presenta un buen desempeño para utilizarse en la simulación de los rendimientos del maíz para evaluar el impacto del cambio climático propuesto.

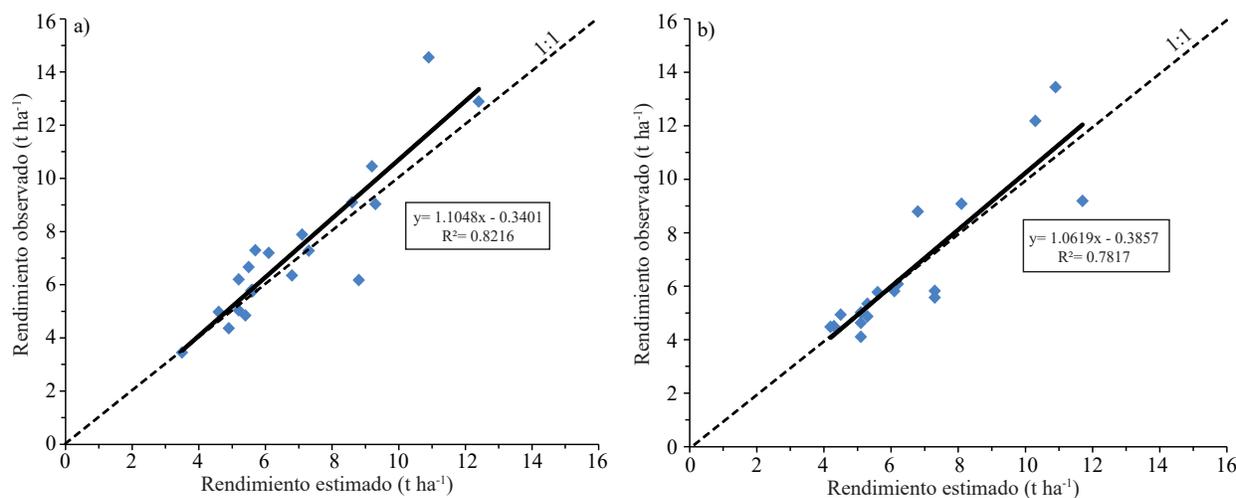


Figura 1. Relación entre el rendimiento de grano de maíz observado con el rendimiento de grano estimado en: a) la calibración; y b) validación del modelo EPIC.

Figure 1. Relationship between grain yield observed for maize grain yield estimated: a) calibration; b) Model validation EPIC.

Modelación del efecto de las prácticas de rendimiento y cambio climático sobre el rendimiento de maíz

Con el modelo EPIC calibrado y validado, se utilizó el escenario de cambio climático PCR2.6 con las prácticas de manejo el impacto en el cambio climático en el sistema de producción de maíz de temporal de la región altos sur y Ciénega de Jalisco. En la Figura 2 se muestra la tendencia del rendimiento para los siguientes 100 años con el rendimiento estimado cada cinco años para las prácticas de manejo evaluadas de la región Altos-Sur de Jalisco. El promedio de rendimiento entre las prácticas PRC1 y PRC2 y PRC3, fue de 7.7, 9.8 y 9.1 t ha⁻¹, respectivamente, con diferencias altamente significativas entre PRC1 contra PRC2 y PRC3, pero sin diferencias significativas entre PRC2 y PRC3.

Es notable la diferencia en desempeño de las prácticas de manejo PRC1 con PRC2 y PRC3, particularmente después de 2080, donde el maíz con manejo PRC1 cae abruptamente.

temperature and 83 pm CO₂ in the atmosphere, under the most conservative climate change scenario with 2.6 W/m² radiative force (IPCC, 2013). The PRC1 scenario involved the use of an intermediate-early genotype under IAF and the use of manure and chemical fertilizer two, with the most critical result for maize yield.

