



# Potential climate change effect on water demand of important crops in Zacatecas

## Efecto posible del cambio climático sobre la demanda de agua de cultivos importantes en Zacatecas

Martín García-Bandala<sup>1</sup>; Alba Nelida García-Beltrán<sup>1</sup>; Guillermo Medina-García<sup>2\*</sup>; Miguel Servín-Palestina<sup>2</sup>; Nadiezhda Ramírez-Cabral<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad académica de Ingeniería Ramón López Velarde núm. 801, Centro, C. P. 98000, Zacatecas, Zac., México.

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, km 24.5 Carretera Zacatecas-Fresnillo, Calera, Zac., México.

\*Corresponding author: [medina.guillermo@inifap.gob.mx](mailto:medina.guillermo@inifap.gob.mx)

### Abstract

Currently, climate change represents one of the main problems faced by agriculture. This will have an impact on crop yields and Consumptive Use (CU). Therefore, the main objective of this study was to estimate water demand of crops of interest for Zacatecas (beans, maize, alfalfa, pepper and garlic) considering 2050 and 2070 climatic scenarios, in RPC 4.5 and 8.5 under the basis of the climate for the period from 1981-2010. To determine the UC of crops, the Hargreaves method was used, and an adjustment was performed with the Penman-Monteith method. Once the UC of the baseline period was recorded, an assembly of 11 general circulation models was used to develop climatic scenarios. Results indicate that the UC of beans, maize, alfalfa, pepper, and garlic could increase to 64.8, 78.3, 190.6, 73.2, and 50.2 mm, respectively, for RCP 8.5 in 2070. This implies more demand for water resources.

**Keywords:** Consumptive use, Hargreaves, Penman-Monteith, beans, maize, alfalfa.

### Resumen

Actualmente, el cambio climático representa uno de los problemas principales que enfrenta la agricultura. Esto repercutirá en el rendimiento y Uso Consuntivo (UC) de los cultivos. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue estimar la demanda de agua de cultivos de interés en Zacatecas (frijol, maíz, alfalfa, chile y ajo) al considerar, escenarios climáticos 2050 y 2070, en los RPC 4.5 y 8.5, tomando como clima base del periodo 1981-2010. Para determinar el UC de los cultivos se utilizó el método de Hargreaves y se realizó un ajuste con el método de Penman-Monteith. Una vez obtenido el UC del clima base, un ensamble de 11 modelos de circulación general se utilizó para generar los escenarios climáticos. Los resultados indican que el UC del frijol, maíz, alfalfa, chile y ajo podría aumentar hasta 64.8, 78.3, 190.6, 73.2 y 50.2 mm, respectivamente, en el RCP 8.5 en 2070. Ello implica más demanda del recurso hídrico.

**Palabras clave:** Uso consuntivo, Hargreaves, Penman-Monteith, frijol, maíz, alfalfa.



## Introduction

Currently, climate change represents one of the main problems faced by agriculture due to disturbances produced in climate patterns and, therefore, in climate variables related to the management of agricultural activities. Furthermore, crop yield is very irregular due to biotic and abiotic factors during crop development. Extreme temperatures and water availability are two dominant abiotic stressors (Ruiz et al., 2011; Tinoco et al., 2011; IPCC, 2014; Medina-García et al., 2016).

In addition to vulnerability related to climate conditions, climate change variability can have direct effects on precipitation. This is the only source of water income in any region of the world. A modification of the components of the hydrological cycle, mainly evapotranspiration and precipitation, will have a radical effect on irrigation water demands and on the management of irrigation systems (Ojeda-Bustamante et al., 2011; Servín, 2015). As a result, studies on climate change and its impact on agriculture have been carried out, but few have analyzed the effects of climate change on crop water demand when considering future scenarios.

Greenhouse gases (GHG) are gases present in the Earth's atmosphere that give rise to the phenomenon known as the "greenhouse effect". Their concentration in the atmosphere is small but play a key role in increasing the temperature of the air near the ground, making it remain in a range of values suitable for the existence of living beings on the planet. GHGs due to human activities and the consequent enhancement of the greenhouse effect are one of the probable causes of temperature increase. (González-Estrada & Camacho, 2017).

