

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL DESARROLLO Y REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DE LOS CULTIVOS

CLIMATE CHANGE IMPACT ON CROP DEVELOPMENT AND WATER REQUIREMENTS

Waldo Ojeda-Bustamante^{1*}, Ernesto Sifuentes-Ibarra², Mauro Íñiguez-Covarrubias¹, Martín J. Montero-Martínez¹

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 62550. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso. Jiutepec, Morelos, México. (wojeda@tlaloc.imta.mx). ²INIFAP-CIRNO-Campo Experimental Valle del Fuerte. Km. 1609. Carretera Internacional México-Nogales. Juan José Ríos, Sinaloa, México.

RESUMEN

Debido al impacto del cambio climático la modificación de los componentes del ciclo hidrológico, principalmente la evapotranspiración y la precipitación, tendrá un efecto radical en las demandas de riego y en la gestión de los sistemas de riego. Las proyecciones del cambio climático indican un incremento de la temperatura ambiental, con variabilidad en el espacio y en el tiempo. En este trabajo se analizó el impacto esperado del cambio climático en las demandas hídricas y en el desarrollo de los cultivos usando proyecciones de cambio climático para el escenario de emisiones medio moderado (A1B), para las condiciones del Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, México. Se estimó que para finales de siglo el aumento anual de la evapotranspiración de referencia será 10 % respecto a los valores actuales. La demanda hídrica de los cultivos se reducirá 13 % para el ciclo otoño-invierno, 6 % para el ciclo primavera-verano e incrementará 7 % en el ciclo de perennes para fines de siglo. Lo anterior se atribuye a que a pesar de que la evapotranspiración de referencia se incrementará, el mayor impacto por incremento de la temperatura será en la reducción del ciclo fenológico de los cultivos anuales. Por tanto es necesario implantar acciones de adaptación: en primer lugar el uso de híbridos o variedades de ciclo más largo que las actuales, con resistencia al estrés térmico, y en segundo lugar, la compactación del periodo de siembra hacia los meses más fríos.

Palabras clave: evapotranspiración, requerimientos hídricos, adaptación, distrito de riego.

ABSTRACT

Due to the impact of climate change, the modification of water cycle processes, mainly evapotranspiration and precipitation, will have a radical effect on irrigation water demands and management of irrigation systems. Climate change projections indicate an increase in air temperature, with spatial and temporal variability. In this study, we analyzed the expected impact of climate change on water demands and crop development, by using climate change projections for the moderate-medium emissions scenario (A1B), for the conditions of Irrigation District 075, Río Fuerte, Sinaloa, México. It was estimated that by the end of the century, the annual increase of reference evapotranspiration will be 10 % compared to current values. Water demand for crops will be reduced by 13 % for the Autumn-Winter season and 6 % for the Spring-Summer season, and it will increase by 7 % for the Perennial season by the end of the century. This can be attributed to the fact that although reference evapotranspiration will increase, the greatest impact from a temperature increase will be in shortening the growing season of annual crops. Therefore, it is necessary to implement adaptation actions: in the first place, using longer season cultivars than those cultivated today, with resistance to thermal stress; and in the second place, compacting the planting season toward the colder months.

Key words: evapotranspiration, water requirements, adaptation, irrigation district.

INTRODUCTION

As part of the climate change projected, thermal and dynamic fluxes in the atmosphere will be modified due to an increase in the atmospheric accumulation of several anthropogenic gases that produce the greenhouse effect (IPCC,

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: Julio, 2010. Aprobado: Noviembre, 2010.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 45: 1-11. 2011.

INTRODUCCIÓN

Como parte del cambio climático proyectado, los flujos térmicos y dinámicos de la atmósfera se modificarán debido a un incremento en la acumulación atmosférica de varios gases que intervienen en el efecto invernadero, cuyo origen es antrópico (Panel Intergubernamental de Cambio Climático; IPCC, por sus siglas en inglés, 2007). Así, las proyecciones de los Modelos de Circulación General Acoplados (MCGA) indican un incremento global significativo de la temperatura y del bióxido de carbono (CO₂) durante el presente siglo. Respecto a México, dichos modelos proyectan un decremento de la precipitación en la mayor parte de su territorio (Montero y Pérez, 2008).

La temperatura actúa en el desarrollo de los cultivos y el incremento de la temperatura ambiental puede afectar su tasa de crecimiento, limitar su actividad fotosintética y aumentar su respiración (Ellis *et al.*, 1990; Lawlor, 2005). El acortamiento del ciclo fenológico puede reducir el rendimiento potencial de los cultivos, al disminuir el periodo de intercepción de la radiación, que es uno de los principales determinantes de la acumulación de materia seca y rendimiento (Monteith, 1981).

Se ha reportado un incremento de las demandas hídricas de los cultivos por efecto del cambio climático (Rodríguez *et al.*, 2007) sin considerar el efecto de la temperatura en la duración del ciclo fenológico. Allen *et al.* (1991) muestran que estos cambios en los requerimientos de riego se derivan del efecto de la disminución de la precipitación, del impacto del incremento de la temperatura en la evapotranspiración de referencia (ET₀) y del acortamiento del ciclo fenológico.

Para las grandes planicies de Estados Unidos, Allen *et al.* (1991) indican una reducción del ciclo fenológico del maíz de hasta 80 d, y de 36 a 48 d en el trigo, y para la alfalfa señalan una iniciación temprana de su crecimiento y retraso de su latencia, lo cual resulta en un mayor número de cortes, mayor tasa de crecimiento y un mayor consumo de agua por año agrícola.

Los cambios en los patrones climáticos actuales afectarán el desarrollo y los procesos fisiológicos de los cultivos. Se espera un impacto diferencial en las demandas hídricas de los cultivos por efecto del cambio climático. Aunque existe la metodología general para estudiar dichos impactos con resultados para

2007). Thus, projections on the Coupled General Circulation Model (CGCM) indicate a significant global increase in temperature and carbon dioxide (CO₂) during this century. With regards to México, these models project a decrease in precipitation for most of the country (Montero and Pérez, 2008).