Although, the interaction of management practices of maize is complex with climate change scenarios, the explanation of the collapse of handling PRC1 and PRC2 less impact in

2080 and 3 following scenarios could occur by the increase of CO₂ in the atmosphere, in that increased use of plant water are reported for the reduction of evapotranspiration (Hatfield *et al.*, 2011) but also the increase in temperature increases the length of the growing season, availability and mineralization of nitrogen and changes in the availability of moisture (Izaurre *et al.*, 2011; Ruiz *et al.*, 2011), an increase in the soil temperature increases in the mineralization of the OM (Lin and Zhang, 2012).

For PRC1 practice it has low LAI (2.7), which favours evaporation with a consequent reduction in water availability for cultivation and ET reduced by increased CO₂. The same situation is observed in PRC3 PRC2 and practices, but with less intensity. After 2080, the practice seems PRC3 cushion the impact of climate change, so it is necessary to further analyse the behaviour of this system of management of maize. Although the IAF is identified as a limiting factor in yield under climate change, it is necessary to examine other factors associated with the

En esta punto, la temperatura se esperaría que alcanzará al menos un incremento de 0.8 °C en la temperatura y la 83 ppm de CO₂ en la atmósfera, bajo el escenario más conservador de cambio climático con 2.6 W/m² de fuerza radiativas (IPCC, 2013). El escenario PRC1 involucró el uso de un genotipo intermedio-precoc con bajo IAF y el uso de estiércoles y dos fertilizaciones con productos químicos, con el resultado más crítico para el rendimiento de maíz.

Aunque es compleja la interacción de las prácticas de manejo del maíz con los escenarios de cambio climático, la explicación del colapso del manejo PRC1 y de menor impacto en los escenarios PRC2 y 3 después de 2080, pueda darse por el incremento de CO₂ en la atmósfera, con el que se reporta aumento en el uso de agua por las plantas, por la reducción de la evapotranspiración (Hatfield *et al.*, 2011), pero también el incremento de temperatura aumenta la duración de la estación de crecimiento, la disponibilidad y mineralización de nitrógeno y cambios en la disponibilidad de humedad (Izaurre *et al.*, 2011; Ruiz *et al.*, 2011), un aumento de la temperatura del suelo incrementa en la mineralización de la MO (Lin y Zhang, 2012).

En el caso de la práctica PRC1 se tiene bajo IAF (2.7), lo que favorece la evaporación con la consecuente reducción de la disponibilidad de agua para el cultivo y la reducción de la ET por el incremento de CO₂. Esta misma situación se observa en las prácticas PRC2 y PRC3, pero con menor intensidad. Después de 2080, la práctica PRC3 parece amortiguar el efecto del cambio climático, por lo que se requiere analizar con mayor detalle el comportamiento de este sistema de manejo del maíz. Aunque se identifica el IAF como factor limitante en el rendimiento bajo condiciones de cambio climático, es necesario analizar otros factores asociados a la respuesta del maíz, como es la fecha de siembra, el ciclo del cultivo, erosión del suelo, dinámica de la materia orgánica en el suelo, que pudieran amortiguar estos efectos.

El rendimiento de grano obtenido para los escenarios de manejo de la región Ciénega se muestra en la Figura 3. Los rendimientos promedio para las prácticas PRC4, 6, 7, 8, 9 y 10, fueron 7.1, 6.4, 6.1, 6.6, 6.5 y 6.1 t ha⁻¹, respectivamente, sin diferencias significativas entre escenarios. La tendencia en el rendimiento de esta figura se observa que después de 2075 el rendimiento comienza a decaer, por las mismas razones que ocurren en el rendimiento de la región Altos-Sur de Jalisco.

No obstante que los rendimientos entre estas prácticas no tuvieron diferencias estadísticamente significativas, se tuvieron dos grupos de prácticas con un contraste

response of maize, such as planting date, crop cycle, soil erosion, dynamic soil organic matter that could dampen these effects.

