

Cambio climático y efectos en la fenología del maíz en el DDR-Toluca*

The effects of climate change on the phenology of corn in the RDD-Toluca

Rebeca Granados Ramírez^{1§} y Asael Alejandro Sarabia Rodríguez²

¹Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Cd. Universitaria, C. P. 04510, Coyoacán, México, D. F. Tel. 01 (55)56224335. Ext. 45477. Fax (01 (55)56162145. ²Posgrado en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, C. P. 04510, Coyoacán, México. (albarn_84@hotmail.com). §Autora para correspondencia: rebeca@igg.unam.mx.

Resumen

El cambio climático más probable es el ascenso de la temperatura del aire en promedio de 2 °C; en cuanto a la precipitación pluvial la alteración es mayor, en algunos casos se escenifica una disminución de 40%; sin embargo, es de esperarse que existan regiones donde la precipitación aumente. Estos cambios afectarán ciertos períodos de vida de las plantas cultivadas, situación que repercutirá en la productividad. El trabajo tiene como objetivo analizar las posibles alteraciones que puede traer el cambio climático en la producción de maíz de temporal en el Distrito de Desarrollo Rural de Toluca en el Estado de México. Los resultados obtenidos con el modelo de Cambio Climático Hadley, de los escenarios de emisiones A2 y B2 (horizonte 2050), muestran que las variables temperatura y precipitación tendrán desenlaces negativos en el desarrollo fenológico de maíz, principalmente afectará la floración, misma que puede reducir de manera acentuada la producción.

Palabras clave: *Zea mays* L.; aumento de temperatura, agricultura de temporal, déficit de agua.

Abstract

The most likely climate change is a rise of 2 °C in average air temperature; with respect to rainfall the projected change is greater, in some cases a 40% decrease; however, it is to be expected that there regions where precipitation increases. These changes will affect certain periods of the life of cultivated plants, a situation that will affect productivity. The aim of this work is to analyze the possible disturbances that can be brought about by climate change in corn production in the Rural Development District of Toluca in the State of Mexico, Mexico. The results obtained with the Hadley Climate model from the emission scenarios A2 and B2 (horizon 2050) show that the temperature and precipitation variables will have negative effects in the phenological development of corn, mainly affecting flowering, which could significantly decrease production.

Key words: *Zea mays* L.; temperature increse, dryland agriculture, water deficit.

* Recibido: mayo de 2012
Aceptado: febrero de 2013

Introducción

Las plantas como seres vivos, se consideran como aparatos meteorológicos registradores, sensibles a diversos elementos del clima. La fenología estudia la secuencia temporal de las distintas fases periódicas de las plantas y sus relaciones con el clima y el tiempo atmosférico; fases como: aparición de las primeras hojas, floración, maduración de los frutos, etc., tienen relación con las condiciones prevalecientes de temperatura y la oportuna cantidad de precipitación (Taiz y Zeiger, 2006; Villers *et al.*, 2009).

Así se tiene que cada planta presenta límites mínimos, óptimos y máximos; algunas son susceptibles a las temperaturas altas en las primeras fases fenológicas y posteriormente pueden resistir altas temperaturas, otras suspenden funciones al estar en condiciones de bajas temperaturas. Igualmente la oportuna cantidad de agua es vital; una precipitación excesiva en las primeras fases de vida es perjudicial por afectar los retoños, si está acompañada de granizo y se presenta durante la floración y fructificación causará bajas en la producción. Contrariamente se pueden presentar condiciones de sequía, con lo cual, los cultivos manifiestan cambios en la acumulación de biomasa, en los procesos de asimilación primaria, entre otros y finalmente en el rendimiento (Taiz y Zeiger, 2006).

Dentro de las fases fenológicas de las plantas, se reconoce la sensibilidad e importancia que poseen la floración y desarrollo del fruto a los cambios climáticos (Bradley *et al.*, 1999; Beaubien y Freeland, 2000; Peñuelas y Filella, 2001).

Ahora bien, respecto al cambio climático éste se entiende como un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana y que se suma a la variabilidad natural (Sánchez-Cohen *et al.*, 2011). Las últimas evaluaciones del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) presentadas en el Cuarto Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (AR4 por sus siglas en inglés) argumentan que es un fenómeno inequívoco cuyo aumento ha sido de 1 °C respecto a las temperaturas registradas en 1850 (Gay *et al.*, 2010).

Sus efectos son irreversibles en diversos sistemas naturales y sugieren que a finales del siglo XXI el incremento en la temperatura del planeta con mayor probabilidad será de entre 2 a 5 °C; el nivel del mar podría registrar un aumento de 28 a 43 centímetros y posiblemente se observarán cambios

Introduction

Plants, as living things, are considered as meteorological recorders, sensitive to various weather elements. Phenology studies the temporal sequence of the various periodic phases of plants and their relationships with climate and weather; phases such as: appearance of the first leaves, flowering, fruit ripening, etc., are all related to the prevailing temperature conditions and the timely amount of precipitation (Taiz and Zeiger, 2006; Villers *et al.*, 2009).

Thus we have that each plant has minimum, optimal and maximum limits; some are susceptible to high temperatures in the early phenological stages, and can later withstand high temperatures; others suspend their functions when faced with cold conditions. A timely amount of water is vital; excessive precipitation in the early stages of life is detrimental as it affects the shoots; if it is accompanied by hail and occurs during the flowering and fruiting phases it can cause a production decrease. Contrarily, drought conditions might occur, causing changes in the biomass accumulation of crops, as well as in primary assimilation processes, among others, and in yields (Taiz and Zeiger, 2006).

Among the plant phenological stages, flowering and fruit development are very sensitive to climate change (Bradley *et al.*, 1999; Beaubien and Freeland, 2000; Peñuelas and Filella, 2001).

Climate change is understood as a change of the climate attributed directly or indirectly to human activity and natural variability (Sánchez-Cohen *et al.*, 2011). The latest assessments of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC for its acronym in English) presented in the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR4 for its acronym in English) argue that it is an unequivocal phenomenon which has produced a temperature increase of 1 °C compared to the temperatures recorded in 1850 (Gay *et al.*, 2010).