Temperature acts in crop development and the increase in air temperature can affect their growth rate, limit its photosynthetic activity and increase its respiration (Ellis *et al.*, 1990; Lawlor, 2005). Decreases in length of growing season can reduce the potential yield of crops, by shortening the period of radiation interception, which is one of the primary determinants of dry matter accumulation and yield (Monteith, 1981).

An increase in crop water demands has been reported, due to the effect of climate change (Rodríguez *et al.*, 2007), without taking into account the effect of temperature on the duration of growing season. Allen *et al.* (1991) show that these changes in irrigation requirements are derived from the effect of the decrease in precipitation, the impact of the rise in temperature on reference evapotranspiration (ET₀), and the shortening of growing season.

For the Great Plains region in the United States, Allen *et al.* (1991) indicate a reduction in the corn growing season of up to 80 d, from 36 to 48 d in wheat, and for alfalfa, they mention an earlier growth initiation and a later frost-induced dormancy, which results in increased number of hay cuttings per growing season, higher growth rate and more water requirement per agricultural year.

Changes in the current climate patterns will affect the development and phenological processes of crops. A differential impact is expected on crops' water demands because of the climate change effect. Although there is a general methodology to study these impacts with results for many agricultural areas, there is a need to analyze them locally with information validated on the field, given the spatial and temporal variability related to climate change projections (Rosenzweig and Daniel, 1989; Goyal, 2004). Faced with the lack of studies that quantify for México the possible changes in water demands and in crop development because of climate change, the objective of this study was to quantify these impacts and possible adaptation actions, for the conditions found in Irrigation District 075, Río Fuerte, Sinaloa, México.

varias zonas agrícolas, se requiere analizarlos localmente con información validada en campo, dada la variabilidad espacial y temporal en las proyecciones de cambio climático esperadas (Rosenzweig y Daniel, 1989; Goyal, 2004). Ante la falta de estudios que cuantifiquen para México los posibles cambios en las demandas hídricas y en el desarrollo de los cultivos por efecto del cambio climático, el objetivo del presente trabajo fue cuantificar dichos impactos y las posibles acciones de adaptación, para las condiciones del Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se efectuó en el Distrito de Riego 075 (DR-075), en el Valle del Fuerte, al norte del estado de Sinaloa, México; 25.4-26.1° N, 108.4-109.4° O, y altitud promedio de 20 m.

El DR-075 cuenta con una base de datos con información parcelaria de los últimos 10 años agrícolas, que ha sido generada con el sistema de pronóstico de riego en tiempo real (Spriter) (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2007). Dicha base se usó para obtener el plan de cultivos de un año agrícola típico. Un año agrícola se consideró del 1 de octubre (día juliano 274) al 31 de septiembre del año siguiente.

El plan de cultivos típico del DR-075 indica que 11.7 % de la superficie tiene cultivos perennes (PER) y 88.3 % cultivos anuales, de estos 80 % es de ciclo otoño-invierno (OI) y 20 % de segundos cultivos de ciclo primavera-verano (PV). El porcentaje de la superficie sembrada por cultivo y por ciclo es 65.9 % *Zea mays* (maíz), 19.5 % *Phaseolus vulgaris* (frijol), 6.7 % *Solanum tuberosum* (papa), 4.1 % *Solanum lycopersicum* (jitomate) y 3.9 % con otros cultivos en el OI. En el ciclo PV, hay segundos cultivos de superficie sembrada en OI: *Sorghum bicolor* (sorgo, 64.6 %), maíz (33.8 %) y otros cultivos (1.6 %). Los cultivos perennes son *Saccharum officinarum* L. (caña de azúcar) con 62.3 %, forrajes (principalmente *Medicago sativa*, alfalfa) con 19.8 %, y frutales (principalmente *Mangifera indica*, mango) con 17.9 %.

Los datos climáticos del periodo de 1961 a 1990 fueron obtenidos de la estación "Los Mochis" (25.82° N, 109.0° O, y altitud de 14 m). La temperatura media anual es de 24.6° C y la precipitación acumulada de 340 mm, concentrada de julio a octubre, que corresponden a los meses más calientes del año. La ET_0 tiene un valor medio anual de 4.2 mm d⁻¹, con intervalo de 2.3 a 6 mm d⁻¹.

Actualmente las herramientas mejores para estimar proyecciones de cambio climático son los MGCA (IPCC, 2007). Sin embargo, debido a diferencias en su conceptualización y

MATERIALS AND METHODS

The study was carried out in Irrigation District 075 (ID-075), in Valle del Fuerte, in the north of the state of Sinaloa, México; 25.4-26.1° N, and 108.4-109.4° W, and an average altitude of 20 m.

The ID-075 has a database with information about farms for the last 10 agricultural years, which has been generated with the real-time irrigation forecast system (Spriter) (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2007). This database was used to obtain the crop plan for a typical agricultural year. An agricultural year is understood as being from October 1 (Julian day 274) until September 31 the next year.

The typical cropping plan for ID-075 indicates that perennial crops (PER) account for 11.7 % of the cropping area and annual crops 88.3 %, out of which 80 % belong to the Fall-Winter season (FW) and 20 % are secondary Spring-Summer season (SS) crops. The area percentage planted by crop and by season is 65.9 % with *Zea mays* (corn), 19.5 % with *Phaseolus vulgaris* (common beans), 6.7 % with *Solanum tuberosum* (potato), 4.1 % with *Solanum lycopersicum* (tomato) and 3.9 % with other crops in the FW cycle. During the SS season, there are second crops planted during FW: *Sorghum bicolor* (sorghum, 64.6 %), corn (33.8 %) and other crops (1.6 %). The perennial crops are *Saccharum officinarum* L. (sugarcane) with 62.3 %, fodder (mainly *Medicago sativa*, alfalfa) with 19.8 %, and orchards (mainly *Mangifera indica*, mango) with 17.9 %.

The climate data for the 1961 to 1990 period were obtained from "Los Mochis" meteorological station (25.82° N, 109.0° W, and 14 m altitude). The average annual temperature is 24.6° C and the accumulated precipitation is 340 mm, concentrated in July to October, which are the warmest months in the year. The ET_0 has a mean annual value of 4.2 mm d⁻¹, with an interval of 2.3 to 6 mm d⁻¹.