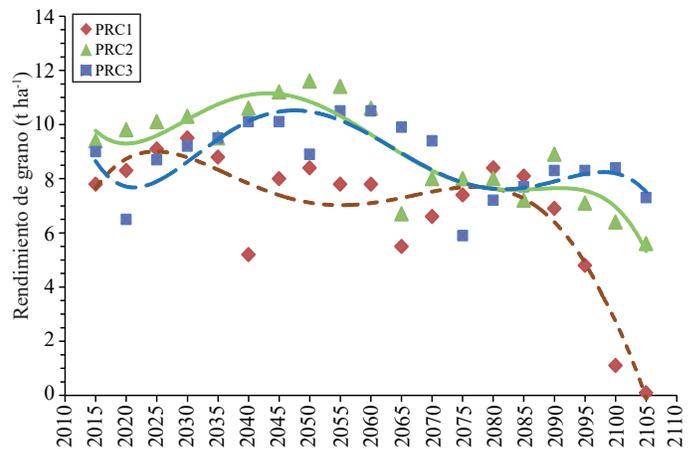


Figura 2. Tendencia del rendimiento de grano en maíz de temporal estimada cada cinco años en la región Altos-Sur de Jalisco, para los próximos 100 años.

Figure 2. Trend of grain yield in rainfed maize estimated five years in the region Altos-Sur of Jalisco, for the next 100 years.

Grain yield obtained for handling scenarios region Ciénega shown in Figure 3. The average yields for practical PRC4, 6, 7, 8, 9 and 10 were 7.1, 6.4, 6.1, 6.6, 6.5 and 6.1 t ha⁻¹, respectively, with no significant differences between scenarios. The trend in the yield of this figure shows that after 2075 the yield begins to decline, for the same reasons that occur in the yield of the region Altos-Sur.

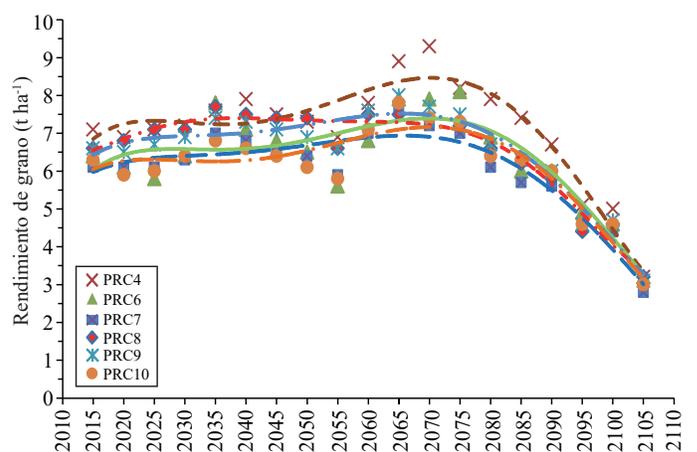


Figura 3. Tendencia del rendimiento de grano en maíz de temporal de acuerdo con seis prácticas de manejo en periodos de cinco años para la región Ciénega de Jalisco de México.

Figure 3. Trend of grain yield in maize under temporary management practices in six periods of five years for the region, Ciénega of Jalisco in Mexico.

importante, que fue el manejo de los residuos de cosecha. En los escenarios PRC4 y PRC6, no se dejan residuos de cosecha, pero en los escenarios PRC7, 8, 9 y 10, los residuos de cosecha se incorporan al suelo con dos pasos de rastra, lo que trae como consecuencia que el contenido de materia orgánica (MO) del suelo se tenga en niveles de hasta 4.6%. En la Figura 4a y b se muestra la tendencia del rendimiento de maíz para la región Ciénega con prácticas de manejo agrupados en labranza con la incorporación de residuos de cosecha y sin incorporación de residuos. En esta figura la tendencia de las prácticas de manejo con incorporación de residuos mantiene el rendimiento más estable que las prácticas sin incorporación de residuos, resultado atribuido al incremento en la materia orgánica del suelo (Causarano *et al.*, 2008).