Its effects are irreversible in many natural systems and suggest that in the late twenty-first century the increase in global temperatures will more likely be between 2-5 °C; the sea level could register an increase of 28 to 43 centimeters and significant changes will possibly be observed in rainfall patterns and in extreme weather

importantes en los patrones de precipitación y en los eventos climáticos extremos; finalmente el cambio climático ya está teniendo una influencia indiscutible sobre muchos de los sistemas biológicos (Peñuelas y Filella, 2001; Villers *et al.*, 2009; Sánchez *et al.*, 2011).

Hasta ahora el incremento de la temperatura media parece muy leve, pero ha conllevado a una respuesta del reino vegetal; los cambios y evidencias producto de estas variaciones, han sido investigadas y reportadas en las contribuciones de los grupos de trabajo del (AR4) (Rosenzweig *et al.*, 2007). Por otro lado, Ruiz *et al.* (2000) resaltan que los agrosistemas más sensibles a los cambios de los elementos del clima son los sistemas en condiciones de temporal; además Conde *et al.* (2004) consideran que esta actividad se encuentra sumamente vulnerable, sobre todo en los países en desarrollo. Los impactos reportados son tanto, en los ciclos estacionales (duración del periodo de crecimiento e inicio del periodo de crecimiento) y de la vida (etapas fenológicas) que incluyen retención o caída prematura de las hojas, cambios en las fechas de floración y maduración o cosecha (Bradley *et al.*, 1999; Beaubien y Freeland, 2000).

En términos generales el cambio climático es un tema que causa gran preocupación; algunas evaluaciones de los posibles efectos, particularmente en las fases fenológicas y áreas potenciales del maíz en México, han sido subrayadas por (Conde *et al.*, 1997; Ruiz *et al.*, 2000; Alvarado *et al.*, 2002; Conde *et al.*, 2007). Mismos que sugieren impactos en los rendimientos y reducciones en las superficies aptas.

Dada la importancia del maíz (*Zea mays* L.) y su vulnerabilidad a las variaciones de los elementos del clima, el objetivo del trabajo fue realizar un análisis de las posibles alteraciones que puede traer consigo el cambio climático, particularmente las fluctuaciones en verano de la temperatura y precipitación; además de sus repercusiones en la fenología del maíz de temporal en el Distrito de Desarrollo Rural (DDR- Toluca) en el Estado de México. Se asume que para un futuro los requerimientos agroclimáticos de diversas fases fenológicas del maíz no serán satisfechos.

Materiales y métodos

Respecto al área en estudio es importante mencionar que el Estado de México en 2010 reportó una superficie agrícola de 622 529.86 hectáreas, de las cuales 74.4% fueron ocupadas

events; finally, climate change finally is already having an unquestionable influence on many biological systems (Peñuelas and Filella, 2001; Villers *et al.*, 2009; Sánchez *et al.*, 2011).

So far, the average temperature increase seems very slight, but it has led to a response from the plant kingdom the changes produced by these variations and their evidence have been investigated and reported in the contributions of the AR4 working groups (Rosenzweig *et al.*, 2007). Furthermore, Ruiz *et al.* (2000) emphasize that the more sensitive agrosystems to changes in climate elements are dryland systems; Conde *et al.* (2004) believe that dryland agriculture is extremely vulnerable, especially in developing countries. Impacts on both the seasonal cycles (duration of the growth period and the beginning of the growth period) and the life cycles (phenological stages) of plants have been reported, including leaf retention or premature leaf drop, changes in flowering and maturity dates, etc. (Bradley *et al.*, 1999; Beaubien and Freeland, 2000).

In general terms, climate change is an issue of great concern; some assessments of the potential effects, particularly with respect to phenological stages and the potential areas for corn cultivation in Mexico have been highlighted by (Conde *et al.*, 1997; Ruiz *et al.*, 2000; Alvarado *et al.*, 2002; Conde *et al.*, 2007). They suggest significant impacts on yields and on the reduction of suitable surfaces for corn production.

Given the importance of corn (*Zea mays* L.) and its vulnerability to changes in climate elements, the aim of this study was to analyze the possible changes that climate change could bring about for it, particularly temperature and precipitation fluctuations in summer, as well its impact on the phenology of corn in the Rural Development District (RDD-Toluca) in the State of Mexico. It is assumed that future the agro-climatic requirements of various phenological stages of corn will not be satisfied.

Materials and methods

Regarding the study area, it is important to note that the State of Mexico reported an agricultural area of 622 529.86 hectares in 2010, 74.4% of which were occupied with corn. One of the districts that stand out for its large cultivated

con maíz grano. Uno de los distritos que sobresalen por sus extensas superficies sembradas es el DDR-Toluca, con 112 720.49 ha. Las variedades de maíz blanco cultivadas en el distrito son: H-23, 28, 30, 33 y 34, cuya duración del periodo de crecimiento (DPC) oscila entre 160-170 días y las fechas de siembra recomendada son del 20 de abril al 31 de mayo y a partir del 1 de octubre se inician la cosecha hasta el 15 de diciembre.

Se recopiló información mediante entrevistas a productores de comunidades pertenecientes al distrito de Toluca que sirvieron para corroborar el manejo de las variedades, fechas regulares de siembra y conocer la percepción de las variaciones de la temperatura y precipitación en los últimos años y la afectación en sus cultivos.

Con información bibliográfica se integraron los niveles de aptitud y potencial productivo del maíz, mismos que se resumen en el (Cuadro 1), y los requerimientos (mínimos, óptimos y máximos) por fase fenológica en el (Cuadro 2).

Cuadro 1. Requerimientos agroclimáticos del maíz.

Table 1. Agroclimatic requirements of corn.