GHG emissions scenarios are used in climate research to provide descriptions of how the future may evolve in relation to a range of variables including socioeconomic change, technological change, energy and land use, GHG emissions and air pollutants. These scenarios are used as input for running climate models and as a basis for assessing climate impacts and possible mitigation options and associated costs (Van Vuuren et al., 2011).

To understand the effect of GHGs and apply possible adaptation measures, the International Panel on Climate Change (IPCC) established reference emission scenarios based on these scenarios, which are used to make projections. Currently, Representative Concentration Pathways (RCP's) scenarios are involved in the projections (IPCC, 2014). The emissions scenarios start from four different GHG RCP's, called RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 and RCP 8.5, because they describe the relationships between the main

## Introducción

Actualmente, el cambio climático representa uno de los problemas principales que enfrenta la agricultura, debido a las alteraciones que causa en los patrones climáticos y, por lo tanto, en las variables climáticas relacionadas con el manejo de las actividades agrícolas. Además, la productividad de los cultivos es muy errática debido a factores bióticos y abióticos que se presentan durante su desarrollo. Las temperaturas extremas y la disponibilidad del agua son dos de los factores de estrés abióticos dominantes (Ruiz et al., 2011; Tinoco et al., 2011; IPCC, 2014; Medina-García et al., 2016).

Además de la vulnerabilidad asociada a las condiciones del clima, la incertidumbre del cambio climático puede tener efectos directos sobre la precipitación. Esta es la única fuente de ingresos de agua en cualquier región del mundo. La modificación de los componentes del ciclo hidrológico, principalmente de la evapotranspiración y la precipitación, tendrá un efecto radical en las demandas de agua para riego y en la gestión de los sistemas de riego (Ojeda-Bustamante et al., 2011; Servín, 2015). Debido a ello, estudios sobre el cambio climático y su impacto en la agricultura se han realizado, pero pocos han analizado los efectos del cambio climático sobre la demanda de agua en los cultivos al considerar escenarios futuros.

Los gases de efecto invernadero (GEI) son gases que se encuentran presentes en la atmósfera terrestre y que dan lugar al fenómeno denominado "efecto invernadero". Su concentración en la atmósfera es pequeña, pero tienen una importancia fundamental en el aumento de la temperatura del aire próximo al suelo, haciéndola permanecer en un rango de valores aptos para la existencia de seres vivos en el planeta. Los GEI debidos a actividades humanas y la consecuente potenciación del efecto invernadero conforman una de las causas probables del aumento de la temperatura (González-Estrada & Camacho, 2017).

Los escenarios de emisiones de GEI se utilizan en la investigación climática para proporcionar descripciones de cómo puede evolucionar el futuro con respecto a una gama de variables que incluyen el cambio socioeconómico, el cambio tecnológico, el uso de energía y tierra, las emisiones de GEI y contaminantes del aire. Dichos escenarios se utilizan como insumo para la ejecución de modelos climáticos y como base para la evaluación de impactos climáticos y opciones de mitigación posibles y los costos asociados (Van Vuuren et al., 2011).

Para entender el efecto de los GEI y aplicar posibles medidas de adaptación, el International Panel on Climate Change (IPCC) estableció los escenarios de emisiones de referencia con base en los cuales se

demographic, economic and technological forces that determine future GHG emissions. The first is a small emissions trajectory, the second and third are intermediate emissions trajectories, and the fourth is a large emissions trajectory (Van Vuuren et al., 2011).

Climate, crop characteristics, management and growing environment are factors affecting evaporation and transpiration. Potential evapotranspiration (ET<sub>p</sub>) is the combination of two processes; one in which water evaporates from soil surface by evaporation and the other consists of transpiration of the cultivated plants. Knowing the water needs of the species is the fundamental basis for efficient water resource management, so that the crop has no water limitations or excesses during development (Allen et al., 2006).

Climate change is having a considerable impact on the availability of water resources for agricultural production because water scarcity is disrupting the stability and sustainability of agricultural production. Projections from global climate model ensembles predict that by the 2050s, increased crop water demand and intensified ET<sub>p</sub> as a result of global warming will reduce surplus water resources by 4-24 % and significantly increase irrigation water demand during crop growing periods (Xing-Guo et al., 2017).

