

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA AGROCLIMATOLOGÍA DEL MAÍZ EN CIÉNEGA DE CHAPALA, JALISCO*

IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON THE MAIZE AGROCLIMATOLOGY IN CIÉNEGA DE CHAPALA, JALISCO

Patricia Zarazúa-Villaseñor¹, José Ariel Ruiz-Corral^{2§}, Diego Raymundo González-Eguiarte¹, Hugo Ernesto Flores-López² y José Ron-Parra³

¹Departamento de Desarrollo Rural Sustentable. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara. Carretera Guadalajara-Nogales, km 15.5. ²Región Pacífico-Centro. INIFAP. Parque Los Colomos, II Sección, Zapopan, Jalisco. ³Departamento Producción Agrícola. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara. [§]Autor para correspondencia: ruiz.ariel@inifap.gob.mx.

RESUMEN

Los objetivos de este estudio fueron estimar los escenarios climáticos futuros para el ciclo primavera-verano en la región Ciénega de Chapala en Jalisco, México; estimar el impacto de los escenarios sobre los parámetros agroclimáticos y fenológicos del cultivo de maíz; y los escenarios climáticos sobre los requerimientos hídricos del cultivo de maíz en la zona de estudio. Se dispuso de bases de datos climáticos serie 1977-2006 de las estaciones de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), y la base de datos de anomalías de temperatura media y precipitación para el periodo 2007-2099, en el escenario de emisión de gases efecto invernadero A2. Mediante el uso de modelos trigonométricos se estimaron los valores futuros de temperaturas máximas, mínimas, y oscilación térmica. Se realizó un ajuste del modelo Hargreaves, al modelo del tanque evaporímetro para la estimación de evapotranspiración. Para estimar las variables fenológicas, se consideraron los requerimientos térmicos promedio de algunas variedades comerciales y se utilizaron modelos Gompertz, para estimar días con temperatura fuera de los umbrales del cultivo de maíz. A finales del siglo XXI se tendrá un incremento de 6.5 °C en temperaturas máximas, 3.6 °C en temperaturas medias y de

ABSTRACT

The objectives of this study were to estimate future climatic scenarios for the Spring-Summer cycle in the Ciénega de Chapala region in Jalisco, Mexico; estimate the impact of the scenarios on agro-climatic and phenological parameters of the maize crop; and climatic scenarios on water requirements of maize in the studied area. Databases series were available of 1977-2006 series from the stations of the National Water Commission (CONAGUA) and the database of average temperature anomalies and, the precipitation for the period 2007-2099, in the A2 greenhouse gases emission scenario. Using trigonometric models, the future values of maximum and minimum temperatures and thermal oscillation were estimated. An adjustment of the Hargreaves model was performed to the pan evaporation model in order to estimate the evapotranspiration. For the estimation of the phenological variables, the average thermal requirements of some commercial varieties were considered and, Gompertz models were used to estimate the days with temperatures beyond the threshold of the maize crop. In the late XXI century there will be an increase of 6.5 °C of maximum temperatures,

* Recibido: diciembre de 2010
Aceptado: julio de 2011

0.09 °C en temperaturas mínimas, con respecto a los valores actuales. La oscilación térmica presentará un incremento en sus valores con una pendiente ligera, indicando que en el futuro se tendrán condiciones térmicas más extremas que las actuales. La estación de crecimiento en el periodo húmedo experimentará un acortamiento y las unidades calor requeridas por el cultivo de maíz serán cubiertas más rápidamente, las temperaturas diurnas y nocturnas se verán incrementadas, que impactará los procesos de fotosíntesis y de respiración en dicha especie agrícola; se espera un incremento del número de días con temperaturas mayores al umbral de este cultivo, provocando que las plantas experimenten mayores lapsos de tiempo bajo estrés térmico; debido al acortamiento en la duración del ciclo de cultivo se tendrá una disminución en la demanda hídrica de las plantas.

Palabras clave: *Zea Mays* L., cambio climático, parámetros agroclimáticos, tecnología de producción.

INTRODUCCIÓN

En el documento “México, cuarta comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático” (INE, 2009); se establece que en el país para el periodo 2010-2030, la temperatura media anual puede variar de 0.5 ± 0.5 °C a 1.3 ± 0.8 °C, del 2040 a 2060 de 1.3 ± 0.3 °C a 2.3 ± 1 °C y de 2070 a 2090 de 2.5 ± 0.3 °C a 3.5 ± 1.3 °C y la precipitación anual podría disminuir 11%. El Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2007-2012 (Calderón, 2007), indica en las estrategias 11.2 y 11.3, la necesidad de desarrollar escenarios climáticos a nivel regional, así como evaluar sus impactos en sistemas ecológicos, definiendo vulnerabilidad y medidas de adaptación adecuadas.

En el tercer informe de ejecución 2009 del PND 2007-2012 (Gobierno Federal, 2010), se informa sobre los inicios del estudio de “evaluación de la vulnerabilidad y propuestas de adaptación a nivel regional de algunos cultivos básicos y frutales ante escenarios de cambio climático”, que ha obligado a instituciones responsables de investigación científica a desarrollar proyectos regionales, con la finalidad de cubrir los objetivos planteados al respecto en este plan. La mayoría de las iniciativas en México para hacer frente al cambio climático global, están relacionadas con el desarrollo de estrategias enfocadas a la selección de medidas de adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático (INE, 2009).

3.6 °C of mean temperatures and, 0.09 °C of minimum temperatures, with respect to the current values. The thermal oscillation will have an increase in its values with a slight slope, indicating that, in the future there will be more extreme thermal conditions than today. The growing season in the wet period will experience a shortening and, the heat units required for the maize crop will be covered faster; day and nighttime temperatures will be increased as well, impacting the processes of photosynthesis and respiration in this species; an increase of the number of days with temperatures above the crop threshold is expected, causing the plants to experience greater periods of time under heat stress; due to the shortening of the crop cycle, the plants' water demand will also decrease.

Key words: *Zea Mays* L., agro-climatic parameters, climate change, production technology.

INTRODUCTION

In the paper “Mexico, fourth national communication to the united nations framework convention on climate change” (INE, 2009); it's established that, in the country, for the period 2010-2030 the mean annual temperature varies from 0.5 ± 0.5 °C to 1.3 ± 0.8 °C, from 2040 to 2060 from 1.3 ± 0.3 °C to 2.3 ± 1 °C and from 2070 to 2090 from 2.5 ± 0.3 °C to 3.5 ± 1.3 °C and annual rainfall could decline 11%. The National Development Plan (PND) 2007-2012 (Calderón, 2007), indicates in 11.2 and 11.3 strategies, the need to develop regional climate scenarios and to evaluate their impacts on ecological systems, defining vulnerability and appropriate adaptation measures.