Currently, the best tools to estimate climate change projections are CGCM (IPCC, 2007). However, due to differences in their conceptualization and parameterization of physics and dynamics of atmosphere, these models present an uncertainty in the projected evolution of climate. The IPCC in its Fourth Assessment Report considers 23 CGCMs, which include some of the six different scenarios for Greenhouse Effect Gases (GHG) emissions known as SRES: B1, B2, A1T, A1B, A1F1, and A2 (IPCC, 2007). In this study, the medium moderate A1B emissions scenario was used, the one most frequently used in climate change studies, which considers that society will use all renewable and limited energy sources in a balanced manner, including fossil fuels (IPCC, 2007).

parametrización de la física y la dinámica de la atmósfera, estos modelos presentan una incertidumbre en la evolución proyectada del clima. El IPCC en su Cuarto Reporte de Evaluación considera 23 MGCA que incluyen algunos de los seis diferentes escenarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) conocidos como SRES: B1, B2, A1T, A1B, A1FI, y A2 (IPCC, 2007). En este trabajo se utilizó el escenario de emisiones medio moderado A1B, el escenario más utilizado en estudios de cambio climático, que considera que la sociedad usará en forma balanceada todas las fuentes energéticas renovables y agotables, e incluyen las de origen fósil (IPCC, 2007).

En el presente estudio se utilizaron proyecciones mensuales para el periodo 2011-2098 con una malla regular de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ($\sim 50 \times 50$ km) obtenida por técnicas estadísticas de reducción de escala a partir de datos de modelos MCGA. La base de datos de precipitación y temperatura de superficie (media, máxima y mínima) fue obtenida a través de promedios ponderados de las proyecciones de los 23 MCGA, disponible en del centro de distribución de datos del IPCC (www.ipcc-data.org), según la metodología usada por Montero y Pérez (2008).

Con el objeto de estudiar el impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos de importancia del DR-075, se generaron valores promedio de las variables climáticas temperatura y precipitación, para cuatro periodos de tiempo: P_0 , P_1 , P_2 y P_3 . El primero, P_0 , se relaciona con el pasado reciente y corresponde al promedio de las variables climáticas para el periodo base de 1961 a 1990. Los escenarios P_1 , P_2 y P_3 definen el promedio de valores mensuales de los periodos entre 2011 y 2040, 2041 y 2070 y 2071 y 2098, respectivamente.

Se usó el concepto de días grado de desarrollo ($^\circ\text{D}$) para predecir la duración de las etapas fenológicas de los cultivos de la zona de estudio, el cual requiere del conocimiento de la temperatura media ambiental diaria (T_a). Aunque existen varias alternativas para calcular los $^\circ\text{D}$ (McMaster y Wilhelm, 1997), en este trabajo se siguió la utilizada por Ojeda-Bustamante *et al.* (2006) debido a que había sido calibrada para la zona de estudio. Se usaron datos experimentales de Mendoza *et al.* (2003) para estimar el efecto actual de la fecha de siembra y duración del ciclo fenológico en el rendimiento del maíz.

Los requerimientos hídricos de los cultivos se calcularon de acuerdo con la metodología de la FAO (Allen *et al.*, 2006) en la forma de $ET_c = K_c ET_o$, donde K_c es el coeficiente de cultivo expresado en función de los $^\circ\text{D}$ de acuerdo a las ecuaciones propuestas por Ojeda-Bustamante *et al.* (2006). Los cálculos de ET_c de los cultivos, para los tres ciclos de un año agrícola típico del DR-075, se realizaron mediante un programa computacional equivalente al CropWat (Clarke *et al.*, 1998). El uso de este programa facilitó la estimación de la duración de las fases fenológicas de los cultivos en función de la temperatura en el

For this study, monthly projections for the 2011-2098 period were used, with a regular grid of $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ($\sim 50 \times 50$ km) obtained through statistical techniques for downscaling from CGCM model data. The precipitation and air temperature (medium, maximum and minimum) database was obtained through weighted averages of the 23 CGCM projections, available at the IPCC data distribution center (www.ipcc.data.org), according to the methodology used by Montero and Pérez (2008).

With the objective of studying the climate change impact on development and water requirements of important crops in ID-075, average values were generated for the climate variables of temperature and precipitation, for four time periods: P_0 , P_1 , P_2 , and P_3 . The first, P_0 , is related to the recent past and corresponds to the average of climate variables for the 1961 to 1990 base period. The P_1 , P_2 , and P_3 scenarios define the average of monthly values for periods between 2011 and 2040, 2041 and 2070, and 2071 and 2098.

The concept of growing degree days ($^\circ\text{D}$) was used to predict the duration of crops growing season in the study area, which requires the knowledge of average air temperature (T_a). Although there are many alternatives for calculating $^\circ\text{D}$ (McMaster and Wilhelm, 1997), in this study we followed the method proposed by Ojeda-Bustamante *et al.* (2006) because it had been calibrated for the study area. Experimental data from Mendoza *et al.* (2003) were used to estimate the actual effect of the planting date and duration of growing season in corn yield.

Crop water requirements were calculated according to the FAO methodology (Allen *et al.*, 2006) in the form of $ET_c = K_c ET_o$, where K_c is the crop coefficient expressed in function of the $^\circ\text{D}$ based on the equations proposed by Ojeda-Bustamante *et al.* (2006). Calculations for crops' ET_c , for the three seasons in a typical ID-075 agricultural year, were carried out through a computer program equivalent to CropWat (Clarke *et al.*, 1998). The use of this program eased the calculation of the duration of the crops' phenological stages in function of the temperature in the crop season, by having an implicit crop-development model based on $^\circ\text{D}$, and their parameters were locally calibrated as reported by Ojeda-Bustamante *et al.* (2006) for corn.

The ETO was calculated with the Penman-Monteith equation, using monthly daily averages as the CropWat program does. With the crops' surface percentages established per agricultural season, the crops' water demand curves were obtained for the three agricultural seasons in a typical agricultural year for the ID-075 during the four periods studied.