Although the yields from these practices were no statistically significant differences, we had two groups of practices with a significant contrast: the management of crop residues. In scenarios PRC4 and PRC6 not harvest residues are left, but in the PRC7, 8, 9 and 10 scenarios, crop residues incorporated into the soil with two steps of drag, which results in that the content of organic matter (OM) of soil is taken at levels up to 4.6%. In Figure 4a and b trend maize yield for the region Ciénega is shown with management practices grouped tillage with crop residue incorporation without residue incorporation. In this figure the trend of management practices with residue incorporation remains the most stable practices without residue incorporation, profit attributable to the increase in soil organic matter yield (Causarano *et al.*, 2008).

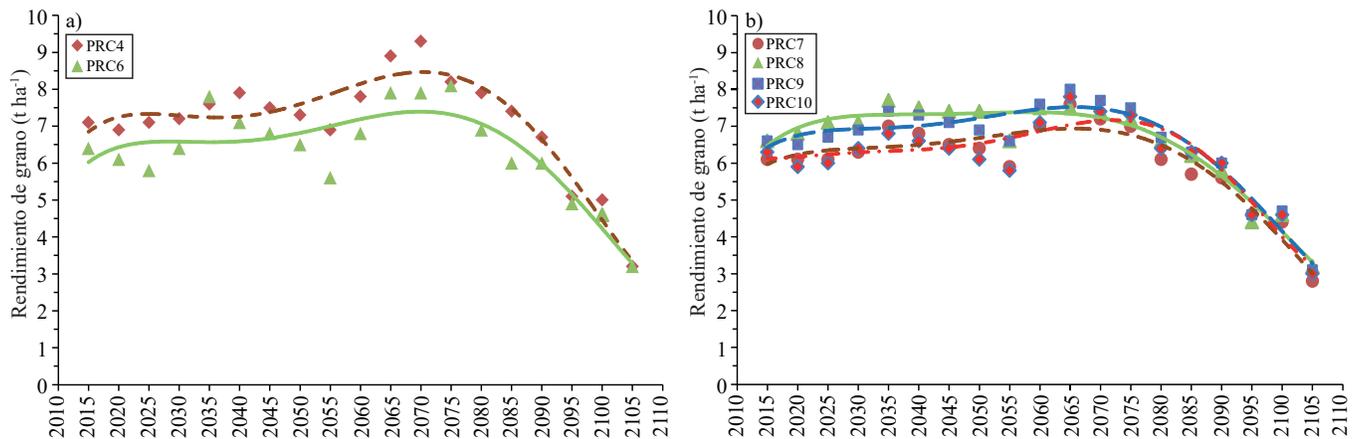


Figura 4. Tendencia del rendimiento de grano en maíz de temporal: a) con incorporación de residuos de cosecha; y b) sin residuos de cosecha, estimado cada cinco años para la región Ciénega de Jalisco de México.

Figure 4. Trend of grain yield in rainfed maize: a) incorporation of crop residues; b) without crop residues, estimated every five years for the region Cienega of Jalisco in Mexico.

El mayor contenido de MO en el suelo tiene características que reducen el impacto del cambio climático (Izaurre *et al.*, 2006), además de otros beneficios como la conservación del suelo, ahorro en energía, tiempo y mano de obra, reducción en costos de la maquinaria, conservación de humedad, reducción de la compactación del suelo, entre otro (Figuroa *et al.*, 1992). Parte de la solución al problema es una modificación a las prácticas de manejo de los escenarios PRC 7 a 10, como es la adaptación de tecnologías con genotipos de ciclo más corto al utilizado, incorporación de la labranza de conservación y densidad de siembra que genere IAF mayor a 5, pero además, es necesario evaluar otros factores que pudieran reducir el efecto del cambio climático, para identificar las prácticas que mantengan el rendimiento estable posterior a 2070.