Variable	Tipo de aptitud *				Potencial		
	MA	A	mA	NA	Alto	Medio	Bajo
Temperatura (°C)	22-26	18-22	14-18	<10	18-26	12-18 / 26-30	<12
Precipitación (mm)	600-1000	500-600	300-500	<300	600-1000	500-600	300-500

*NA= no apto; mA= marginalmente apto; A= apto y MA= muy apto. Fuente: Reyes, 1990; Flores *et al.*, 2000; FAO, 2011.

Cuadro 2. Valores mínimos, máximos y óptimos en los diferentes estadios del maíz.

Table 2. Minimum, maximum and optimal values at the different stages of corn.

Fase	Temperatura (°C)		
	Mínima	Óptima	Máxima
Germinación	10	20-25	40
Crecimiento vegetativo	15	20-30	40
Floración	20	21-30	30
		Precipitación (mm)	
Total en el ciclo vegetativo	400-500	500-800	1000
Germinación		45	
Crecimiento vegetativo		170	
Floración		220	
Formación de fruto: estado lechoso y masoso		215	
Madurez		90	

Elaboración propia con información de Reyes, 1990; Flores *et al.*, 2000.

Se obtuvieron las anomalías de temperaturas y las posibles fluctuaciones de precipitación del Modelo de Circulación General (MCG) Hadley tomadas de Conde *et al.* (2008) y el Canadian Climate Center del Model Boer *et al.* (1992) de

area is the RDD-Toluca, with 112 720 49 ha. White corn varieties grown in the district are: H-23, 28, 30, 33 and 34, the growth period duration of which (DPC) ranges from 160-170 days; the recommended planting dates are from April 20 to May 31, and the harvest starts on October 1 and ends on December 15.

Information was gathered through interviews with producers from communities belonging to the Toluca district that served to corroborate how corn varieties were managed, the planting dates, and to know how the producers perceive the changes in temperature and precipitation of recent years and the effect on their crops .

Bibliographic information was used to integrate the suitability levels and the productive potential of corn, which are summarized in Table 1, as well as the requirements (minimum, optimal and maximum) of each phenological stage (Table 2).

Temperature anomalies and possible precipitation fluctuations obtained from the Hadley General Circulation Model (GCM) were taken from Conde *et al.* (2008), and those of the Canadian Climate Center Model from Boer *et al.*

todos ellos en forma mensual, y bajo el escenarios con énfasis regional: A2, el cual considera incrementos en gases de efecto invernadero (GEI) de 850 partes por millón (ppm), resultado de escasas o nulas políticas ambientales y B2 proyecta emisiones de 620 ppm resultado de normas enfocadas al desarrollo sustentable Nakicenovic *et al.* (2000); ambos escenarios estimados para el 2050; fueron ordenados por ciclo agrícola y fase fenológica, para su análisis correspondiente.

Para conocer las condiciones climáticas normales y los cambios esperados a 2050, se realizó la construcción de gráficas y diagramas ombrotérmicos, representando las cinco fases fenológicas más ampliamente manejadas por los agricultores y expertos en los estudios del maíz (germinación, crecimiento vegetativo, floración, formación del fruto: estado masoso y lechoso y finalmente madurez) tanto de información de la estación meteorológica Calixtlahuaca (15-203), localizada en la zona en estudio, como del escenario base y los cambios proyectados a 2050.

Los diagramas ombrotérmicos definen distintas condiciones de eficiencia de la humedad respecto a la variación de la temperatura; la intersección de las curvas de temperatura y precipitación forman los polígonos: déficit hídrico, mismo que refiere al área que representa un aporte de lluvia suficiente para mantener húmedo el suelo; condición húmeda, área que constituye el aporte de lluvia entre 60 y 100 mm, lo cual mantiene el suelo húmedo y libre de estrés a una planta y superávit es la cantidad de lluvia recibida por encima de los 100 mm y que rebasa la capacidad de campo. Para la construcción del diagrama, se utilizó la fórmula $p = 2t + 28$ propuesta por García *et al.* (1983), ya que en esta zona existe un régimen de lluvias de verano.

Resultados

Escenario base

En verano las condiciones de temperatura mínima en el DDR-Toluca oscilaron entre los 5.7 y 8.4 °C, valores térmicos inferiores a los parámetros óptimos, ya que los requeridos por el cereal en cualquier fase de crecimiento, debe ser mayor a 10 °C. Las temperaturas máximas fueron entre 19.1 y 22.5 °C, registros que se encontraron dentro y muy cercanos a las temperaturas para el buen desarrollo de los estadios del maíz (Cuadro 3).

(1992), all of them on a monthly basis, and under the regional scenario A2, which considers increases in greenhouse gases (GHG) of 850 parts per million (ppm), a result of little or no environmental policies; the B2 scenario projects emissions of 620 ppm as a result of the establishment of standards focused on sustainable development (Nakicenovic *et al.* 2000). Both scenarios were estimated up to 2050, and were ordered by agricultural cycle and phenological stage for further analysis.

In order to know normal weather conditions and expected changes in 2050, ombrothermic graphs and diagrams were constructed, representing the five phenological stages most widely managed by farmers and experts in corn studies (germination, vegetative growth, flowering, fruit development: milky-dough stage and maturity), based both on information from the Calixtlahuaca weather station (15-203), located in the study area, and on the base scenario and the projected changes up to 2050.

Ombrothermic diagrams define different conditions of humidity efficiency with respect to temperature variation; the intersection of the temperature and precipitation curves form the following polygons: hydric deficit, referring to the area that represents a contribution of rain enough to maintain soil moisture; moisture condition, the area representing a rain contribution of between 60 and 100 mm, which keeps the soil moist and the plants free of stress; and surplus, which represents the amount of rainfall over 100 mm which exceeds field capacity. For the construction of the diagram, the formula $p = 2t + 28$ proposed by García *et al.* (1983) was used, since in this area there is a summer rainfall regime.

Results

Baseline scenario

In summer, minimum temperature conditions in the RDD-Toluca ranged between 5.7 and 8.4 °C, below the optimal parameters, as the thermal values required by corn at any stage of growth must be greater than 10 °C. The maximum temperatures were between 19.1 and 22.5 °C, within and very close to the temperatures required for the proper development of all the stages of corn (Table 3).