Crops grown under irrigated conditions in Zacatecas depend mainly on groundwater and their availability is limited (Carrillo-Martínez et al., 2021). This has caused the region's aquifers to be overexploited; an average depletion rate of 1.9 m per year has been recorded (Hernández et al., 2012; Ávila et al., 2012; Carrillo-Martínez et al., 2021). Due to the above, aquifers present a pronounced depletion trend for the year 2050 (Junes et al., 2013).

Several methods have been developed over time to estimate water requirements of species. These methods are classified as direct and indirect. The former directly provide the total water consumption required; devices and instruments are used for measurement. In the latter, crop water requirements are found indirectly through the use of empirical formulas based on meteorological data (Vega, 1982).

ET<sub>p</sub> is a requirement for estimating water requirements. Calculation is made with different empirical methods because they include climate data, such as temperature, radiation or sunshine hours. Some of them are the methods of Thornwaite, Hargreaves and Samani, Turc, Blaney and Criddle; the most used is the FAO Penman-Monteith method (Monteith, 1981), which solves energy balance, but requires more meteorological variables such as temperature, wind speed, solar radiation and relative humidity. Different

realizan las proyecciones. Actualmente, los escenarios de Trayectorias de Concentración Representativas (RCP's, por sus siglas en inglés) se involucran en las proyecciones (IPCC, 2014). Los escenarios de emisiones parten de cuatro diferentes RCP's de GEL, denominadas RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5, porque describen las relaciones entre las principales fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas que determinan las emisiones futuras de los GEL. La primera es una trayectoria de emisiones pequeñas, la segunda y la tercera son trayectorias de emisiones intermedias y la cuarta es una trayectoria de emisiones grandes (Van Vuuren et al., 2011).

El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evaporación y la transpiración. La evapotranspiración potencial (ET<sub>p</sub>) es la combinación de dos procesos; uno en el que el agua se evapora desde la superficie del suelo por evaporación y otro consiste en la transpiración de las plantas cultivadas. El conocimiento de las necesidades hídricas de las especies constituye la base fundamental para realizar un manejo eficiente del recurso agua, de tal forma que el cultivo no tenga limitaciones o excesos de agua durante su desarrollo (Allen et al., 2006).

El cambio climático está teniendo un impacto considerable sobre la disponibilidad de recursos hídricos para la producción agrícola, porque la escasez de agua está perturbando la estabilidad y sostenibilidad de la producción agrícola. Las proyecciones de ensambles de modelos climáticos globales predicen que, en el decenio de 2050, el aumento de la demanda de agua por los cultivos y la ET<sub>p</sub> intensificada como resultado del calentamiento global reducirán el excedente de recursos hídricos entre 4 y 24 % y aumentarán significativamente la demanda de agua de riego en los períodos de crecimiento de los cultivos (Xing-Guo et al., 2017).

Los cultivos producidos en condiciones de riego en el estado de Zacatecas dependen principalmente del agua subterránea y su disponibilidad es limitada (Carrillo-Martínez et al., 2021). Esto ha provocado que los acuíferos de la región estén sobreexplotados; una tasa de abatimiento promedio de 1.9 m por año se ha registrado (Hernández et al., 2012; Ávila et al., 2012; Carrillo-Martínez et al., 2021). Debido a lo anterior, los acuíferos presentan una tendencia de abatimiento pronunciado para el año 2050 (Junes et al., 2013).

A través del tiempo se han desarrollado diversos métodos para estimar los requerimientos hídricos de las especies. Estos métodos se clasifican en directos e indirectos. Los primeros proporcionan de manera directa el consumo total de agua requerida; para su medición se usan aparatos e instrumentos. En los segundos, las

ETo estimation methods have been compared with the Penman-Monteith method (Jensen et al., 1990; Almorox et al., 2012; Ocampo & Rivas 2011; Djaman et al., 2015). Results have shown that for arid and semi-arid zones the Hargreaves equation provides a better approximation to the FAO Penman-Monteith method.