The third implementation report 2009 of the PND 2007-2012 (Federal Government, 2010), reports the beginning of the study of “vulnerability assessment and proposals for regional adaptation of some staple crops and fruit trees facing climate change scenarios”, which has forced the institutions responsible for the scientific research to develop regional projects in order to meet the objectives set in this plan. Most of the efforts in Mexico to face the global climate change are related to the development of strategies focused on the selection of adaptation measures and mitigation of climate change effects (INE, 2009).

Con base a lo anterior, aún queda mucho por investigar con relación al carácter regional y estacional del cambio climático en México, sobre todo para cuantificar los tipos y niveles de modificación climática, que han estado experimentando las diferentes regiones agropecuarias del país.

El maíz es una planta de tipo fotosintético C4, que se desarrolla en una amplia gama de condiciones ambientales. De la siembra a la madurez requiere de 500 a 800 mm de agua, dependiendo de la variedad y del clima. Son periodos críticos por necesidad de agua, la germinación, primeras tres semanas de desarrollo y el periodo comprendido entre 15 días antes hasta 30 días después de la floración. Se ha encontrado que si hay un estrés por falta de agua, el rendimiento final disminuye de 6 a 13% por día en el periodo alrededor de la floración y de 3 a 4% por día en los otros periodos.

La temperatura óptima para la germinación está entre 18 y 21 °C, no se presenta germinación por debajo de 10 °C. La temperatura umbral máxima se encuentra entre 27 y 30 °C. La temperatura media óptima se encuentra entre 18 y 24 °C (Ruiz *et al.*, 1999). Algunos efectos del incremento de temperatura en el cultivo de maíz son mencionados por Ramos *et al.* (2009), quienes entre sus resultados consignan una disminución de la duración del aparato fotosintético, esto a causa de la inactivación de la Rubisco, enzima cuyo estado de activación empieza a decrecer a temperaturas arriba de 32.5 °C y casi se inactiva completamente a 45 °C (Crafts-Brandner y Salvucci, 2002); así como pérdida de viabilidad en polen y estigmas.

De acuerdo con Azcón-Bieto y Talón (2008), dentro de los procesos fisiológicos que se ven afectados en condiciones de estrés hídrico en el maíz, se tiene una disminución del crecimiento celular, disminución en la síntesis de proteínas, acumulación del ácido abscísico (ABA), cierre estomático, disminución en la asimilación de CO₂, disminución de la respiración y acumulación de azúcares, entre otros.

Los objetivos del presente trabajo fueron: a) estimar los escenarios climáticos futuros para el ciclo primavera-verano en la región de estudio; b) estimar el impacto de dichos escenarios sobre los parámetros agroclimáticos y fenológicos del cultivo de maíz: temperatura diurna, temperatura nocturna, número de días con temperatura mínima menor a 10 °C, número de días con temperatura máxima mayor a 35 °C, días siembra-floración y días floración-madurez fisiológica; y c) estimar el impacto de los escenarios climáticos sobre los requerimientos hídricos del cultivo de maíz.

Based on this, much remains to be investigated in relation to the regional and seasonal nature of climate change in Mexico, especially to quantify the types and levels of climate change that have been experienced in the different agricultural regions in the country.

The maize is a C4 photosynthetic plant type, which develops in a wide range of environmental conditions. From planting to maturity, it requires 500 to 800 mm of water depending on the variety and climate. The critical periods of water requirements are: germination, the first three weeks of development and the period from 15 days before until 30 days after flowering. It has been found that, if there is any water stress at all, the final yield decreases from 6 to 13% per day in the period around flowering and, 3 to 4% per day in other periods.

The optimum temperature for germination is between 18 and 21 °C, germination does not occur below 10 °C. The maximum threshold temperature is between 27 and 30 °C. The optimal mean temperature is between 18 and 24 °C (Ruiz *et al.*, 1999). Some effects of temperature increase in maize cultivation are mentioned by Ramos *et al.* (2009), who among their results recorded a reduction in the photosynthetic apparatus duration, this is due to the inactivation of Rubisco, an enzyme whose activation state begins to decrease at temperatures above 32.5 °C and is almost inactive at 45 °C (Crafts-Brandner and Salvucci, 2002); as well as loss of pollen viability and stigma.

According to Azcón-Bieto and Talón (2008), within the physiological processes that are affected under water stress in maize, there is a decrease of cell growth, a decrease in protein synthesis, accumulation of abscisic acid (ABA), stomatal closure, decreased CO₂ assimilation, decreased respiration and, accumulation of sugars, among others.

The objectives of this paper were: a) estimating the future climate scenarios for the Spring-Summer cycle in the studied region; b) estimating the impact of these scenarios on agro-climatic and phenological parameters of maize cultivation: day temperature, nighttime temperature, number of days with minimum temperature below 10 °C, number of days with maximum temperature above 35 °C, planting-flowering days and, flowering-physiological maturity days; and c) to estimate the impact of climate scenarios on water requirements of maize crop.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La Región Ciénega de Chapala, con una superficie de 4 825 km², se localiza en el centro-este del estado de Jalisco, México; entre los 20° 02' y 20° 41' de latitud norte, 101° 59' y 103° 32' de longitud oeste, alrededor del Lago de Chapala, el lago natural más grande de México. Esta región está formada por los municipios de Atotonilco el Alto, Ayotlán, Degollado, La Barca, Chapala, Jamay, Jocotepec, Ocotlán, Poncitlán, Tizapán el Alto, Tototlán, Tuxcueca y Zapotlán del Rey.

En esta región se presentan dos tipos climáticos y sus subtipos de acuerdo a la clasificación Köppen-García (García, 2004), que son el clima semicálido subhúmedo (A) Ca(w₁)w(e)g y el clima templado subhúmedo Ca(w₀)w(e)g, cubriendo una superficie 80% y 20% respectivamente. En la Región Ciénega se presentan los siguientes tipos de suelos de acuerdo con la clasificación de FAO: Luvisol férreo, Vertisol pélico, Vertisol crómico, Feozem háplico y Litosol (Ruiz *et al.*, 2003). La actividad agrícola se realiza principalmente en tierras de temporal, en función de la disponibilidad de agua, tipo de suelo y pendiente topográfica menor a 8%; pero la agricultura de riego ocupa una superficie considerable en la región.