Cuadro 3. Temperatura mínima y máxima histórica (°C) versus requerimientos térmicos óptimos DDR Toluca.
Table 3. Historical minimum and maximum temperature (°C) versus optimal thermal requirements for the RDD Toluca.

Fase fenológica	Temperatura mínima (°C)				
	Germinación	Crecimiento vegetativo	Floración	Formación de fruto	Madurez
Meses	May.	Jun.-Jul.	Ago.	Sep.	Nov.
Escenario base	7.2	8.4	8	7.8	5.7.
Requerimientos óptimos	10	11-13	11-13	11-13	10
Temperatura máxima (°C)					
Escenario base	22.5	19.9	19.4	19.2	19.1
Requerimientos óptimos	20-25	20-30	20-30	20-30	20-30

Fuente: elaboración propia con información recabada en campo, Cuadro 1 y 2.

Las condiciones ombrotérmicas normales en verano reportaron una temperatura media mensual entre 13.1 y 14.8 °C; y en relación a la precipitación fueron 701 mm, mismos que representaron 88% de la precipitación total anual. Mayo alcanzó condición húmeda por lo que el suelo no representó peligro de estrés para iniciarse la siembra y propiciar la germinación, es la temporada en que generalmente inicia el ciclo agrícola en el DDR-Toluca y zonas aledañas. Las condiciones de humedad con superávit fueron de junio a septiembre; las cantidades y oportunas lluvias se presentaron adecuadamente en cada fase (Figura 1).

La intersección de la información climática histórica y los requerimientos termopluviométricos del cultivo, dieron como resultado que el maíz de temporal del distrito se halle bajo el tipo de aptitud marginalmente apta (mA) y potencial productivo medio; con esta categorización el DDR-Toluca reportó una tasa media anual de crecimiento (TMAC) de 1996 a 2010 de 1.9% y rendimiento promedio de 4.6 t ha⁻¹ de maíz. Particularmente en 1996 y 2009 se presentaron reducción de precipitación en la época caliente (sequía intraestiva) cuantificada entre 15-20%, misma que se registro en julio y agosto, causando reducción en los rendimientos.

Modelo Hadley, escenario A2 horizonte 2050

Las salidas de este modelo simularon los incrementos de temperatura y los porcentajes de precipitación ante la duplicación del CO₂ en la atmósfera. Respecto a la temperatura media reportó un aumento de 1.3 °C, mismo que presentó variaciones mes a mes. En general la fecha de siembra en el distrito agrícola de Toluca se ha realizado entre el 20 de abril y 31 de mayo, los requerimientos óptimos de

Normal ombrothermic conditions in summer had a monthly average temperature between 13.1 and 14.8 C; average precipitation was 701 mm, which represented 88% of the total annual rainfall. A moist condition was reached in May so the soil offered no stress danger for the beginning of planting and encouraged germination; this is the season at which the agricultural cycle in the RDD-Toluca and surrounding areas usually begins. Surplus moisture conditions lasted from June to September; the volume and the time of the rains were adequate in each stage (Figure 1).

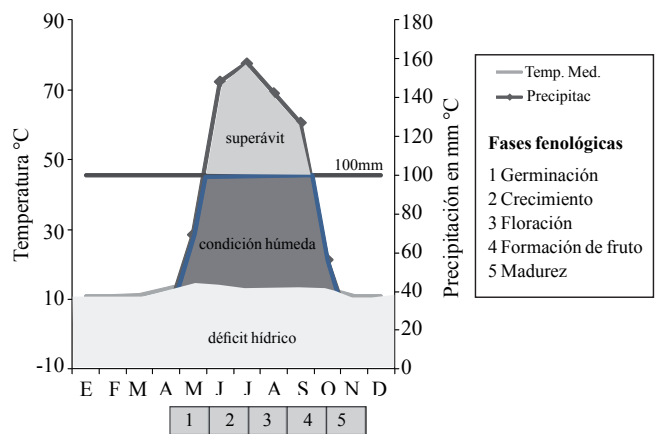


Figura 1. Escenario base. Diagrama ombrotérmico, se señalan las distintas condiciones de humedad y las etapas fenológicas del maíz.

Figure 1. Baseline scenario. ombrothermic diagram; the different humidity conditions and phenological stages of corn are indicated.

The intersection between historical climate data and pluviothermal crop requirements resulted in the dryland corn of the district being under marginally suitable (mS) conditions, with a medium productive potential; with this categorization

temperatura media en esta fase fenológica deben oscilar entre 20 a 25 °C, y una mínima de 10 °C. En el escenario base se reportó una temperatura de 14.8 °C en mayo; en cuanto a la proyección en el escenario A2 del modelo Hadley reportó 16.1 °C, este aumento beneficiará al cultivo del maíz al aproximarse los 20 °C, que es el valor de temperatura que se encuentra dentro de los requerimientos óptimos para el cereal en ésta fase fenológica.

El crecimiento vegetativo se presenta en junio y julio; en el escenario de referencia se reportó una temperatura media de 14.5 y 13.6 °C respectivamente, estas se consideran poco favorables para el desarrollo de la planta en esta fase fenológica, ya que la temperatura mínima recomendable es ≥ 15 °C, sin embargo, con las proyecciones del escenario A2 se tendría un incremento, la temperatura media escenificada será de 15.9 y 14.9 °C respectivamente, este incremento favorecerá de manera importante el crecimiento de la planta.

La fase fenológica de floración se ha presentado generalmente en agosto, en esta etapa la temperatura óptima recomendada oscila entre 20 - 30 °C, el aumento reportado ascendió en 1.3 °C con respecto a la normal, por tanto el valor absoluto será 15 °C, aún cuando se presente este incremento en 2050, no será suficiente para encontrarse dentro de los niveles óptimos térmicos. La formación de fruto, tanto en su estado lechoso y masoso, es la fase fenológica que requiere un mayor número de días para desarrollarse, entre 35 y 45 días, se presenta entre agosto y septiembre, cuyos requerimientos oscilan entre 20 - 30 °C, aún cuando existieran los aumentos y se escenificaran temperaturas de 15.0 y 14.7 °C en dichos meses, estos no se encontrarían dentro de los niveles recomendables.