In 2019, the total agricultural area in the state of Zacatecas was 1'051 224ha. A total of 153 660 ha was under irrigated conditions (14.6 %) and 897 564 ha under rainfed conditions (85.4 %). Crops with the largest area grown under irrigated conditions in Zacatecas were dry pepper, 28 505 ha; maize, 26 646 ha; and beans, 21330 ha, during the spring-summer cycle; as well as alfalfa, 16169 ha as a perennial crop, while in the autumn-winter cycle there were 2878 ha with garlic. These five crops accounted for 62.2 % of the total irrigated agricultural area (SIAP, 2021).

The effects of climate change on water demand for pepper, beans, maize, garlic and alfalfa grown under irrigated conditions in Zacatecas are unknown when considering future scenarios. Therefore, the objectives of this study were to estimate the possible effect of climate change on water demand of the main crops grown under irrigation conditions in Zacatecas when considering future scenarios, and to propose some adaptation measures.

## Materials and Methods

This study was carried out regarding important crops under irrigation conditions in Zacatecas. These crops were maize, beans, pepper, garlic and alfalfa. Different ETo estimation methods have been compared with the Penman-Monteith method (Jensen et al., 1990; Almorox et al., 2012; Ocampo & Rivas 2011; Djaman et al., 2015). Results have shown that for arid and semi-arid zones the Hargreaves equation achieves a better approximation to the FAO Penman-Monteith method and with a low information requirement, which is important when few climate variables are available. Therefore, the Hargreaves method was used for this study. The Hargreaves formula (Hargreaves & Samani, 1982) requires only temperature and solar radiation data; the general expression is as follows:

$$ETo = 0.0023(TMed + 17.78)Ro*(Tmax - TMin)^{0.5}$$

where:

ETo= Potential daily evapotranspiration in mm.

Ro = Extraterrestrial solar radiation in mm·day<sup>-1</sup>. (Tables from Allen et al., 1998)

TMean = Monthly mean temperature.

TMax = Monthly mean maximum temperature.

TMin = Monthly mean minimum temperature.

necesidades hídricas del cultivo se obtienen de manera indirecta mediante el uso de fórmulas empíricas fundamentadas en datos meteorológicos (Vega, 1982).

La ETo es un requisito para estimar los requerimientos hídricos. Su cálculo se hace con métodos empíricos diferentes porque incluyen datos climáticos, como temperatura, radiación u horas sol. Algunos de ellos son los métodos de Thornwaite, Hargreaves y Samani, Turc, Blaney y Criddle; el más utilizado es el método FAO Penman-Monteith (Monteith, 1981), el cual resuelve el balance de energía, pero requiere más variables meteorológicas como la temperatura, velocidad del viento, radiación solar y humedad relativa. Diferentes métodos de estimación de la ETo se han comparado con el método de Penman-Monteith (Jensen et al., 1990; Almorox et al., 2012; Ocampo & Rivas 2011; Djaman et al., 2015). Los resultados han mostrado que para zonas áridas y semiáridas la ecuación de Hargreaves logra una mejor aproximación al método de la FAO Penman-Monteith.

En el año 2019, la superficie total agrícola en el estado de Zacatecas fue de 1'051 224 ha. De ellas, 153 660 ha estuvieron en condiciones de riego (14.6 %) y 897 564 ha en condiciones de secano o temporal (85.4 %). Los cultivos con mayor superficie sembrada en condiciones de riego en el Estado fueron chile seco, 28 505 ha; maíz, 26 646 ha; y frijol, 21 330 ha, durante el ciclo primavera verano; así como alfalfa, 16 169 ha como cultivo perene; mientras que en el ciclo otoño invierno hubo 2 878 ha con ajo. Estos cinco cultivos representaron 62.2 % del total de la superficie agrícola en condiciones de riego (SIAP, 2021).

Cómo serán los efectos del cambio climático sobre la demanda de agua del chile, frijol, maíz, ajo y alfalfa cultivados en condiciones de riego en el estado de Zacatecas, se desconocen al considerar escenarios futuros. Por lo tanto, los objetivos de este estudio fueron estimar el posible efecto del cambio climático sobre la demanda de agua de los principales cultivos en condiciones de riego en el estado de Zacatecas al considerar escenarios futuros, así como proponer algunas medidas de adaptación.

## Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo considerando los cultivos importantes en condiciones de riego en el estado de Zacatecas. Dichos cultivos fueron maíz, frijol, chile, ajo y alfalfa. Métodos de estimación de la ETo diferentes se han comparado con el método de Penman-Monteith (Jensen et al., 1990; Almorox et al., 2012; Ocampo & Rivas 2011; Djaman et al., 2015). Los resultados han mostrado que para zonas áridas y semiáridas la ecuación de Hargreaves logra una mejor

The above formula was applied using the IDRISI Geographic Information System (GIS) for the baseline period of 1981-2010 (Figure 1).

Because the Penman-Monteith method is more exact than the Hargreaves method (Jensen et al., 1990), ETo was estimated with the first method and then related to data from the second method. The latter data came from 38 automatic weather stations of the network of stations from the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) in Zacatecas; these stations automatically record the Penman-Monteith ETo. An adjustment was made to the Hargreaves Eto using the regression model.

As was done for the baseline period, the same procedure was followed to estimate the effect of climate change and the Climate Change Information System of Mexico (SICCRM) from INIFAP was used (Ruiz et al., 2016). This system consists of the baseline period for 1981-2010 and data for the years 2041 to 2080 in GHG RCPs 4.5 and 8.5. These data were obtained from information from the WorldClim Global Change data portal. With this data, a model ensemble integrated by 11 downscaled and calibrated General Circulation Models (Walton et al., 2013), selected for Mexico, was generated (BCC-CSM1-1, CCSM4, GISS-E2-R, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, IPSLCM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, MIROC-ESM, MIROC5, MRI-CGCM3, NorESM1-M).

An intermediate emissions RCP (4.5) was selected because it is consistent with a future of moderate emissions and a large emissions RCP (8.5) was also used because it is consistent with a future with no policy changes to reduce emissions (Van Vuuren et al., 2011). The maximum and minimum temperature values for the years 2041-2080 were used. With the monthly data, cycles and annuals were obtained for the 2041-2060 and 2061-2080 scenarios, hereafter referred to as climate or years 2050 and 2070, respectively.

aproximación al método de la FAO Penman-Monteith y con un requerimiento de poca información, lo cual es importante cuando se dispone de pocas variables climáticas. Por ello, el método de Hargreaves se usó en este trabajo. La fórmula de Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1982) solo necesita datos de temperaturas y radiación solar; la expresión general es la siguiente:

$$ETo = 0.0023(TMed + 17.78)Ro*(Tmax - TMin)^{0.5}$$

donde:

ETo=Evapotranspiración potencial diaria en mm.

Ro = Radiación solar extraterrestre en mm·día<sup>-1</sup>. (Tablas de Allen et al., 1998)

TMed = Temperatura media mensual.

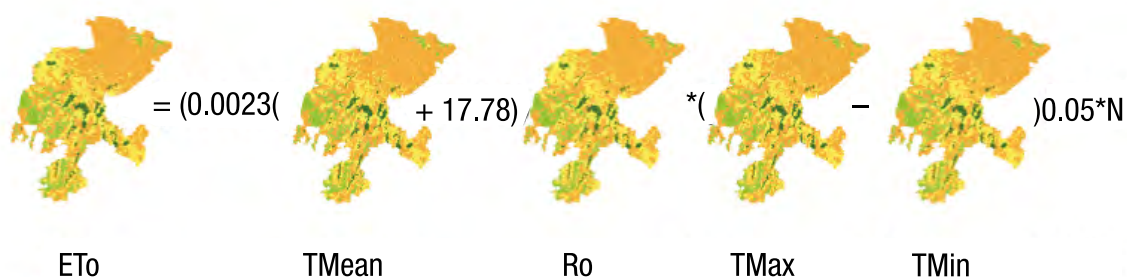
TMax = Temperatura máxima media mensual.

TMin = Temperatura mínima media mensual.