The highest content of OM in the soil has features that reduce the impact of climate change (Izaurre *et al.*, 2006), along with other benefits such as soil conservation, saving energy, time and labour, reduced machinery costs, moisture retention, reduced soil compaction (Figuroa *et al.*, 1992). Part of the solution to the problem is a modification to the management practices of the PRC scenarios 7 to 10, as is the adaptation of technologies genotypes used shorter the cycle, incorporation of conservation tillage and planting density to generate IAF higher than 5, but it is also necessary to evaluate other factors that may reduce the effect of climate change, to identify practices that maintain stable yield subsequent to 2070.

Conclusiones

Los índices utilizados para la calibración y validación del modelo EPIC indican que utilizarse en la estimación del desempeño del cultivo de maíz a largo plazo, para las regiones Altos-Sur y Ciénega de Jalisco. La modelación del rendimiento de maíz en la región Altos-Sur de Jalisco, que las prácticas PRC1 muestra diferencias altamente significativas con respecto al rendimiento con prácticas PRC2 y PRC3, pero también la práctica PRC1 mostró que después del año 2080, el rendimiento tiende a decaer, resultado atribuido a la baja densidad de plantas expresado con IAF menor a 2.7, en cambio la práctica PRC3 amortigua de manera más eficiente los efectos del cambio climático. Para la región Ciénega, no se mostró diferencia significativa en el rendimiento de maíz a largo plazo, pero si tendencia a reducirse después de 2075 el rendimiento.

Se tuvieron dos grupos de prácticas contrastantes, donde uno se incorporan los residuos de cosecha con el que se incrementa la materia orgánica del suelo, condición que da mayor estabilidad en el rendimiento del maíz hasta 2070, punto en que comienza a decaer el rendimiento. Es necesario realizar investigación adicional para evaluar interacciones con otros factores de manejo como es la fecha de siembra, el ciclo del cultivo, erosión del suelo, dinámica de la materia orgánica en el suelo, que pudieran amortiguar el rendimiento en el largo plazo, posterior a 2070.

Literatura citada

- Angulo, C.; Rötter, R.; Lock, R.; Enders, A.; Fronzek, S. and Ewert, F. 2013. Implication of crop model calibration strategies for assessing regional impacts of climate change in Europe. *Agric. Forest Meteorol.* 170:32-46.
- Aurbacher, J.; Parker, S. P.; Calberto, S. G. A.; Steinbach, J.; Reinmuth, E.; Ingwersen, J. and Dabbert, S. 2013. Influence of climate change on short term management of field crops -a modelling approach. *Agric. Systems.* 119:44-57.
- Causarano, H. J.; Shaw, J. N.; Franzluebbers, A. J.; Reeves, D. W.; Raper, R. L.; Balkcom, K. S.; Norfleet, M. L. and Izaurralde, R. C. 2007. Simulating field-scale soil organic carbon dynamics using EPIC. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:1174-1185.
- Chavas, D. R.; Izaurralde, R. C.; Thomson, A. M. and Gao, X. 2009. Long-term climate change impacts on agricultural productivity in eastern China. *Agric. Forest Meteorol.* 149:1118-1128.
- De Witt, C. T. 1978. Simulation of assimilation, respiration, and transpiration of crops. *Simulation Monographs.* Centre for Agricultural Publishing and Documentation. Wageningen, The Netherlands. 432 p.

Conclusions

The indices used for the calibration and validation of the model EPIC were used for estimating the yield of maize in the long term, in the Altos-Sur and Ciénega regions of Jalisco. The modelling of maize yield in the region Altos-Sur of Jalisco, the PRC1 practice shows significant differences with respects to yield practices and PRC3 PRC2, but the practice PRC1 showed that after 2080, the yield tends to decline, a result attributed to the low density of plants expressed with IAF lower than 2.7; however, the PRC3 practice dampens the effects of climate change. For the region Ciénega, no significant difference was shown in maize yield in the long term, but tend to decrease after 2075 yield.