Información climatológica y modelación climática

Se dispuso de información climatológica de 10 estaciones climáticas de la Comisión Nacional del Agua (CNA) ubicadas dentro de la zona de estudio y las cuales abarcan información desde el año 1961. Se realizó un análisis climático y agroclimático retrospectivo para el período 1977-2006, para contar con un punto de comparación entre el presente y los escenarios futuros. Para la estimación de los escenarios climáticos futuros, se utilizó la base de datos de los valores de anomalías de temperatura media y precipitación acumulada mensuales, generada por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Magaña y Caetano, 2007), mediante un modelo ensamble y con base en el escenario de emisión de gases de efecto invernadero A2 (IPCC, 2007).

En la determinación de los escenarios climáticos futuros, se realizaron estimaciones de temperatura mínima y máxima mensuales mediante el modelo trigonométrico Bowerman *et al.* (2007), al que se le incluyó el parámetro de temperatura

MATERIALS AND METHODS

Study area

The Ciénega de Chapala region covers an area of 4 825 km², it's located in the central-east of Jalisco State, Mexico, between 20° 02' and, 20° 41' north latitude, 101° 59' and 103° 32' west longitude, surrounding the Chapala Lake, the largest natural lake in Mexico. This region comprises the municipalities of Atotonilco el Alto, Ayotlán, Degollado, La Barca, Chapala, Jamay, Jocotepec, Ocotlán, Poncitlán, Tizapán el Alto, Tototlán, Tuxcueca and Zapotlán del Rey.

This region presents two climate types and, its subtypes according to the Köppen-García classification (García, 2004), which are semi-warm subhumid climate (A)Ca(w₁)w(e)g and temperate subhumid climate Ca(w₀)w(e)g, covering an area 80% and 20%, respectively. In the Ciénega region exists the following types of soils according to FAO classification: Ferric luvisol, Vertisol pelican, Chromic vertisol, Haplic feozem and Litosol (Ruiz *et al.*, 2003). Agricultural activity is mainly in rainfed, depending on water availability, soil type and topographic slope lower than 8%; irrigated agriculture occupies a considerable area in the region.

Climate information and weather modeling

The weather data were available from 10 weather stations of the National Water Commission (CONAGUA) located within the study area, which include data since 1961. A climate and agro-climatic retrospective analysis was performed for the 1977-2006 period, in order to have a comparison point between the present and future scenarios. For estimating future climate scenarios, the database of the monthly anomalies values of mean temperature and accumulated rainfall were used, generated by the Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Magaña and Caetano, 2007), using an assembly model and based on A2 greenhouse gas emission scenario (IPCC, 2007).

For determining future climatic scenarios, the estimates of monthly minimum and maximum temperature were made, using the trigonometric model by Bowerman *et al.* (2007), including the monthly mean temperature parameter, which is considered in the anomalies database

media mensual, que es considerado en la base de datos de anomalías del modelo ensamble utilizado. Se elaboraron los escenarios futuros mensuales de estos parámetros a nivel regional para algunos años seleccionados, así como la estimación de la oscilación térmica.

Información de genotipos de maíz

Para evaluar el impacto de cambios climáticos sobre el cultivo de maíz (*Zea mays* L.), se tomó información de variedades comerciales utilizadas en la zona, como son Pantera (ASGROW), DK-2002 (DEKALB), 3028W (PIONEER), Z-21 (HARTZ SEED), de las cuales se promediaron los parámetros días a floración y días a madurez fisiológica de datos obtenidos en trabajos experimentales (Solano, 2006), y se calcularon las unidades calor requeridas para estas etapas, mediante el método de grados-día de desarrollo efectivos UC_{Base10} , resultando valores de 812 y 1 582, respectivamente. Estas variedades producen en promedio 10 500 kg ha⁻¹ de grano.

Evaluación del impacto del cambio climático sobre el cultivo de maíz

Para estimar el impacto del cambio climático sobre el desarrollo del cultivo de maíz, se determinó el comportamiento de inicio, fin y duración de la estación de crecimiento (EC), considerando para ello el período húmedo y siguiendo la metodología descrita por Allen *et al.* (2006), considerando como inicio de la EC cuando la precipitación es mayor al 0.5 de la evapotranspiración potencial (ETP), y fin de la EC cuando la precipitación es menor al 0.33 de ETP, de acuerdo con lo indicado por FAO (1997).

Se determinaron las variables fenológicas número de días siembra-floración y el número de días floración-madurez fisiológica, simulando la siembra al inicio de la estación de crecimiento de acuerdo al comportamiento estimado en los escenarios climáticos obtenidos y considerando el requerimiento de 812 y 1 582 UC_{Base10} para estas etapas fenológicas, así como las unidades calor efectivas en el ciclo primavera-verano.

Las variables agroclimáticas número de días con temperatura mínima menor a 10 °C y número de días con temperatura máxima mayor a 35 °C se determinaron mediante modelos Gompertz (Wheldon, 1988), ajustados previamente con valores observados obtenidos, sumando el número de días del ciclo agrícola en que se presentan estas condiciones; y

of the used assembly model. Future monthly scenarios of these parameters were developed at regional level for some selected years, as well as the estimation of thermal oscillation.

Information of maize genotypes

For evaluating the impact of climate change on maize crops (*Zea mays* L.), information of commercial varieties used in the area was used, such as Pantera (ASGROW), DK-2002 (DEKALB), 3028W (PIONEER), Z-21 (HARTZ SEED), of which were averaged the parameters: days to flowering and days to physiological maturity from data obtained in experimental researches (Solano, 2006), and heat units required for these stages were calculated by the method of effective development degree-days UC_{Base10} , resulting values of 812 and 1 582 respectively. These varieties produce an average of 10 500 kg ha⁻¹ of grains.

Assessing the impact of climate change on maize crops

To estimate the impact of climate change on the maize crop development, the beginning and end behavior and length of growing season (GS) were determined, considering the wet period and using the methodology described by Allen *et al.* (2006), taking as the GS, the beginning when the rainfall is higher than 0.5 of the potential evapotranspiration (ETP) and, GS end when the rainfall is lower than 0.33 of ETP according to reports of the FAO (1997).

Phenological variables: number of days planting-flowering and number of days flowering-physiological maturity were determined by simulating planting at the beginning of the growing season according to the estimated behavior in the climate scenarios obtained and, considering the requirement of 812 and 1 582 UC_{Base10} for these phenological stages as well as the effective heat units in the Spring-Summer cycle.

The agro-climatic variables number of days with minimum temperature below 10 °C and number of days with maximum temperature above 35 °C were determined using Gompertz models (Wheldon, 1988), previously adjusted with obtained observed values by summing the number of agricultural cycle days in which these criteria are met. The agro-climatic variables of annual mean diurnal temperature and, annual mean night temperature were obtained by using the method described by Ruiz *et al.* (2002).

las variables agroclimáticas de temperatura diurna media anual y temperatura nocturna media anual fueron obtenidas con el método descrito por Ruiz *et al.* (2002).