La fórmula anterior se aplicó utilizando el Sistema de Información Geográfica (SIG) IDRISI para el clima base del periodo 1981-2010 (Figura 1)

Dado que el método Penman-Monteith es más preciso que el método de Hargreaves (Jensen et al., 1990), la ETo se estimó con el primer método y luego se relacionó con los datos del segundo método. Estos últimos datos provienen de 38 estaciones meteorológicas automáticas de la red de estaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en Zacatecas; dichas estaciones registran automáticamente la ETo de Penman-Monteith. Con el modelo de regresión obtenido se hizo un ajuste a la ETo de Hargreaves.

De igual manera que se hizo para el clima base, el mismo procedimiento se siguió para estimar el efecto del cambio climático y el Sistema de Información de Cambio Climático de la República Mexicana (SICCRM) del INIFAP se utilizó (Ruiz et al., 2016). Dicho sistema consta del clima base del periodo 1981-2010 y datos de



**Figure 1. A diagram of the ETo calculation procedure.**

**Figura 1. Esquema del procedimiento de cálculo de la ETo.**

Eto adjusted by Penman-Monteith was found for the baseline period and for the 2050 and 2070 climates in RCP 4.5 and 8.5. The UCs of the five selected crops were estimated using the following procedure (Allen et al., 1989):

$$ET_c = K_c * ETo$$

where:

ET<sub>c</sub> = Evapotranspiration

K<sub>c</sub> = Crop coefficient

ETo = Potential evapotranspiration

Table 1 shows the crop coefficients used and the sowing dates and crop cycles included in this study (Table 2). UCs per month and total for the cycle were determined by using the IDRISI Geographic Information System.

los años 2041 a 2080 en los RCP 4.5 y 8.5 de los GEI. Estos datos fueron obtenidos a partir de información del portal de datos de Cambio Global de WorldClim. Con ellos se generó un modelo ensamble integrado por 11 Modelos de Circulación General reducidos en escala y calibrados (Walton et al., 2013), seleccionados para México (BCC-CSM1-1, CCSM4, GISS-E2-R, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, IPSLCM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, MIROC-ESM, MIROC5, MRI-CGCM3, NorESM1-M).

Un RCP de emisiones intermedias (4.5) se seleccionó por ser consistente con un futuro de emisiones moderadas y un RCP de emisiones grandes (8.5) también se usó porque es coherente con un futuro sin cambios de política para reducir las emisiones (Van Vuuren et al., 2011). Los valores de temperatura máxima y temperatura mínima de los años 2041-2080

**Table 1. KC crop coefficients per phenological stage included in the study.**

**Cuadro 1. Coeficientes de cultivo KC por etapa fenológica considerados en el estudio.**

| Crop/Cultivo | Phenological stage/Etapa fenológica |                        |                          |                  |
|--------------|-------------------------------------|------------------------|--------------------------|------------------|
|              | Growth/Crecimiento                  | Development/Desarrollo | Fruit growth/Crec. fruto | Ripeness/Madurez |
| Maize/Maíz   | 0.40                                | 0.70                   | 1.00                     | 0.88             |
| Beans/Frijol | 0.40                                | 0.70                   | 0.90                     | 0.60             |
| Pepper/Chile | 0.40                                | 0.75                   | 0.85                     | 0.60             |
| Garlic/Ajo   | 0.30                                | 0.60                   | 0.80                     | 0.60             |

Source: Bravo et al. (2006).

Fuente: Bravo et al. (2006).

**Table 1. (continued). Kc coefficients of alfalfa crop.**

**Cuadro 1 (continuación). Coeficientes Kc del cultivo de alfalfa.**

| Month/Mes | E    | F    | M    | A    | M    | J    | J    | A    | S    | O    | N    | D    |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Kc        | 0.65 | 0.75 | 0.85 | 1.00 | 1.10 | 1.13 | 1.12 | 1.08 | 1.00 | 0.90 | 0.80 | 0.65 |

Source: Villanueva et al. 2001.

Fuente: Villanueva et al. 2001.