Two contrasting groups of practices were present, where in one the crop residues are included in the soil, obtaining more organic matter, a condition that gives greater stability in maize yield until 2070, at which point it begins to decay the yield. Further research is needed to evaluate interactions with other management factors such as planting date, crop cycle, soil erosion dynamics of organic matter in the soil, which could dampen yield in the long term after 2070.

End of the English version



- Farina, R.; Seddaiu, G.; Orsini, R.; Steglich, E.; Roggero, P. P. and Francaviglia, R. 2011. Soil carbon dynamics and crop productivity as influenced by climate change in a rainfed cereal system under contrasting tillage using EPIC. *Soil Tillage Res.* 112:36-46.
- Ferrer, F.; Villar, J. M. and Stockle, C. O. 2000. Evaluación del modelo de simulación crop syst para maíz en el Valle del Ebro. *Invest. Agr. Prod. Prot. Veg.* 15(3):237-251.
- Figueroa, S. B.; Amante, O. A.; Cortés, T. H. G.; Pimentel, L. J.; Osuna, C. E. S.; Rodríguez, O. J. M. y Morales, F. F. J. 1992. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. SARH-Colegio de Posgraduados. Salinas, S. L. P., México. 150 p.
- Flores, H. E.; Olmos, J. J.; Ramírez, H.; Fuentes, V. O.; Reynoso, O. y Moreno, H. 2007. ET-59 Caracterización del sistema de producción de leche de la cuenca hidrográfica El Jihuete, Jalisco, México. *Memorias del II Congreso Internacional de Producción Animal Tropical.* 26 al 29 de noviembre. La Habana, Cuba. 21 p.
- Flores, L. H. E.; Ireta, M. J.; Pérez, D. J. F.; Ruíz, C. J. A. y Díaz, M. P. 2009. Identificación de Buenas Prácticas Agrícolas para reducir la degradación del suelo e incrementar la calidad del agua: Metodología aplicada en la cuenca hidrográfica El Jihuete. *Campo Experimental Centro Altos de Jalisco.* Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. Libro científico Núm.1. 155 p.