The possible beneficial effect of the increase in carbon dioxide on the reduction of crop transpiration was not studied (Kimball, 1983), because we lacked information regarding this

ciclo fenológico, al tenerse implícito un modelo de desarrollo de los cultivos basado en °D, y sus parámetros fueron calibrados para los cultivos de la zona como lo hizo Ojeda-Bustamante *et al.* (2006) para el cultivo de maíz.

La ET_0 fue calculada con la ecuación de Penman-Monteith con los promedios diarios mensuales como lo realiza el programa CropWat. Con los porcentajes de la superficie de los cultivos establecidos por ciclo agrícola se obtuvieron las curvas de las demandas hídricas de los cultivos de los tres ciclos agrícolas de un año agrícola típico para el DR-075 de los cuatro periodos estudiados.

No se consideró el efecto benéfico posible del incremento del dióxido de carbono en la reducción de transpiración de los cultivos (Kimball, 1983), por carecer de la información de dicho incremento en condiciones de estrés hídrico y térmico de esos cultivos (Lawlor, 2005).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Proyecciones de cambio climático

La línea de tendencia promedio proyectada por los modelos MCGA indica un incremento anual en la temperatura media de 0.03 °C por año en el periodo de 2010 a 2098 para el DR-075, en el escenario de emisiones A1B. La temperatura media diaria mensual, respecto al periodo P_0 , se incrementará en promedio 1.0, 2.2 y 3.0 °C durante los periodos P_1 , P_2 , y P_3 , respectivamente. La variación anual de la precipitación disminuirá menos de 30 % para finales del siglo, respecto al valor promedio de P_0 . La lluvia anual disminuirá en promedio 62, 70 y 110 mm durante los periodos P_1 , P_2 , y P_3 .

Se calculó un valor anual acumulado de la ET_0 de 1554 mm para el periodo base P_0 . Al introducir las proyecciones en los valores de las variables meteorológicas para el escenario de emisiones A1B, con respecto a P_0 se estimó un incremento en la ET_0 anual del 3, 6 y 10 % en los periodos P_1 , P_2 , y P_3 .

Requerimientos hídricos actuales de los cultivos

En el DR-075 existe un periodo amplio de siembra de los cultivos de un año agrícola típico. La mayor superficie establecida con los cuatro principales cultivos del ciclo otoño-invierno (OI) se presenta en el periodo juliano del día 280 al día 15 del siguiente año (inicios de octubre y hasta mediados de enero)

increase in drought and thermal stress conditions in these crops (Lawlor, 2005).

RESULTS AND DISCUSSION

Climate change projections

The average trendline projected by CGCM models indicates an annual increase in average temperature of 0.03 °C per year in the 2010-2098 period for ID-075, in the A1B emissions scenario. The average monthly daily temperature, compared to P_0 , will increase in average 1.0, 2.2 and 3.0 °C during periods P_1 , P_2 and P_3 , respectively. The annual variation of precipitation will decrease less than 30 % by the end of the century, as compared to the average P_0 value. Annual rain will decrease in average 62, 70 and 110 mm during the P_1 , P_2 and P_3 periods.

An annual accumulated ET_0 value of 1554 mm was estimated for the base period P_0 . When introducing projections into the meteorological variables for the A1B emissions scenario, an increase in annual ET_0 was estimated, as compared to P_0 , of 3, 6 and 10 % in the P_1 , P_2 and P_3 periods.

Actual crop water requirements

In the ID-075 there is a broad planting period for crops during a typical agricultural year. The greatest surface established with the four main crops in the Fall-Winter (FW) season takes place during the period from Julian day 280 to the 15th the following year (beginning of October to mid-January) (Figure 1A). With the exception of tomato, which has a broad sowing period, the harvesting period for FW crops is concentrated in the period from Julian day 1 to day 140 (from the beginning of January to mid-May).

Crops' water requirements depend primarily on the species, variety, phenological stage, planting date and environmental conditions during the growing season (Allen *et al.*, 2006). The crops' peak water demands do not occur themselves in the same period (Figure 1B), due to the variability in each crop's sowing period, environmental conditions at the ID-075, and differences in water consumption which are intrinsic to crops, given by their KC and the duration of phenological phases.

(Figura 1A). Con excepción del jitomate, que tiene periodo de siembra amplio, el periodo de cosecha de los cultivos de OI se concentra en el periodo del día juliano 1 al día 140 (de inicios de enero a mediados de mayo).

Los requerimientos hídricos de los cultivos dependen principalmente de la especie, variedad, etapa fenológica, fecha de siembra y condiciones ambientales del ciclo fenológico (Allen *et al.*, 2006). Las demandas hídricas máxima de los cultivos no se presentan en el mismo periodo (Figura 1B), debido a la variabilidad del periodo de siembra de cada cultivo, condiciones ambientales del DR-075 y diferencias en el consumo de agua, intrínsecas a los cultivos, dadas por su K_c y duración de las fases fenológicas.

La Figura 2 presenta las curvas de los tres ciclos agrícolas del periodo base P_0 , obtenidas al integrar la aportación ponderada de las demandas hídricas de los cultivos por ciclo. Las demandas hídricas máxima del ciclo PV es mayor que las del ciclo OI, debido a su temporada de siembra y cosecha más corta y a que su ciclo fenológico coincide con el periodo más caliente del año. El ciclo de perennes (PER) es el ciclo con mayor demanda hídrica diaria: acumulada y máxima por lo que su superficie es restringida en el DR-075. Lo anterior presenta la misma tendencia que la observada por Allen *et al.* (1991) con el incremento de las demandas hídricas de los cultivos perennes y el decremento de los cultivos anuales con respecto al periodo base.