La fase fenológica de madurez en el DDR-Toluca se ha desarrollado generalmente en octubre, las necesidades deben ser entre 20 - 30 °C, sin embargo, aún cuando se proyecta un incremento de temperatura de 1.5 °C para 2050, situándose en los 15 °C, este aún se encontrará lejos de los niveles óptimos reportados (Figura 2).

En cuanto a temperaturas mínimas se espera un aumento de 2.5 °C y en las máximas 2 °C, mismas que no alcanzarán los valores óptimos requeridos, pero serán positivos, por un lado, alejaría la zona de las heladas y otro beneficiaría el desarrollo de las fases fenológicas del cultivo del maíz.

the RDD-Toluca reported an average annual growth rate (AAGR) of 1.9% and an average yield of 4.6 t ha⁻¹ of corn from 1996 to 2010. In 1996 and 2009 there was a particular decrease of precipitations in the warm season (midsummer drought) of between 15-20%, recorded in July and August, that caused a reduction in yields.

Hadley model, A2 scenario with 2050 horizon

The outputs of this model simulated the temperature increases and the precipitation rates when the amount of CO₂ in the atmosphere doubled. The average temperature showed an increase of 1.3 °C, which varied from month to month. Overall, the date of planting in the agricultural district of Toluca has been between April 20 and May 31; the average optimal temperature requirements at this phenological stage should range between 20-25 °C, with a low of 10 °C. In the baseline scenario a temperature of 14.8 °C was reported in May; the A2 scenario projection of the Hadley model showed 16.1 °C, an increase which will benefit corn, as it approaches 20 °C, which is the temperature value that falls within the optimal requirements for the cereal at this phenological stage.

Vegetative growth occurs in June and July. In the baseline scenario an average temperature of 14.5-13.6 °C for each month, respectively, was reported; these temperatures are considered unfavorable for plant growth at this phenological stage, as the minimum temperature recommended is = 15 °C; however, the projections for the A2 scenario suggest a temperature increase. The projected average temperature is 15.9-14.9 °C for June and July, respectively; this increase would significantly promote plant growth.

The phenological stage of flowering has usually presented in August, at which time the optimal temperature ranges from 20 to 30 °C; the reported increase amounted to 1.3 °C above normal so the absolute value will be 15 °C. Even if the increase appears in 2050, it will not be enough to be within the optimal thermal levels. The formation of the fruit, in its milky-dough state, is the phenological stage that requires a greater number of days, between 35 and 45; it occurs between August and September, and its temperature requirements range from 20 to 30 °C. Even if there were increases and temperatures of between 15 and 14.7 °C would be projected in these months, these would not fall within the recommended levels.

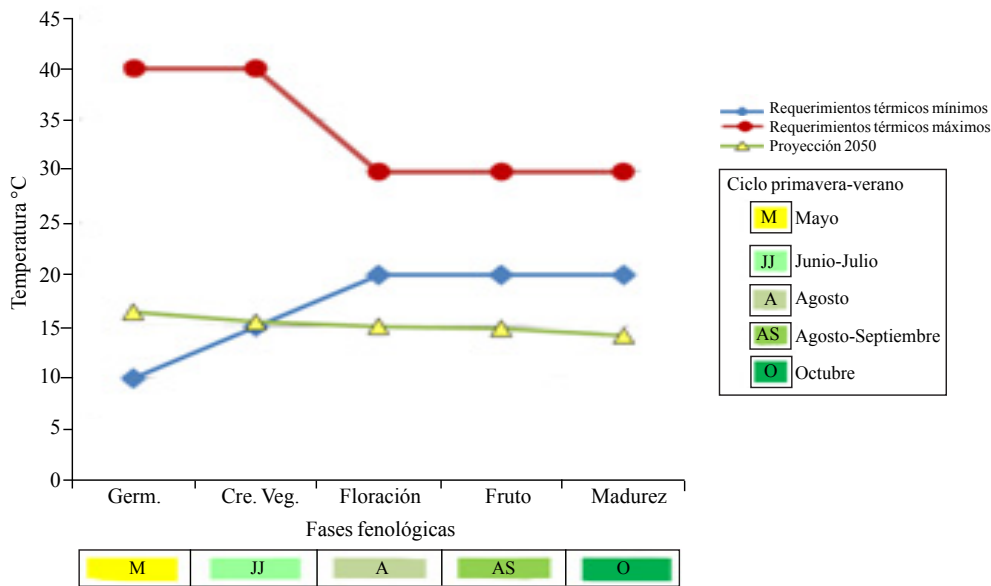


Figura 2. Requerimientos térmicos óptimos versus proyección de la temperatura en las diferentes fases de crecimiento del maíz, modelo Hadley (escenario A2), horizonte 2050.

Figure 2. Optimal thermal requirements versus temperature projection for the different stages of corn growth, Hadley model (A2 scenario), horizon 2050.

Las condiciones de humedad en este escenario muestran que en 2050 existirá aumento de precipitación fundamentalmente en verano que representó 93% respecto a la total. El diagrama ombrotérmico para este escenario (Figura 3) muestra que entre abril y mayo se presenta el polígono de condición húmeda, mismo que es propicio para la siembra y proliferación de la germinación del maíz. Igualmente se escenifica humedad suficiente para el crecimiento vegetativo de este cereal, posteriormente se representan cuatro meses catalogados como superávit, dentro de éstos en la fase de floración (julio) se muestra una reducción de la precipitación (sequía) <10%.