Para la tendencia de los requerimientos hídricos se consideró un ciclo de madurez de 148 días promedio, de acuerdo con las variedades que se siembran en la región. Se utilizó la metodología del balance hídrico simplificado descrita en Martelo (1997); Ereño (2009). Se tomaron como evapotranspiración de referencia (ET_o) los valores de ETP calculados con el método Hargreaves (Allen *et al.*, 2006) ajustados al método del tanque evaporímetro con un modelo de regresión. Como valores de evapotranspiración de cultivo (ET_c) para maíz, se tomaron los factores de K_c de las cuatro etapas fisiológicas descritas por FAO (Brouwer y Heibloem, 1986).

Las etapas de maíz y sus coeficientes de cultivo son: etapa inicial (siembra hasta 10% de emergencia), 0.4; etapa de desarrollo (10% de emergencia hasta inicio de floración), 0.8; etapa intermedia (floración hasta formación del grano), 1.15; y, etapa final (formación de grano hasta madurez fisiológica), 0.7. El valor de capacidad de almacenamiento de humedad del suelo se obtuvo con las imágenes generadas en el sistema IDRISI (Eastman, 2006), a partir del diagnóstico del recurso suelo en la zona de estudio mediante un muestreo del suelo intensivo con el que se determinó capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente y una profundidad de 60 cm, como profundidad promedio para el desarrollo radical del maíz. Se realizaron las estimaciones futuras anualmente desde el año 2007 hasta 2099, presentándose como muestra sólo algunos años seleccionados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la estimación de los escenarios futuros de temperatura mínima mensual y temperatura máxima mensual, el modelo trigonométrico propuesto ajustó bien, resultando con una R² de 95% para ambos parámetros. Las tendencias mostradas por los parámetros climáticos, indican incrementos considerables para la temperatura máxima y temperatura media, no así la temperatura mínima como se observa en la Figura 1. A finales del siglo XXI se tendrá un incremento de 6.5 °C en temperaturas máximas, 3.6 °C en temperaturas medias y de 0.09 °C en temperaturas mínimas, con respecto a los valores actuales, coincidiendo con lo reportado por el IPCC (IPCC, 2007).

For the tendency of the water requirements, it was considered an average maturity cycle of 148 days, according to the varieties grown in that region. The simplified water balance method described by Martelo (1997) was used; Ereño (2009). As for the reference evapotranspiration (ET_o) were taken the ETP values calculated with the Hargreaves method (Allen *et al.*, 2006) adjusted to pan evaporation method with a regression model. For the crop evapotranspiration values (ET_c) for maize, were taken K_c factor of four physiological stages described by FAO (Brouwer y Heibloem, 1986).

The maize stages and its crop coefficients are: initial stage (sowing to 10% emergence), 0.4; development stage (10% of emergency until the flowering beginning), 0.8; intermediate stage (flowering to grain formation), 1.15; and final stage (grain formation until physiological maturity), 0.7. The value of storage capacity of soil moisture was obtained with the images generated in the IDRISI system (Eastman, 2006), from the diagnosis of soil resources in the study area through an intensive soil sampling which identified: field capacity, wilting point, bulk density and a depth of 60 cm as average depth for root development of maize. Future estimates were made annually from 2007 to 2099, presenting as a sample, only a few selected years.

RESULTS AND DISCUSSION

For the estimating future scenarios of the monthly minimum temperature and maximum monthly temperature, the trigonometric model proposed fit correctly, resulting in an R² of 95% for both parameters. The trends shown by the climatic parameters indicated significant increases in the maximum and mean temperatures, but not for the minimum temperature as shown in Figure 1. In the late XXI century, there will be an increase of 6.5 °C in maximum temperatures, 3.6 °C in average temperatures and 0.09 °C in minimum temperatures, with respect to the current values coinciding with that reported by IPCC (2007).

The accumulative rainfall during the Spring-Summer cycle shows both, increases and decreases, but with a decreasing average trend, decreasing in 10% at the end of the century, the values estimated by the ensemble model do not consider the effects of El Niño-Southern Oscillation, as the weather has a non-linear character according to Magaña and Caetano (2007); however, Mexico is significantly affected by this event as recorded by Magaña *et al.* (2004); Méndez *et al.* (2007),

La precipitación acumulada durante el ciclo primavera-verano, muestra tanto incrementos como decrementos, pero con una tendencia promedio a la disminución, llegando a fines del siglo a disminuir 10%, estos valores estimados por el modelo ensamble no consideran los efectos del fenómeno El Niño- Oscilación del Sur, ya que el clima tiene un carácter no-lineal, de acuerdo con Magaña y Caetano (2007); sin embargo, México es afectado de manera considerable por este evento según lo consignado por Magaña *et al.* (2004); Méndez *et al.* (2007), quienes indican que en años “Niño”, los veranos se ven afectados disminuyendo su precipitación. Los escenarios muestran que la oscilación térmica se irá incrementando conforme avance el siglo XXI, lo que indica que en la Región Ciénega de Chapala el clima se volverá más extremo.

En el Cuadro 1, se observan las estimaciones futuras de los parámetros agroclimáticos inicio y fin de la estación de crecimiento y los parámetros fenológicos duración de las etapas siembra-floración y floración-madurez fenológica. El inicio de EC no muestra grandes cambios en el transcurso del siglo, esto indica que la estación de crecimiento se seguirá presentando de manera muy similar a la actual, con un inicio alrededor del 13 de junio; en cambio, el fin de la EC se adelantaría hasta casi dos semanas a fines del siglo, esto significa que la EC puede experimentar un acortamiento.

Cuadro 1. Tendencias esperadas para dos parámetros agroclimáticos y duración de dos etapas fenológicas del maíz en la Región Ciénega de Chapala.

Table 1. Expected trends for two agro-climatic parameters and, the duration of two phenological stages of maize in the Ciénega de Chapala region.

Año	Inicio EC (fecha siembra)	Fin EC	Días siembra-floración	Días floración-madurez fisiológica
1977-2006*	13 junio	15 noviembre	72	77
2010	16 junio	11 noviembre	65	69
2030	14 junio	19 noviembre	63	66
2050	14 junio	12 noviembre	58	63
2070	21 junio	05 noviembre	56	58
2090	18 junio	02 noviembre	51	53

*= valor de la climatología, 1977-2006.