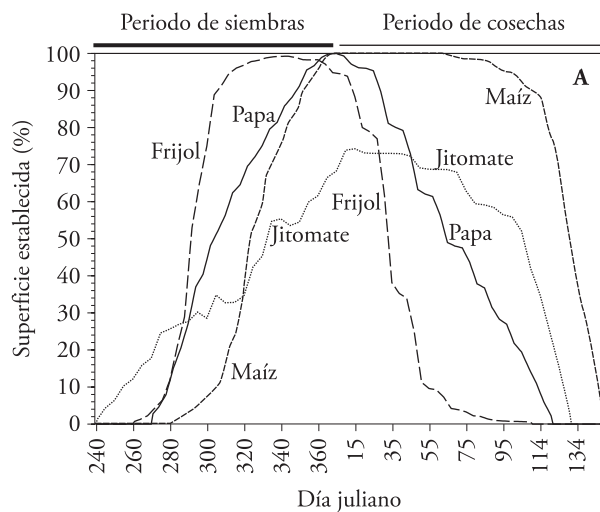


Figure 2 presents curves for the three agricultural seasons in the base period P_0 , obtained when integrating the adjusted contribution of crops' water demands per season. The peak water demands for the SS cycle are greater than those for the AW cycle, because of its shorter season for sowing and harvesting, and because its growing season coincides with the warmest period of the year. The Perennials season (PER) is the cycle with greatest daily water demand: accumulated and peak, this is the reason why these crops are restricted in the ID-075. These results show the same tendency as reported by Allen *et al.* (1991) with an increase in water demands for perennial crops and a decrease in annual crops compared with the base period.

Impact of climate change on corn development

Currently, corn in the ID-075 presents the longest growing season in FW cycle (Julian day 330 to 335). The duration of growing season of 16, 30 and 42 days for periods P_1 , P_2 and P_3 shows a decrease compared with the duration of the FW season for the P_0 period, where variation is not significant (Figure 3A).

Ojeda-Bustamante *et al.* (2006) pointed out a current variation in the corn growing season in the ID-075 of up to 15 days in the broad planting date interval (from Julian day 274 to 350). The reduction in crop growing season will translate into lower yield, because of the reduction in nutrient absorption

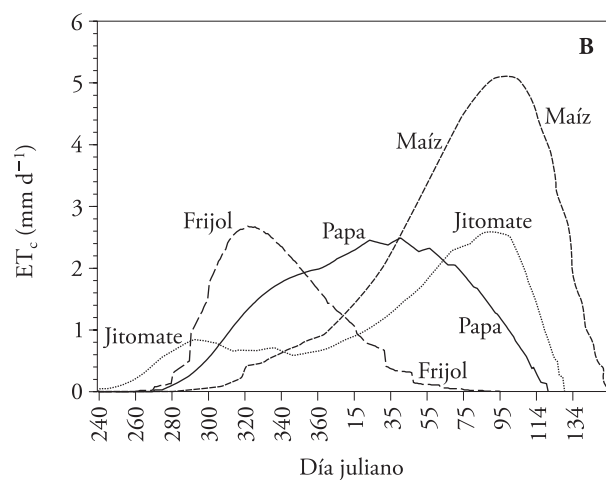


Figura 1. A. Distribución de la superficie establecida. B. Evapotranspiración de los cultivos (ET_c) de un plan de siembras típico del ciclo otoño-invierno en el distrito de riego 075 en Sinaloa, México, para el periodo base P_0 .
Figure 1. A. Distribution of the crop surface established. B. Crops' evapotranspiration (ET_c) in a typical planting plan for the Fall-Winter season in irrigation district 075, in Sinaloa, México, for the base period, P_0 .

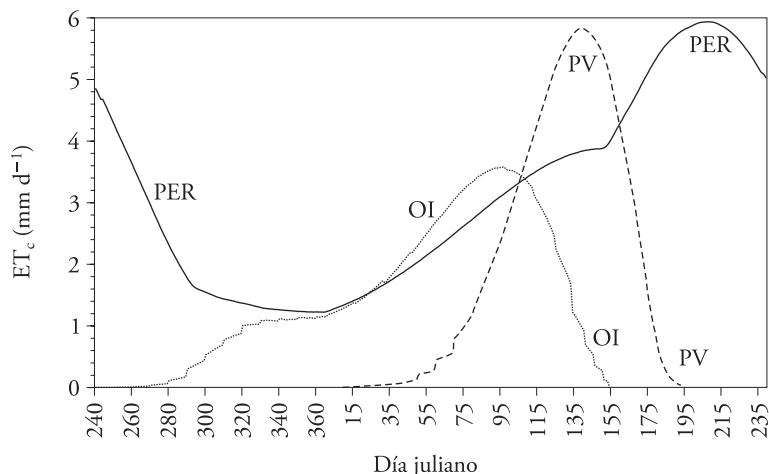


Figura 2. Variación de la evapotranspiración integrada de los cultivos (ET_c) para los ciclos agrícolas otoño-invierno (OI), primavera-verano (PV) y perennes (PER) para el plan de cultivos típico del distrito de riego 075 en Sinaloa, México, considerando el escenario climático actual (P_0).

Figure 2. Variation in integrated crops' evapotranspiration (ET_c) for the agricultural Fall-Winter (FW), Spring-Summer (SS) and Perennial (PER) seasons for a typical cropping plan for irrigation district 075 in Sinaloa, México, for the base climate scenario (P_0).

Impacto del cambio climático en el desarrollo del maíz

Actualmente el maíz en el DR-075 presenta la mayor duración del ciclo fenológico en OI, específicamente para siembras de la segunda quincena de noviembre (juliano 330 a 335). La duración del ciclo fenológico de 16, 30 y 42 días para los periodos P_1 , P_2 y P_3 , respectivamente, muestra un decremento comparado con la duración del ciclo para el periodo P_0 , en el que la variación no es significativa (Figura 3A).

Ojeda-Bustamante *et al.* (2006) señalaron una variación actual en el DR-075 de la duración del ciclo de maíz de hasta 15 días en el intervalo amplio de fechas de siembra (de día juliano 274 al 350). La reducción del ciclo fenológico de los cultivos se traducirá

periods, solar energy interception, and metabolic activity (Monteith, 1981). To counteract the effect of the reduction in corn growing season, there will be a need to use varieties with greater heat requirements (longer cycle) to maintain equivalent periods in crop development. Increases of 200, 340 and 440 °D were estimated, for the new corn varieties that will be demanded for P_1 , P_2 and P_3 , implying an increase in accumulated days-degrees of 13, 21 and 28 % with regards to the intermediate-maturity corn varieties currently used in the ID-075.