Modelo Hadley, escenario B2 horizonte 2050

En cuanto a la temperatura media en el escenario B2 se escenifica un aumento de 1.4 °C, los mayores incrementos de temperatura se presentarían durante el invierno. Los valores para el ciclo agrícola primavera-verano, son muy similares a los resultados obtenidos en el escenario A2, con tan sólo una diferencia <0.5 °C. Por otro lado se escenifica un aumento de la temperatura mínima desde la primavera hasta el verano de 2.2 °C, en cuanto a la máxima se estimó un ascenso de 2.3 °C. El incremento proyectado por fases muestra que las temperaturas se ubicarán cercanas a los parámetros térmicos recomendados.

The phenological stage of maturity in the RDD-Toluca has occurred generally in October; its temperature needs should be between 20 to 30 °C; however, even when a temperature increase of 1.5 °C is projected by 2050, the temperature will still not be close to the optimal levels reported (Figure 2).

Minimum temperatures are expected to increase by 2.5 °C, while maximum temperatures are expected to increase 2 °C; neither value will reach the optimal levels required, but they will have a positive effect, as, on the one hand, they will keep away frosts, and the other they will benefit the development of the phenological stages of corn.

Moisture conditions at this stage show that in 2050 there will be a precipitation increase, mainly in summer, representing 93% of the total. The ombrothermic diagram for this scenario (Figure 3) shows that the wet condition polygon appears between April and May, indicating suitable conditions for planting and corn germination. Enough moisture for the vegetative growth of this cereal is also projected; then four months classified as surplus, within which, at the flowering stage (July), there is a precipitation reduction (drought) <10%.

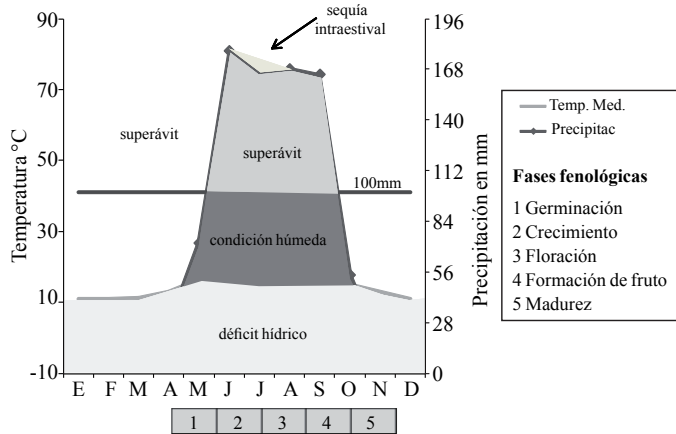


Figura 3. Escenario A2. Diagrama ombrotérmico, se señalan las distintas condiciones de humedad y las etapas fenológicas del maíz.

Figure 3. A2 scenario. Ombrothermic diagram; the different humidity conditions and phenological stages of corn are indicated.

Los niveles pluviométricos simulados para el ciclo agrícola primavera-verano serán de 907.3 mm, lo que representaría un aumento de 114 mm con respecto al escenario base. Sin embargo, al analizar la distribución por fases y niveles de humedad, mediante el diagrama ombrotérmico (Figura 4) se muestra la presencia de cuatro meses de superávit de humedad, correspondiente a precipitaciones mayores a 100 mm. Dentro de éste se ejemplifica reducción de precipitación en la floración y un aumento en el estadio de formación de grano.

Discusión

Investigaciones realizadas a nivel nacional de esta temática concluyen que una gran extensión del territorio mexicano se está calentando, siendo mayor en el noreste de México; sin embargo, pequeñas porciones del territorio nacional ligeramente se están enfriando (Gay *et al.*, 2010). En los estudios realizados de impactos en la agricultura por el cambio climático Conde *et al.* (1997); Flores *et al.* (2000) han sugerido que existe mayor vulnerabilidad en la agricultura de maíz de temporal, decrementos en las superficies aptas y reducciones en rendimientos. En tanto Monterroso *et al.* (2011) al comparar diversos modelos sugiere que a nivel nacional se simula que la temperatura y la precipitación aumentará en su mayor parte del año, por tanto aumentan los niveles de evapotranspiración potencial; mientras que los resultados obtenidos con Hadley, indicaron que la temperatura aumentará en todo el país, mientras que

Hadley model, B2 scenario, horizon 2050

Average temperature in the B2 scenario is projected to increase 1.4 °C; the largest temperature increases would take place during the winter. The values for the spring-summer crop season are very similar to the results obtained in the A2 scenario, with a difference of only <0.5 °C. On the other hand, an increase of 2.2 °C in minimum temperature is projected from the spring to the summer; the maximum temperature is projected to increase 2.3 °C. The increase projected per stages shows that temperatures will be close to the recommended thermal parameters.

Simulated rainfall levels for the spring-summer crop season will reach 907.3 mm, representing an increase of 114 mm with respect to the baseline scenario. However, when analyzing the distribution per stages and moisture levels using the ombrothermic diagram (Figure 4), there are four months with surplus moisture, corresponding to more than 100 mm rainfall. Within these four months there is a precipitation decrease at the flowering stage and an increase at the seed formation stage.

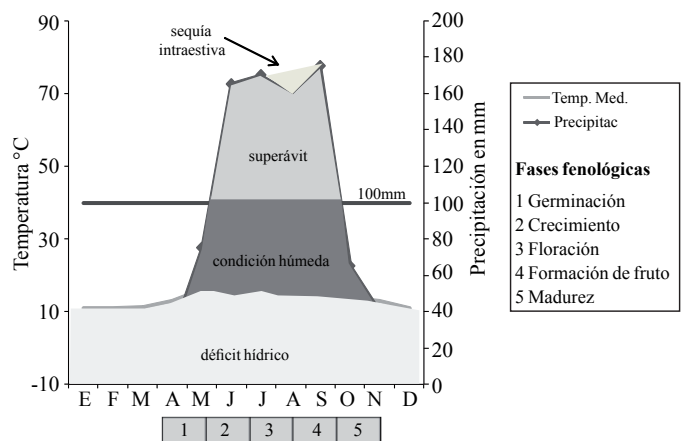


Figura 4. Escenario B2. Diagrama ombrotérmico, se señalan las distintas condiciones de humedad y las etapas fenológicas del maíz.