- Flores, L. H. E.; Paredes, M. R.; Ruvalcaba, G. J. M.; De La Mora, O. C.; Pérez, D. J. F. e Ireta, M. J. 2011. Metodología para la evaluación del valor agregado del programa de maíz de alto rendimiento (PROEMAR) 2010 en Jalisco y Guanajuato. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco. México. Libro técnico Núm. 2. 162 p.
- Flores, L. H. E.; de La Mora Orozco, Á. C.; Chávez- Durán, A.; Ruiz Corral, J. A.; Ramírez- Vega H. and Fuentes- Hernández, V. O. 2012. Nonpoint pollution caused by the agriculture and livestock activities on surface water in the highlands of Jalisco, Mexico. *In*: resource management for sustainable agriculture Abrol, V. and Sharma, P. (Eds). InTech Publisher. Rijeka, Croatia. 85-112 pp.
- Flores-López, H. E.; Hernández-Jáuregui, A. L.; Figueroa-Viramontes, U. y Castañeda- Villanueva A. A. 2012. Calidad microbiológica del agua por contaminación difusa de la aplicación de estiércoles en maíz y pasto. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 3:127-141 pp.
- Gaiser, T.; de Barros, I.; Sereke, F. and 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. *Agric. Ecosys. Environ.* 135:318-327.
- Gohari, A.; Eslamian, S.; Abedi-Koupaei, J.; Massah Bavani, A.; Wang, D. and Madani, K. 2013. Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud River Basin. *Sci Total Environ.* 442:405-419.
- Hatfield, J. L.; Boote, K. J.; Kimball, B. A.; Ziska, L. H.; Izaurrealde, R. C.; Ort, D.; Thomson, A. M. and Wolfe, D. 2011. Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agron. J.* 103:351-370.
- Hilger, T. H.; Herfort, J.; de Barros, I.; Gaiser, T.; Saboya, L. M. F.; Ferreira, L. G. R. and Leihner, D. E. 2000. Potential of EPIC/ALMANAC to Estimate Crop Yields under Erratic Rainfall in NE Brazil. German-Brazilian workshop on neotropical ecosystems - achievements and prospects of cooperative research Hamburg- September 3-8, 2000 Session 7: Tools for Integration of Ecosystem Studies towards the Development of Management Strategies. 49 p.
- Hui, J., L. Er-da, T. Wheeler, A. Challinor, and Shuai, J. 2013. climate change modelling and its roles to chinese crops yield. *J. Int. Agric.* 12(5):892-902.
- Hodges, T.; Botner, D.; Sakamoto, C. and Hays, H. J. 1987. Using the CERES-maize model to estimate production for the U.S. Corn Belt. *Agric. For. Meteorol.*, 40:293-303.
- Huszár, T.; Mika, J.; Lóczy, D.; Molnár, K and Kertész, Á. 2009. Climate Change and Soil Moisture: A Case Study. *PHYS. Chem. Earth (A)*. 24(10):905-912.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate change 2007: mitigation of climate change. Contribution of working group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *In*: Metz, B.; Davidson, O.; Bosch, P.; Dave, R. and Meyer, L. (Eds.). Cambridge University Press, UK. and USA. 851 p.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; Allen, S. K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V. and Midgley, P. M. (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
- Izaurrealde, R. C.; Thomson, A. M.; Morgan, J. A.; Fay, P. A.; Polley, H. W. and Hatfield, J. L. 2011. Climate impacts on agriculture: implications for forage and rangeland production. *Agron. J.* 103:371-381.
- Izaurrealde, R. C.; Williams, J. R.; McGill, W. B.; Rosenberg, N. J. and Quiroga, J. M. C. 2006. Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data. *Ecol. Modelling.* 192:362-384.
- Kiniry, J. R.; Major, D. J.; Izaurrealde, R. C.; Williams, J. R.; Gassman, P. W.; Morrison, M.; Bergentine, R. and Zentner, R. P. 1995. EPIC model parameters for cereal, oilseed, and forage crops in the northern Great Plains region. *Can. J. Plant Sci.* 75:679-688.
- Lal, R.; Delgado, J. A.; Groffman, P. M.; Millar, N.; Dell, C. and Rotz, A. 2011. Management to mitigate and adapt to climate change. *J. Soil Water Conser.* 66(4):276-285.
- Organización para las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2007. Adaptation to climate change in agriculture, forestry and fisheries: perspective framework and priorities. FAO Interdepartmental Working Group on Climate Change. Rome, Italy. 24 p.
- Ruiz, C. J. A.; Medina, G. G.; Ramírez, J. L. D.; Flores, L. H. E.; Ramírez, O. G.; Manríquez, O. J. D.; Zarazúa, V. P.; González, E. D. R.; Díaz, P. G. y de la Mora, O. C. 2011. Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2:309-323.
- Villar-Sánchez, B.; López-Martínez, J.; Pérez-Nieto, J. y Camas-Gómez, R. 2003. Aplicación del modelo de simulación EPIC en la predicción del efecto de sistemas de labranza del suelo *Terra Latinoamericana*. 21(3):381-388.
- Williams, J. R. 1990. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: a case history. *Philos. Trans. R. Soc. London* 329:421-428.
- Wang, X.; Harmel, R. D.; Williams, J. R. and Harman, W. L. 2006. Evaluation of EPIC for assessing crop yield, runoff, sediment and nutrient losses from watersheds with poultry litter fertilization. *Transactions of the ASABE*. 49:47-59.
- Zarazúa, V. P. 2011. Evaluación del cambio climático y sus impactos sobre los cultivos de trigo, maíz y agave de la Región Ciénega de Chapala (análisis retrospectivo y análisis prospectivo). Tesis doctoral. Universidad de Guadalajara-CUCBA. Zapopan, Jalisco, México. 188 p.