Air temperatures higher than optimum can decrease the photosynthetic rate, increase the respiratory rate, accelerate crop development and growth, and shorten the duration of the growing season (Lawlor, 2005). The results show (Figure

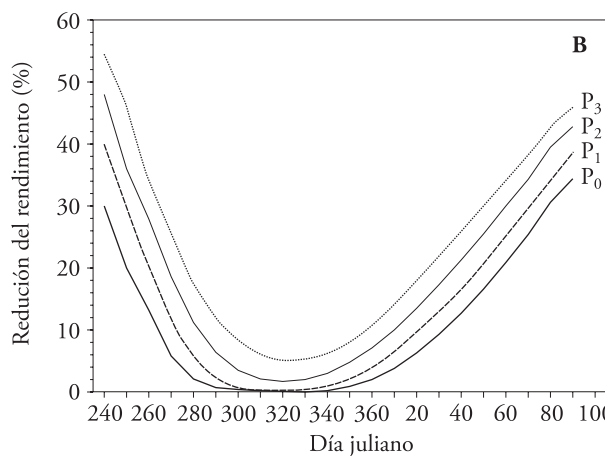
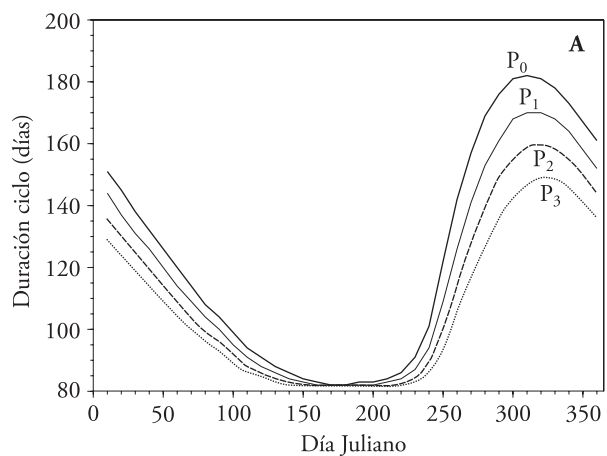


Figura 3. A. Variación del ciclo fenológico. **B.** Reducción del rendimiento potencial del maíz otoño-invierno en función de la fecha de siembra, bajo el escenario de cambio climático A1B para cuatro periodos.

Figure 3. A. Variation of phenological season. **B.** Reduction of Fall-Winter corn potential yield as a function of the sowing date, under the A1B climate change scenario for four periods.

en reducción del rendimiento, al reducirse los periodos de absorción de nutrientes, de intercepción de energía solar y de actividad metabólica (Monteith, 1981). Para contrarrestar el efecto de reducción del ciclo del maíz, será necesario usar variedades con mayores requerimientos de calor (ciclo más largo) para mantener periodos equivalentes en el desarrollo de los cultivos. Se estimaron incrementos de 200, 340 y 440 °D en las nuevas variedades de maíz que serán demandadas para los periodos P_1 , P_2 y P_3 , lo que implica el incremento en días-grado acumulados del 13, 21 y 28 % respecto a las variedades intermedias de maíz usadas actualmente en el DR-075.

Temperaturas ambientales superiores a las óptimas pueden disminuir la tasa fotosintética, incrementar la tasa respiratoria, acelerar el desarrollo y crecimiento de los cultivos y acortar la duración del ciclo fenológico (Lawlor, 2005). Los resultados muestran (Figura 3B) que los rendimientos del maíz se reducirán a medida que se incremente la temperatura y acortarán su ciclo fenológico por cambio climático (Figura 3A), tal como lo reportaron Rosenzweig y Daniel (1989). Para mantener en 10 % la reducción máxima de los rendimientos futuros, la temporada de siembra debería reducirse 6, 21 y 38 % para los periodos P_1 , P_2 y P_3 , respectivamente, respecto a la temporada actual del periodo base (P_0), entre el día 258 juliano al 15 (mediados de septiembre a mediados de enero).

Durante el ciclo PV, principalmente del día juliano 121 al 243, entre mayo y agosto, se presentarán con mayor frecuencia, durante el día, temperaturas ambientales superiores a la óptima de los cultivos. Esto puede disminuir el rendimiento del maíz, debido a problemas en la polinización, incremento de la respiración y disminución de la fotosíntesis (Lawlor, 2005). El incremento en la temperatura acortará el ciclo fenológico de todos los cultivos, lo que genera su desfase (adelanto) tanto en los cultivos del ciclo OI como en los de PV, menor en los últimos.

Impacto proyectado del cambio climático en los requerimientos hídricos de los cultivos

Se anticipa una disminución en los valores de la ET_c diaria: máxima y acumulada del año agrícola para la zona de riego (ET_{c-ZR}) para los cuatro periodos analizados. El periodo más caliente (P_3 , Figura 4) presenta la mayor reducción de ET_c , respecto al

3B) that corn yields will decrease as temperature increases, and the phenological season will be shortened because of climate change (Figure 3A), as was reported by Rosenzweig and Daniel (1989). To maintain the maximum reduction of future yields at 10 %, the planting season should be reduced in 6, 21 and 38 % for periods P_1 , P_2 and P_3 , with regards to the current season of the base period (P_0), between Julian day 258 and the 15th (mid-September to mid-January).

During the SS season, mainly from Julian day 121 to 243, between May and August, more frequently, there are air temperatures during the day that are higher than the crops' optimum. This can decrease the corn yield, due to problems with pollination, an increase in respiration, and a decrease in photosynthesis (Lawlor, 2005). The increase in temperature will shorten the growing season of all crops, generating to shift (ahead of time) both in the AW cycle and in the SS, although shorter in the latter.