Figure 4. B2 scenario, ombrothermic diagram; the different humidity conditions and phenological stages of corn are indicated.

Discussion

Research conducted nationwide on this subject concluded that a large area of Mexico is warming up, mostly northeastern Mexico; however, small parts of the country

la precipitación aumentará también en algunos lugares y disminuirá considerablemente en otros; el aumento de temperatura también será responsable de los niveles mayores de evapotranspiración.

Son relevantes las contribuciones realizadas en torno al cambio climático a nivel nacional e igualmente importante es realizar estudios más concretos, ya que las adaptaciones sugeridas por los impactos futuros, no son aplicables a escala nacional y a nivel generalizado de cultivos.

Particularmente el modelo Hadley tanto los escenarios A2 y B2 aplicado para este estudio, mostraron que los incrementos simulados en temperatura serán beneficiosos para el cultivo; concretamente al aumentar las temperaturas mínimas en verano alejaría del peligro de las heladas a la zona; mismas que siniestran frecuentemente los cultivos de temporal en este distrito y en general el centro del país.

Por otro lado, el aumento de precipitación que se proyecta serán mínima, por tanto, el aumento en los niveles de evapotranspiración serán minúsculos, no se presentaron fuertes cambios en los polígonos de condición húmeda y superávit; en caso de las reducciones proyectadas en la fase de floración en ambos escenarios puede afectar la producción, pero mediante el buen manejo del cultivo en la fase susceptibles, pueden reducir los daños y posibles impactos en los rendimientos. Igualmente el aumento de precipitación, en el estado de formación de grano que se escenifican en el escenario B2, puede causar bajas en la producción, mismo que puede atenuarse mediante la aplicación oportuna de prácticas agrícolas.

El análisis realizado en primer lugar evidencio que en las condiciones normales de temperatura y precipitación, la zona está lejos de ser catalogada como muy apta (MA) para el cultivo del maíz, se le ubicó como marginalmente apta mA, principalmente por las condiciones templadas que prevalecen en la zona. Por otro lado, los aumentos escenificados en la temperatura tenderán a mejorar las condiciones térmicas.

Conclusiones

Los ciclos biológicos de los organismos están íntimamente relacionados con las condiciones ambientales en que se desarrollan, por tanto, es evidente que pueden verse afectados por el cambio de temperatura y precipitación futuras.

are cooling slightly (Gay *et al.*, 2010). In studies about the effect of climate change on agriculture, Conde *et al.* (1997), and Flores *et al.* (2000) have suggested that dryland corn production is one of the more vulnerable, as there will be a decreases of suitable areas and yields. Meanwhile, Monterroso *et al.* (2011), comparing different models, suggest that nationwide temperatures and precipitations are projected to increase most of the year, thus increasing potential evapotranspiration levels; whereas the results obtained with Hadley indicated that temperature will increase nationwide, but precipitation will increase in some places and decrease considerably in others; the temperature increase will also be responsible for higher levels of evapotranspiration.

The contributions around nationwide climate change are very relevant, and it is equally important to do more concrete studies on the subject, as the adaptations suggested by future impacts are not applicable at the national level and for every crop.

In this study, scenarios A2 and B2 of the Hadley model showed that simulated temperature increases will be beneficial to cultivation; specifically, the increase in minimum temperatures in summer will keep away the danger of frosts from the area, which frequently devastate dryland crops in this district and in the center of the country overall.

Furthermore, the projected increase of precipitations will be minimal; therefore, the increase in evapotranspiration levels will be tiny and no severe changes in the wet condition and surplus polygons were observed. The projected reductions at the flowering stage in both scenarios could affect production, but careful crop management at the susceptible stage could reduce the damage and the possible impact on yields. Also, the precipitation increase at the stage of grain formation projected in the B2 scenario could decrease production, but this could be attenuated through the timely implementation of specific agricultural practices.

The analysis showed first that in normal temperature and precipitation conditions, the area is far from being classified as very suitable (VS) for the cultivation of corn; it was ranked as marginally suitable (ms), mainly due to the temperate conditions prevailing in the area. Furthermore, the projected temperature increases will tend to improve thermal conditions.

Los requerimientos térmicos óptimos del cultivo del maíz, son ligeramente más elevados a los existentes en el DDR-Toluca aún con los aumentos esperados en 2050, en tanto la precipitación ésta dentro de los niveles hídricos sugeridos y presenta una distribución favorable para el buen desarrollo del cultivo.

Las temperatura media, mínima y máxima y precipitación del escenario de emisiones A2 y B2 modelo Hadley año 2050 fueron comparadas con los requerimientos termoplumiométricos del maíz, lo que sugiere que el aumento de la temperatura esperado favorecerá en general todas las fases fenológicas de maíz, mientras que la escasez de agua en la fase fenológica de floración, así como excedente agua en el estado lechoso-masoso, podría provocar el desarrollo de plaga y enfermedades que impactarán en la producción.

Es importante conocer las anomalías que presentará la temperatura y precipitación ante el cambio climático: para que los investigadores encargados del mejoramiento genético y obtención de nuevas variedades, consideren que las futuras variedades deben poseer mayores límites de tolerancia y para los productores quienes pueden aplicar algunas medidas de adaptación tales como: mejoras en el manejo del cultivo, cambio de variedades empleadas, conversión y diversificación de cultivos; mismas que coadyuvarán en mejorar sus ingresos.

Literatura citada

- Alvarado, Ma.; Foroughbakhch, R.; Jurado, E. y Rocha, A. 2002. El cambio climático y la fenología de las plantas. *Ciencias UANL*. 3(4):493-500.
- Beaubien, E. G. and Freeland, H. J. 2000. Spring phenology trends in Alberta, Canada: links to ocean temperature. *Int. J. Biometeorol.* 44(2):53-59.
- Boer, G. J.; Mcfarlene, N. and Lazare, M. 1992 Greenhouse gas - Induce climatic change simulated with the CCC second generation GCM. *J. Climate* 5:1045-1077.
- Bradley, N. L.; Leopold, A. C.; Ross, J. and Huffaker, W. 1999. Phenological changes reflect climate change in Wisconsin. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 96:9701-9704.