Con relación a los parámetros fenológicos, duración de la etapa siembra-floración y floración-madurez fisiológica, éstos tienden a una reducción significativa. A fines del siglo XXI, la etapa S-F se acortará a 51 días, esto es 21 días de reducción; mientras que la etapa F-M se acortará a 53 días, una reducción de 24 días con respecto a la climatología

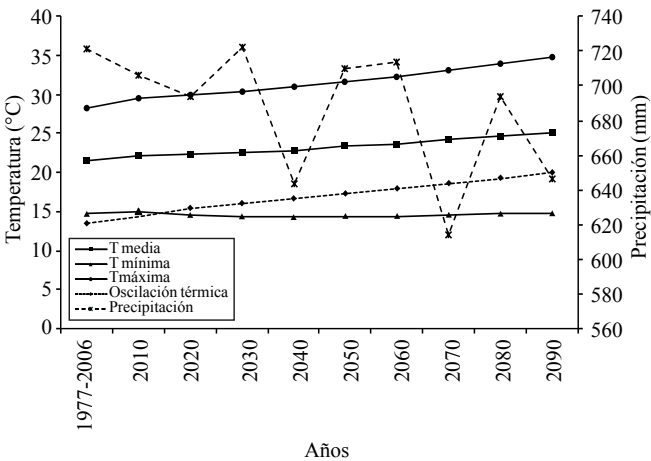


Figura 1. Escenarios futuros de temperatura media, mínima, máxima, oscilación térmica y precipitación acumulada en primavera-verano para la Región Ciénega de Chapala.

Figure 1. Future scenarios of mean, minimum and maximum temperature, thermal oscillation and, accumulated rainfall in the Spring-Summer for the Ciénega de Chapala region.

who suggested that, in “EL Niño” years, the summers are affected by decreased precipitations. The scenarios show that, the thermal oscillation will be increased as the century advances, indicating that, in the Ciénega de Chapala region, the weather will become more extreme.

The Table 1 shows the future estimations of agro-climatic parameters at the beginning and at the end of the growing season and phenological parameters: duration of planting-flowering stage and flowering-phenological maturity. The beginning of GS does not show significant changes over the century, this indicates that the growing season will

actual 1977-2006. Sin embargo, se daría sólo en caso de seguir utilizando los mismos materiales genéticos y que su fisiología y su genética así lo permitieran.

Con respecto a las unidades calor efectivas para el ciclo primavera-verano, en la actualidad para este ciclo se acumulan 2110 UC_{Base10} , mientras que a fines del siglo la acumulación para el mismo ciclo será de 2776 UC_{Base10} , esto es, conforme avanza el siglo XXI éstas se irán acumulando más rápidamente, lo que repercute en la duración de las etapas fenológicas como lo muestra la Figura 2. Se observa un acortamiento generalizado de 30% en la duración de cada una de las etapas, lo que en tiempo corresponde a reducciones de siete, trece, quince y diez días para las etapas: inicial, de desarrollo, intermedia y final, mencionadas por FAO para maíz (Brouwer y Heibloem, 1986).

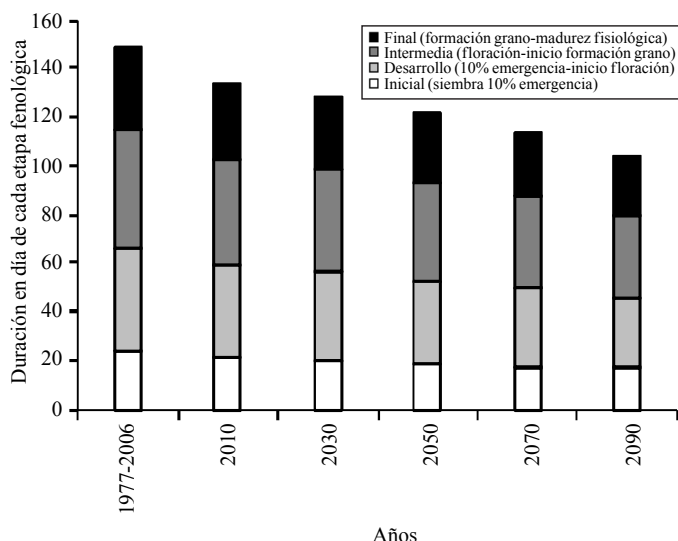


Figura 2. Tendencia de la duración de cuatro etapas fenológicas del maíz por efecto del incremento de temperaturas en la Región Ciénega de Chapala.

Figure 2. Duration trend of four phenological stages of maize as an effect of increased temperatures in the Ciénega de Chapala Region.

El cultivo de maíz presenta como temperaturas óptimas de desarrollo entre 18 y 21 °C, no se presenta germinación por debajo de 10 °C y la temperatura umbral máxima se encuentra entre 27 y 30 °C, aunque la tasa fotosintética disminuye a temperaturas arriba de 32 °C y cesa a temperaturas mayores a 38 °C, siendo afectada la etapa floración-madurez del grano. Con estas consideraciones, las estimaciones del número de días con temperaturas menores a 10 °C y mayores a 35 °C para el periodo 2007-2099, se muestran en el Cuadro 2.

continues very similar to the current GS, starting around June 13th; whereas the end of the GS will happen almost two weeks earlier at the end of the century, this means that the EC may experience a shortening.

Regarding to the phenological parameters, the duration of the planting-flowering stage and flowering-physiological maturity, these tend to a significant reduction. At the end of the XXI century, the S-F stage will be shortened to 51 days; this is 21 days of reduction; while the FM stage will be shortened to 53 days, a reduction of 24 days on current climatology 1977-2006. However, it would happen only if the same genetic material are used and if its physiology and genetic allow it.

Regarding to the effective heat units for the Spring-Summer cycle, today 2110 UC_{Base10} are accumulated for this cycle, while at the end of the century the accumulation for the same cycle will be of 2776 UC_{Base10} , meaning that as XXI century progresses they will accumulate more quickly, which affects the duration of phenological stages as shown in Figure 2. There is a general shortening of 30% in the duration of each stage, which in time corresponds to reductions of seven, thirteen, fifteen and ten days for the stages: initial, development, middle and end, mentioned by FAO for maize (Brouwer and Heibloem, 1986).

The maize crop has an optimal developing temperature between 18 and 21 °C, the germination does not occur below 10 °C and, the maximum threshold temperature is between 27 and 30 °C, although, the photosynthetic rate decreases at temperatures above 32 °C and ceases at temperatures above 38 °C, affecting the grain's flowering-maturity stage. With these considerations, the estimates of the number of days with temperatures below 10 °C and, above 35 °C for the period 2007-2099 are shown in Table 2.

Today, there are a total of 61 days in the cycle with minimum temperatures below 10 °C and only 9 days with maximum temperatures above 35 °C, this means that the current temperature conditions are within the suitable range for maize cultivation, according to the requirements indicated by Ruiz *et al.* (1999). As the XXI century progresses, is expected a considerable decrease of days with minimum temperature below 10 °C, due to the estimated increase in minimum temperatures for the study region.