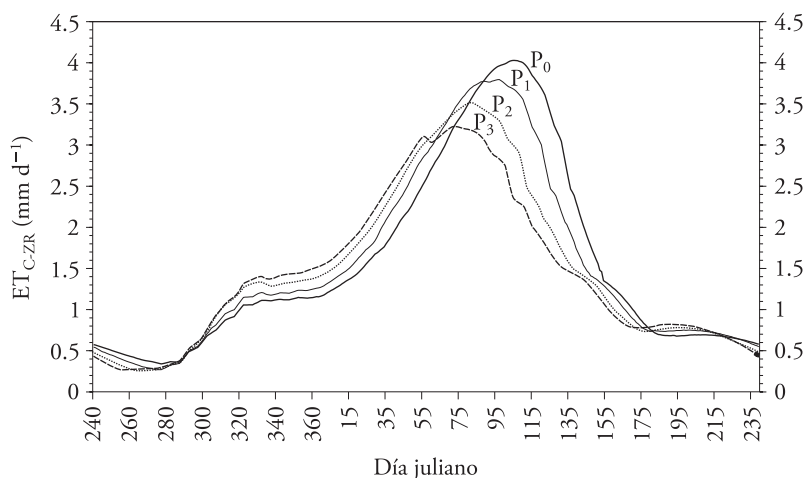
Projected impact of climate change in crops' water requirements

A decrease in the daily: peak and accumulated ET_c for the agricultural year is anticipated, for the irrigation zone (ET_{c-ZR}) during the four periods analyzed. The warmest period (P_3 , Figure 4) presents the greatest reduction in ET_c , with regards to the current period (P_0). This is due to the larger surface sown with FW crops in ID-075, to the future growing season reduction in annual crops and to the greater crop development rate, compared to the current period, nullifying the expected increase in ET_o . The days where peak ET_{c-ZR} currently occur (P_0) are warm (Julian period 100-110, April); however, as the climate change intensifies, these peak values will occur in the colder months (Figure 4), which will nullify the effect of an increase in ET_o due to the increase in temperature.

Similar trends to those reported by Allen *et al.* (1991) were obtained for changes in ET_c because of the impact of climate change, the decrease in ET_c for annual crops and its increase for perennial crops. The changes in ET_c for FW crops are reduced almost in double of the estimated values for the SS cycle, with regards to the current values (P_0) in the three periods projected (Table 1). Only the perennial crops show

Figura 4. Variación diaria de la evapotranspiración (ET_c) del distrito de riego 075 en Sinaloa, México, para un año agrícola típico en cuatro periodos.

Figure 4. Daily variation of evapotranspiration (ET_c) for irrigation district 075 in Sinaloa, México, for a typical agricultural year in four periods.



periodo actual (P_0). Lo anterior se debe a la mayor superficie sembrada con cultivos del ciclo OI en el DR-075, al acortamiento futuro de los ciclos anuales y a la tasa mayor de su desarrollo, respecto al periodo actual, que anula el incremento esperado de la ET_o . Los días en los que se presenta la máxima ET_{c-ZR} actualmente (P_0) son cálidos (periodo juliano 100-110, abril); sin embargo, a medida que el cambio climático se manifieste con mayor intensidad, esos valores máximos se presentarán en los meses más fríos (Figura 4), lo que anulará el efecto del incremento en ET_o debido al incremento de la temperatura.

Se obtuvieron tendencias similares a las reportadas por Allen *et al.* (1991) para cambios de ET_c por impacto del cambio climático, disminución de ET_c para cultivos anuales y su incremento para cultivos perennes. Los cambios de la ET_c de los cultivos OI se reducen casi al doble que los valores estimados para el ciclo PV, con respecto a los valores actuales (P_0) en los tres periodos proyectados (Cuadro 1). Sólo el ciclo de perennes muestra incremento de ET_c en el

an increase in ET_c during this century, compared to the base period P_0 (Table 1). The ET_{c-ZR} for the agricultural year decreases evapotranspiration in the irrigation district by 2, 6 and 8 % during periods P_1 , P_2 and P_3 , as compared to the current period, P_0 . The previous analysis was carried out assuming that crops and varieties used currently will be kept, and weighed average climate projections were also considered for several climate simulation models in the A1B emission scenario. Changes in water demands for crops could be greater if other emissions scenarios or climate projections for other CGCM models are used.

The use of longer-season varieties that are resistant to thermal stress, as well as shortening the planting season to counteract the effects of climate change in crop yield can increase the water demands above the values shown in Table 1. Also, a projected increase in CO_2 concentrations can cause an increase in crops' net productivity and a decrease in their transpiration rates by inducing a partial closure of stomata because of carbon enrichment (Allen *et al.*, 1991).

Cuadro 1. Evapotranspiración de referencia (ET_o) y de los cultivos (ET_c) en mm, en el distrito de riego 075 en Sinaloa, México y porcentaje de reducción (entre paréntesis) con respecto al periodo base P_0 , por ciclo y año agrícola.

Table 1. Reference evapotranspiration (ET_o) and crops' (ET_c) in mm, in irrigation district 075, Sinaloa, México, and reduction percentage (in parenthesis) compared to the base period, P_0 , per season and agricultural year.

Ciclo	P_0	P_1	P_2	P_3
ET_o anual	1554	1597 (+2.8 %)	1646 (+5.9)	1701 (+9.5 %)
ET_c Maíz OI	505	483 (-4 %)	449 (-11 %)	425 (-16 %)
ET_c OI	414	399 (-4 %)	375 (-9 %)	358 (-13 %)
ET_c PV	403	396 (-2 %)	387 (-4 %)	378 (-6 %)
ET_c PER	1136	1173 (+3 %)	1191 (+5 %)	1214 (+7 %)
ET_{c-ZR} año agrícola	570	560 (-2 %)	538 (-6 %)	525 (-8 %)

transcurso del presente siglo, respecto al periodo base P_0 (Cuadro 1). La ET_{c-ZR} del año agrícola disminuye 2, 6 y 8 % la evapotranspiración de la zona de riego en los periodos P_1 , P_2 y P_3 , respectivamente, respecto al periodo actual P_0 . El análisis anterior se realizó asumiendo que los cultivos y variedades usadas actualmente se mantendrán, se consideraron también proyecciones climáticas promedio ponderadas de varios modelos de simulación climática en el escenario de emisiones A1B. Los cambios de las demandas hídricas de los cultivos podrían ser mayores si se usan otros escenarios de emisiones o proyecciones climáticas de otros modelos MCGA.