Conclusions

The biological cycles of the organisms are closely related to the environmental conditions in which they develop, so it is evident that they may be affected by future temperature and precipitation changes.

The optimal thermal requirements of corn are slightly higher than those in the RDD-Toluca, even with the expected increases in 2050, while precipitation is within the suggested hydric levels and presents a distribution favorable to the proper development of the crop.

The medium, minimal and maximal temperatures of the emission scenarios A2 and B2 of the Hadley model for the year 2050 were compared with the pluviothermal requirements of corn, which suggests that the expected increase in temperature will generally favor all phenological stages of corn, while water scarcity at the phenological flowering stage, and excess water at the milky-dough stage, could lead to the development of pests and diseases that will impact production.

It is important to know the temperature and precipitation anomalies that climate change will cause, so that researchers responsible for genetic improvement and development of new varieties take into account that future varieties must have higher tolerance limits and producers can implement some adaptative measures such as improved crop management, the use of other varieties, crop conversion and diversification, etc., which will help them improve their income.

End of the English version



- Conde, C.; Liverman, D.; Flores, M.; Ferrer, R.; Araujo, R.; Betancourt, E.; Villareal, G. and Gay, C. 1977. Vulnerability of rainfed maize crops in Mexico to climate change. *Clim. Res.* 9:17-23.
- Conde, C.; Ferrer, R.; Gay, C. y Araujo, R. 2004. Impactos del cambio climático en la agricultura en México. *In: Cambio climático. Una visión desde México.* Martínez, J.; Fernández, A. (eds.). Instituto Nacional de Ecología. D. F., México. 227-238 pp.

- Conde, C.; Vinocur, M.; Gay, C.; Seiles, R. y Estrada, F. 2007. Climatic threat spaces in México and Argentina. *In: Climate change and vulnerability*. Leary, N.; Conde, C.; Kulkarni, J.; Nyong; Pulhin, J. (eds.). Earthscan. Londres, RU. 276-306 pp.
- Conde, C. y Gay, C. 2008. Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. D. F. México. 105 p.
- United Nations Organization for Food and Agriculture (FAO). 2011. ECOCROP 1. The adaptability level of the FAO crop environmental requirements database. Versión 1.0.AGLS. FAO. Rome, Italy. (consultado febrero, 2011). <http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/cropView?id=1382>.
- Flores, M.; Araujo, R. y Betancourt, E. 2000. Vulnerabilidad de las zonas potencialmente aptas para maíz de temporal en México ante el cambio climático. *In: México: una visión hacia el Siglo XXI. El cambio climático en México. Resultados de los estudios de la vulnerabilidad del país*. Gay, C. (ed.). INE-UNAM-US. México, D. F. 103-118 pp.
- García, E.; Hernández, M. E. y Cardoso, M. D. 1983. Las gráficas ombrotérmicas y los regímenes pluviométricos de la República Mexicana. *In: Orellana, L. R. y Vidal, Z. R. (Eds.)* García, E. Antología. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C. Instituto de Geografía, UNAM, México, D. F. 349-358 pp.
- Gay, C.; Estrada, F. y Martínez, B. 2010. Cambio climático y estadística oficial. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*. INEGI. 1(1):1-7.
- Monterroso, A. I.; Conde, C.; Rosales, G.; Gómez, J. D. and Gay, C. 2011 Assessing current and potential rainfed maize suitability under climate change scenarios. *Atmósfera*. 24:53-67.
- Nakicenovic, N.; Alcamo, J.; Davis, G.; De Vries, B.; Fenhann, J.; Gaffin, S.; Gregory, K.; Grübler, A.; Jung, T. Y.; Kram, T.; La Rivere, E. L.; Michaelis, L.; Mori, S.; Morita, T.; Pepper, W.; Pitcher, H.; Price, L.; Riahi, K.; Rogner, H.-H.; Sankovski, A.; Schlesinger, M.; Shukla, P.; Smith, S.; Swart, R.; Van Rooijen, S.; Victor, N. and Dadi, Z. 2000. Special report on emissions scenarios: a special report of working group iii of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge. University Press, Cambridge. U. K. 599 p.
- Peñuelas, J. and Filella, I. 2001. Phenology: responses to a warming world. *Science* 294(5543):793-795.
- Reyes, C. P. 1990. El maíz y su cultivo. Ed. A. G. T. S. A. D. F. México. 470 p.
- Rosenzweig, C.; Casassa, G.; Karoly, D. J.; Imeson, A.; Liu, C.; Menzel, A.; Rawlins, S.; Root, T. L.; Seguin, B. and Tryjanowski, P. 2007. Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. *In: impacts, adaptation and vulnerability. contribution of working group ii to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Parry, M. L.; Canziani, O. F.; Palutikof, J. P.; van der Linden, P. J. and Hanson, C. E. (eds.) Cambridge University Press. Cambridge, UK. 79-131.
- Ruíz, C. J. A.; Ramírez, D. J. L.; Flores, M. G. J. y Sánchez, C. 2000. Cambio climático y su impacto sobre la estación de crecimiento de maíz en Jalisco, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 23:169-182.
- Sánchez, C. I.; Díaz, P. G.; Cavazos, P. M. T.; Granados, R. R. y Gómez, R. E. 2011. Elementos para entender el cambio climático y sus impactos. Grupo Editorial Miguel Ángel Porrúa. D. F., México, 167 p.
- Taiz, L. and Zeiger, E. 2006. *Plant Physiology*. Sinauer Associates. Sunderland, Massachusetts. 764 p.
- Villers, L.; Arizpe, N.; Orellana, R.; Conde, C. y Hernández, J. 2009. Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia* 34(5):322-329.