Regarding to the number of days with the maximum temperature above 35 °C, is noted that, in the early decades of the century there would be a decrease until zero days

Cuadro 2. Número de días con temperatura máxima >35 °C y días con temperatura mínima <10 °C.
Table 2. Number of days with maximum temperature > 35 °C and, days with minimum temperature <10 °C.

Año	Días Ti< 10 ¹	Días Tx> 35 ²
1977-2006*	61	3.5 ±5.2
2020	8	0
2030	8	1
2040	8	1
2050	8	2
2060	8	4
2070	7	7
2080	7	12
2090	7	18

*= valor normal climatología, 1977-2006; ¹= junio, cuando se siembra; ²= agosto, septiembre y octubre, etapa floración-madurez fisiológica.

Se tiene en la actualidad un total de 61 días en el ciclo con temperaturas mínimas inferiores a 10 °C, y sólo 9 días con temperaturas máximas mayores a 35 °C, esto significa que las condiciones térmicas actuales están dentro del rango adecuado para el cultivo de maíz, de acuerdo a los requerimientos indicados por Ruiz *et al.* (1999). A medida que avanza el siglo XXI se espera un decremento considerable de los días con temperatura mínima inferior a 10 °C, debido al incremento estimado en temperaturas mínimas para la región de estudio.

En cuanto al número de días con temperatura máxima mayor a 35 °C, se observa que en las primeras décadas del siglo, se tendría una disminución que llega a ser hasta de cero días con estas condiciones térmicas, pero a partir de 2060 se observa que se presentaría un incremento, que a fines del siglo llegaría a ser de 18 días, en que el cultivo de maíz deberá soportar temperaturas máximas mayores a 35 °C, que aunado a la disminución de la precipitación, provocaría condiciones de estrés y problemas de llenado de grano (Ruiz *et al.*, 1999).

Las temperaturas diurnas y nocturnas mostrarán un incremento, en la cual es posible comparar las tendencias agroclimáticas en series de tiempo actual 1977-2006 con el periodo 2007-2099 (Figura 3). La temperatura nocturna tendrá un incrementos de 2.3 °C a fines del siglo, que repercutiría en la tasa de desarrollo y el número de granos por planta, de acuerdo con Andrade *et al.* (2000), quienes estimaron que los incrementos en las temperaturas nocturnas reducen el número de hileras de granos, debido a la reducción en la duración del período crítico, disminuyendo la

with these thermal conditions, but from 2060 is noted an increase, which in the late century would be of 18 days, when the maize crop will withstand temperatures above 35 °C, which added to the decrease of rainfall, it will cause stressful conditions and, grain filling problems (Ruiz *et al.*, 1999).

Day and nighttime temperatures will show an increase, making it possible to compare agro-climatic trends in 1977-2006 current time series with the 2007-2099 periods (Figure 3). The nighttime temperature will increase in 2.3 °C at the end of the century, which will affect the growth rate and the number of grains per plant, according to Andrade *et al.* (2000), who estimated that, the increases in nighttime temperatures would reduce the number of grain rows, due to the reduction of the critical period duration, decreasing light interception and, the amount of available energy. Furthermore, increases in daytime temperatures will be about 5 °C, which would lead a shortened cycle time by accelerating the crop's development rate.

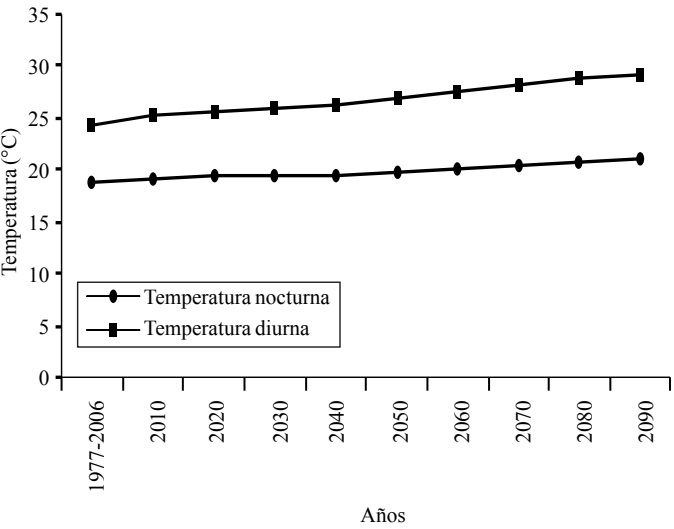


Figura 3. Tendencias de la temperatura diurna y nocturna para la serie climática actual 1977-2006 y del periodo 2007-2099, durante primavera-verano en la Región Ciénega de Chapala.
Figure 3. Trends of day and nighttime temperature for the 1977-2006 current climate series and 2007-2099 period during the Spring-Summer in the Ciénega de Chapala Region.

The current values of reference evapotranspiration from the GS beginning, on June 13th and the 148 days duration of the crop cycle (days of accumulating thermal

intercepción de radiación y la cantidad de energía disponible. Asimismo, los incrementos en las temperaturas diurnas serán casi 5 °C, que propiciaría un acortamiento en la duración del ciclo, al acelerar la tasa de desarrollo del cultivo.

Los valores actuales de evapotranspiración de referencia del inicio de la EC, el 13 de junio y la duración de 148 días del ciclo del cultivo (días que dura en acumular los requerimientos térmicos), muestran que a la fecha en la región de estudio, el maíz requiere en promedio 512 mm de agua para cubrir sus necesidades (Cuadro 3). Conforme avance el siglo XXI, la evapotranspiración de referencia se irá incrementando, pero debido al acortamiento de la duración del ciclo de cultivo, sus requerimientos hídricos (estimados como evapotranspiración del cultivo), van disminuyendo, llegando a fines del siglo a ser de 397 mm. Esto indica que a pesar de los incrementos en la evapotranspiración, la rápida acumulación de unidades calor permitirá un desarrollo más rápido y por lo tanto menor requerimiento hídrico.

requirements), show that so far, in the studied region, the maize requires on average 512 mm of water to meet its needs (Table 3). As the century advances, the reference evapotranspiration will increase, but due to the shortening of the growing season, the water requirements (estimated as crop evapotranspiration) will decrease, until 397 mm at the end of the century. This indicates that, despite the increase in the evapotranspiration, the rapid accumulation of heat units will allow a faster development and therefore, lower water requirements as well.