El uso de variedades de ciclo largo y resistente al estrés térmico, así como la compactación del periodo de siembra, para contrarrestar los efectos del cambio climático en el rendimiento de los cultivos, pueden incrementar las demandas hídricas por arriba de los valores mostrados en el Cuadro 1. Además, un incremento proyectado en las concentraciones de CO_2 , puede causar un incremento en la productividad neta de los cultivos y una disminución de sus tasas de transpiración al inducir un cierre parcial de los estomas por enriquecimiento carbónico (Allen *et al.*, 1991).

CONCLUSIONES

Los cambios en los patrones actuales de la temperatura podrían ocasionar grandes efectos en la demanda hídrica de los cultivos, en el manejo de los cultivos y en la planeación de los recursos hídricos de las zonas de riego. Potencialmente, el incremento de la temperatura ambiental, por efecto del cambio climático, provocará reducción de las demandas hídricas acumuladas por acortamiento del ciclo fenológico de los cultivos del ciclo OI, y en menor grado para los cultivos del ciclo PV, mismo que anulará el incremento de la ET_c . Sin embargo, en los cultivos perennes se presentará un efecto opuesto, las demandas hídricas se incrementarán.

Las posibles acciones de adaptación al cambio climático para contrarrestar la reducción en el ciclo fenológico de los cultivos anuales, y en consecuencia de su rendimiento, son: restringir el periodo de siembra a los periodos fríos para que generen mayor duración del ciclo de cultivo, y usar variedades de ciclo largo resistentes al estrés térmico e hídrico, y soporten temperaturas mayores a las que se presentan actualmente.

CONCLUSIONS

Changes in current temperature patterns could cause in irrigation zones great effects on crops' water demands, in crops' management and in water resources planning. Potentially, the increase in air temperature, because of the effect of climate change, will cause a reduction in accumulated water demands because of the reduction of the growing season in Fall-Winter crops, and to a lesser degree for Spring-Summer crops, which will nullify the increase in ET_c . However, for perennial crops, the opposite effect is expected, where water demands will increase.

The possible actions for climate change adaptation, to counteract the growing season reduction in annual crops, and a decrease of their yield, are: restricting the planting period to cold periods to create a longer growing season, and using longer-season varieties that are tolerant to thermal and drought stress, and which can endure higher temperatures than those present today.

—End of the English version—



AGRADECIMIENTOS

Este trabajo formó parte del proyecto "Evaluación del impacto del cambio climático en la productividad de la agricultura de riego y temporal del Estado de Sinaloa"; FOMIX CONACYT-Sinaloa, con clave SIN-2008-C01.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., F. N. Gichuki, and C. Resenzweig. 1991. CO_2 -Induced climatic changes and irrigation-water requirements. *J. Water Resources Planning and Manage.* 117: 157-178.
- Allen, G. R., G. R., L. S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Estudio FAO de Riego y Drenaje No. 56. FAO. Roma. 298 p.
- Clarke, D., M. Smith, and K. El-Askaru. 1998. Cropwat for Windows v4.2: user guide. FAO. Roma. 43 p.
- Ellis, R. H., P. Hadley, E. H. Roberts, and R. J. Summerfield. 1990. Quantitative relations between temperature and crop development and growth. *In*: Jackson, M. T., B. V. Ford-Lloyd, and M. L. Parry (eds). *Climatic Change and Plant Genetics Resources*. Belhaven Press, London. pp: 85-115.
- Goyal, R. K. 2004. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case of study of arid zone of Rajasthan (India). *Agric. Water Manage.* 69: 1-11.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. *In*: Pachauri, R.K., and A. Reisinger (eds). Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del IPCC. Ginebra. pp: 104.
- Kimball, B. A. 1983. Carbon dioxide and agricultural yields: an assemblage and analyses of 430 prior observations. *Agron. J.* 75: 779-788.
- Lawlor, D. W. 2005. Plant responses to climate change: impacts and adaptation. *In*: Omasa, I. Nouchi, and L. J. De Kok. (eds). *Plant Responses to Air Pollution and Global Change*. K. Springer-Verlag. Tokio. pp: 81-88.
- McMaster, G. S., and W. W. Wilhelm. 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agric. and For. Meteorol.* 87: 291-300.
- Mendoza, R. J. L., J. Macías, y E. Cortez. 2003. Tecnología para mejorar la productividad del maíz en el norte de Sinaloa y su impacto económico. Folleto Técnico No. 21. Fundación Produce Sinaloa. 37 p.
- Monteith, J. L. 1981. Climatic variation and the growth of crops. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* 107: 749-774.
- Montero, M. J., y J. L., Pérez. 2008. Regionalización de proyecciones climáticas en México de precipitación y temperatura en superficie usando el método REA para el siglo XXI. *In*: P. Martínez, y A. Aguilar (eds). *Efectos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos de México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Mor. pp: 11-21.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra, y H. Unland. 2006. Programación integral del riego en maíz. *Agrociencia* 40: 13-25.
- Ojeda-Bustamante, W., J. M. González-Camacho, E. Sifuentes-Ibarra, E. Isidro, and L. Rendón-Pimentel. 2007. Using spatial information systems to improve water management in Mexico. *Agric. Water Manage.* 89: 81-88.
- Rodríguez, J. A., E. K. Weatherhead, J. W. Knox, and E. Camacho. 2007. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. *Regional Environ. Change* 7: 149-159.
- Rosenzweig, C., and M. M. Daniel. 1989. Agriculture. *In*: Smith J. B., and D. A. Tirpak. (eds). *The Potential Effects of Global Change on the United States*. Chapter 6. EPA (Environmental Protection Agency). EPA-230-05-89-050. Washington, USA. pp: 89-117.