The Figure 4 shows that now are required 74, 160, 179 and 99 mm of water for the initial development stage, middle and end, respectively; while for the late XXI century, the water requirements will be of 51, 120, 145 and 81 mm for each stage respectively, which means a reduction of 31, 25, 19 and 18% compared to the current water requirements, an average reduction of 22% throughout the crop cycle with respect to the current water requirements. These

Cuadro 3. Tendencia de requerimientos hídricos del maíz por mes (ETc) y su relación con la evapotranspiración de referencia (ETo).

Table 3. Water requirements of maize trend per month (ETc) and its relation to reference evapotranspiration (ETo).

Actividades	1977-2006	2010	2030	2050	2070	2090
Duración ciclo siembra-madurez (días)	148	134	129	121	114	104
Meses	ETo (mm día ⁻¹) y ETc (mm mes ⁻¹)					
Junio	4.3 (54)	4.6 (43)	4.7 (49)	5 (49)	5.2 (28)	5.5 (37)
Julio	3.9 (112)	4.1 (114)	4.2 (119)	4.5 (123)	4.7 (116)	4.9 (122)
Agosto	3.7 (117)	3.9 (120)	4 (123)	4.2 (128)	4.5 (130)	4.7 (132)
Septiembre	3.5 (109)	3.9 (113)	3.9 (113)	4.1 (110)	4.3 (114)	4.6 (106)
Octubre	3.3 (95)	3.5 (85)	3.6 (65)	3.7 (40)	3.9 (40)	
Noviembre	3 (25)					
Requerimiento hídrico total (mm ciclo ⁻¹)	512	475	469	450	428	397

En la Figura 4 se observa que en la actualidad se requieren 74, 160, 179 y 99 mm de agua para la etapa inicial de desarrollo, intermedia y final, respectivamente; mientras que a finales del siglo XXI los requerimientos hídricos serían de 51, 120, 145 y 81 mm para cada etapa respectivamente, que se traduce en una reducción del 31, 25, 19 y 18% con respecto a los requerimientos hídricos actuales; una reducción promedio de 22% en todo el ciclo del cultivo con respecto a los requerimientos hídricos actuales. Estos resultados son similares a los obtenidos por Ojeda *et al.* (2011), quienes estimaron que el incremento de temperaturas provocará un acortamiento en las etapas fenológicas del maíz, lo que

results are similar to those obtained by Ojeda *et al.* (2011), who estimated that, the temperature increase will cause a shortening of the phenological stages of maize, nullifying the effect of Etc increases, reducing water requirements by 16% for the Autumn-Winter cycle planned for the 2071-2098 period in an irrigation district of Sinaloa, Mexico.

Regarding to yield, these conditions do not guarantee an adequate yield; since, according to López *et al.* (2004), the reduction of intermediate and final phenological stages of maize will directly affect the grain filling, this by the

anula el efecto de los incrementos de E_{Tc} disminuyendo los requerimientos hídricos en 16%, para el ciclo otoño-invierno previsto para el periodo 2071-2098 en un distrito de riego de Sinaloa, México.

En relación al rendimiento, estas condiciones no aseguran que se logre alcanzar un rendimiento adecuado ya que de acuerdo con lo indicado por López *et al.* (2004), la reducción de las etapas fenológicas intermedia y final del maíz afectará de manera directa el llenado del grano, al verse afectada la cantidad de radiación recibida por las plantas. Asimismo, un rápido desarrollo vegetativo incrementará la necesidad de nutrimentos, de acuerdo con lo mencionado por varios investigadores citados por López *et al.* (2004), lo que conlleva a un incremento y mantenimiento de un alto nivel de fertilidad de los suelos.

CONCLUSIONES

Los escenarios futuros de la climatología en el ciclo primavera-verano de la Región Ciénega de Chapala, muestran tendencias al incremento en las variables térmicas, principalmente temperatura máxima, y un ligero decremento en la precipitación. La estimación de los valores futuros de precipitación no contempla los eventos extremos. La oscilación térmica presentará un incremento en sus valores con una pendiente ligera, lo que indica que en el futuro se tendrán condiciones térmicas más extremas que las actuales.

La estación de crecimiento en el periodo húmedo, experimentará un acortamiento y las unidades calor efectivas del maíz serán cubiertas más rápidamente, provocando la reducción de las etapas fenológicas del cultivo; las temperaturas diurnas y nocturnas se verán incrementadas como respuesta al aumento de temperaturas medias, que impactará los procesos de fotosíntesis y de respiración en dicha especie agrícola; se espera un incremento en días con temperaturas mayores a la temperatura umbral máxima de este cultivo, provocando que las plantas tengan mayores lapsos de tiempo bajo estrés térmico.

Al presentarse acortamientos en las etapas fenológicas del cultivo, se tendrá una disminución en la demanda hídrica de las plantas, reducción en el período de captación de radiación solar e incremento en los requerimientos nutricionales, por lo que su desarrollo estará restringido a las características del germoplasma.

affection of the radiation amount received by the plants. Also, a rapid vegetative development will increase the need for nutrients according to several researchers mentioned by López *et al.* (2004), which leads to an increase and maintenance a high level of soil fertility.

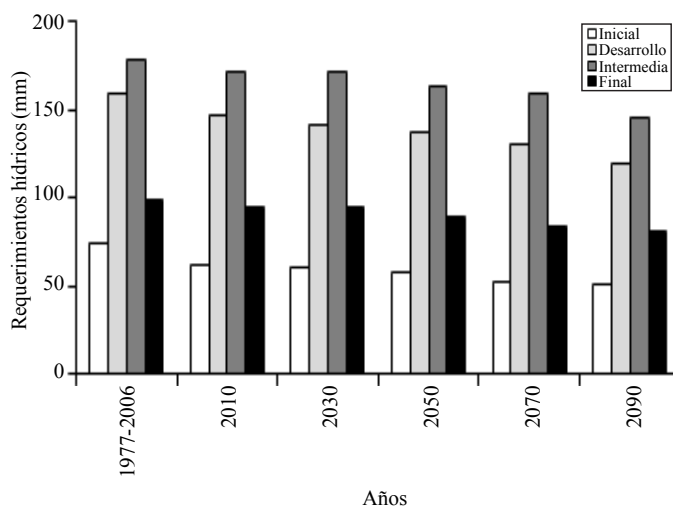


Figura 4. Tendencias futuras de los requerimientos hídricos del maíz en cada etapa del cultivo.

Figure 4. Future trends of maize water requirements at each crop stage.

CONCLUSIONS

The future scenarios of climate in the Spring-Summer cycle of the Ciénega de Chapala Region show an upward trend in thermal variables, mainly in the maximum temperature and, a slight decrease in the precipitation. The estimation of future values of precipitation does not include extreme events. The thermal oscillation will show an increase in its values with a slight slope, indicating that, in the future, there will be more extreme thermal conditions than today.

The growing season in the wet period will experience a shortening and, the effective heat units of maize will be covered faster, leading to reduce the crop phenological stages; day and nighttime temperatures will increase in response to the increased mean temperatures, which will impact the photosynthesis and respiration processes in this species; an increase of days with temperatures above the maximum threshold temperature of the crop is expected, causing the plants to have greater periods of time under heat-stress.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), al Instituto Nacional de Ecología (INE), y la Universidad de Guadalajara (U de G), por el apoyo financiero y las facilidades brindadas en la realización de esta investigación, dentro del marco de los proyectos “evaluación de la vulnerabilidad y propuesta de medidas de adaptación a nivel regional de algunos cultivos básicos y frutales ante escenarios de cambio climático”, “modelo para el desarrollo agroecológico integral en los municipios de La Barca, Jamay, Ocotlán y Poncitlán”, y “Proyecto PRECI 1527703M: cambio climático y su impacto sobre el potencial productivo agrícola, forrajero y forestal en México”.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO, Riego y Drenaje Núm. 56. 298 p.
- Andrade, F. H.; Cirilo, A. G. and Echarte, L. 2000. Factors affecting kernel number in maize. *In*: physiological bases for maize improvement. Otegui, M. E. and Slafer, G. A. (eds.). Food Products Press. USA. 225 p.
- Azcón-Bieto, J. y Talón, M. 2008. Fundamentos de fisiología vegetal. 2^{da} Edición. Mc Graw Hill. España. 651 p.
- Bowerman, B. L.; O'Connell, R. T. y Koehler, A. B. 2007. Pronósticos, series de tiempo y regresión. Un enfoque aplicado. 4^{ta} Edición. Cengage Learning. México. 695 p.
- Brouwer, C. and Heibloem, M. 1986. Irrigation water management: irrigation water needs. FAO. Training Manual. Núm. 3. URL: <http://www.fao.org/docrep/S2022E/S2022E00.htm>.
- Calderón, H. F. 2007. Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012. Presidencia de la República. México. URL: <http://www.pnd.calderon.presidencia.gob.mx>.
- Crafts-Brandner, S. J. and Salvucci, M. E. 2002. Sensitivity of photosynthesis in the C4 plant, Maize, to heat stress. *Plant Physiology*. American Society of Plant Biologists. 129:1-8.
- Eastman, J. R. 2006. IDRISI version 15.1. IDRISI Andes. Guide to GIS and Image Processing Vol. 1. Clark Labs-Clark University. Worcester, Mass, USA. 328 p.
- Ereño, C. 2009. Evaporación-evapotranspiración. Apuntes del curso de climatología de la Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Buenos Aires. URL: <http://www.filo.uba.ar/contenidos/carreras/geografia/catedras/climatologia/sitio/bcehidrico.pdf>.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 5^{ta} Edición. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Serie libros. Núm. 6. 92 p.
- Gobierno Federal. 2010. Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012. Tercer informe de ejecución 2009. Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. ISBN: 078-607-430-026-0. México.
- Instituto Nacional de Ecología (INE). 2009. Cuarta comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México. 119-174 pp.
- 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. Metz, B.; Davidson, O.; Bosch, P.; Dave, R. and Meyer, L. (eds.). Cambridge University Press, UK. and USA. 851 p.
- López, S. J. A.; Reyes, M. C. A.; Castro, N. S. y Briones, E. F. 2004. Componentes del crecimiento de grano de cultivares prolíficos de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 27:23-26.

Due to the shortening of the crop's phenological stages, there will be a decrease in the plant's water demand, reduced uptake of solar radiation period and increased nutritional requirements; so, their development will be restricted to the germplasm characteristics.

End of the English version



- Magaña, V. y Caetano, E. 2007. Informe final del proyecto: pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por estado y por sector. Núm. Proyecto INE/A1-006/2007. Universidad Autónoma de México. México. 19 p.
- Magaña, V.; Pérez, J. L.; Vázquez, J. L. y Carrisoza, E. 2004. El Niño y el clima. *In*: Magaña R.V. (ed.). Los impactos de El Niño en México. Universidad Nacional Autónoma de México. 23-66 pp.
- Martelo, M. T. 1997. Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET₀). *In*: técnicas agrometeorológicas en la agricultura operativa de América Latina. Actas de la reunión regional: reunión de expertos. Organización Meteorológica Mundial. Colombia.
- Méndez, G. J.; Návar, C. J. J.; González, R. H. y Treviño, G. E. J. 2007. Teleconexiones del fenómeno ENSO a la precipitación mensual en México. *Revista CIENCIA UANL*. 3: 290-298.
- Ojeda, B. W.; Sifuentes, I. E.; Íñiguez, C. M. y Montero, M. M. J. 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*. 45:1-11.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 1997. Zonificación agroecológica. Guía general. Boletín de suelos de la FAO. Núm. 73.
- Ramos, O. V. H.; Castro, N. S.; López, S. J. A.; Briones, E. F. y Huerta, A. J. 2009. Impacto del estrés hídrico y la temperatura alta sobre plantas cultivadas: el caso del maíz (*Zea mays* L.) en Tamaulipas. *Revista Digital Universitaria*. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Vol. 3. URL: <http://www.turevista.uat.edu.mx>.
- Ruiz, C. J. A.; Medina, G. G.; Ortiz, T. C.; Martínez, P. R.; González, A. I. J.; Flores, L. H. E. y Byerly, M. K. F. 1999. Requerimientos agroecológicos de cultivos. INIFAP. Libro técnico. Núm. 3. 324 p.
- Ruiz, C. J. A.; Pimental, B. E. y Zañudo, H. J. 2002. Regiones térmicas óptimas y marginales para el cultivo de *Agave tequilana* en el estado de Jalisco. *Agrociencia*. 36:41-53.
- Ruiz, C. J. A.; González, A. I. J.; Regalado, R. J. R.; Anguiano, C. J.; Vizcaíno, V. I. y González, E. D. R. 2003. Recursos edafo-climáticos para la planeación del sector productivo en el Estado de Jalisco. INIFAP-CIRPAC. Conexión Gráfica. Libro técnico. Núm. 2. 172 p.
- Solano, V. N. 2006. Aprovechamiento de híbridos comerciales de maíz (*Zea mays* L.) en la formación de variedades sintéticas y cruas intervarietales para el municipio de Poncitlán, Jalisco. Tesis de Maestría. Universidad de Guadalajara. México. 55 p.
- Wheldon, T. E. 1988. Mathematical models in cancer research. Taylor & Francis pub. 264 p.