**Table 2. Sowing dates in the study.**

**Cuadro 2. Fechas de siembra consideradas en el estudio.**

| Crop/Cultivo | Date of sowing/ Fecha de siembra | Crop cycle/Ciclo del cultivo | Month/Meses                |
|--------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Maize/Maíz   | May 1st/01-may                   | May-Sep/may-sep              | 5                          |
| Beans/Frijol | June 1st/01-jun                  | June-Sep/jun-sep             | 4                          |
| Pepper/Chile | May 1st/01-may                   | May-Sep/may-sep              | 5                          |
| Garlic/Ajo   | Oct 1st/01-oct                   | Oct-Apr/oct-abril            | 7                          |
| Alfalfa      | Jan 1st/01-ene                   | All year long/ Todo el año   | All year long/ Todo el año |

Source: Medina et al. 2016.

Fuente: Medina et al. 2016.

Finally, the analysis of water demand per crop was carried out with UC and average precipitation for sown area, involving the climatic scenarios reported.

## Results and Discussion

### Adjusted potential evapotranspiration

As mentioned, the Hargreaves method is the one recommended by FAO-56 (Allen et al., 2006) when there are insufficient data to apply the Penman-Monteith method and only temperature data are available. As a result of the relationship between ETo Hargreaves and Penman-Monteith, the model shown in Figure 2 was generated. This agrees with the results of Almorox et al. (2012), who performed a calibration of the Hargreaves method in relation to the Penman-Monteith method. They found a good correlation between both methods; moreover, they concluded that the Hargreaves method is very suitable for areas where few climate variables are available.

The resulting model was used to adjust the Hargreaves ETo estimated with the SICCRM database. This model was generated with data from the Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) stations to finally obtain Hargreaves ETo adjusted by Penman-Monteith.

### Consumptive use of crops

**Beans.** CU values and water demand analysis for bean crop in the June-September cycle are shown in Table 3. Values were obtained only for the irrigated agricultural areas where most of this crop is grown. The CU in the current scenario resulted to be 460.2 mm, which is similar to that recorded by González et al. (2017), who

se utilizaron. Con los datos mensuales se obtuvieron los ciclos y los anuales para los escenarios 2041-2060 y 2061-2080, en adelante referidos como clima o años 2050 y 2070, respectivamente.

La ETo ajustada por Penman-Monteith se obtuvo para el clima base y para los climas 2050 y 2070 en los RCP 4.5 y 8.5, con los cuales se estimaron los UC de los cinco cultivos seleccionados siguiendo el siguiente procedimiento (Allen et al., 1989):

$$ETc = Kc \cdot ETo$$

donde:

ETc = Evapotranspiración

Kc = Coeficiente del cultivo

ETo = Evapotranspiración potencial

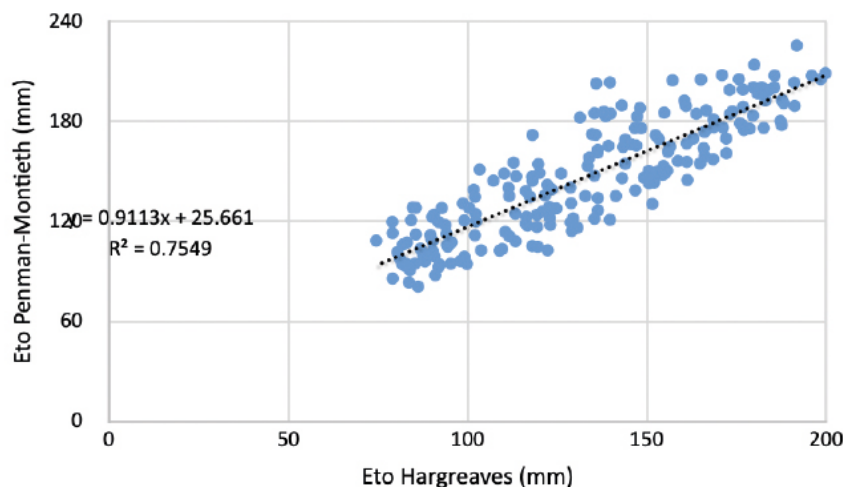
En el Cuadro 1 se presentan los coeficientes de los cultivos utilizados y las fechas de siembra y ciclos de cultivo que se consideraron en este estudio (Cuadro 2). Los UC'ss por mes y el total del ciclo se obtuvieron mediante el uso del Sistema de Información Geográfica IDRISI.

Finalmente, el análisis de la demanda de agua por cultivo se realizó con el UC y la precipitación promedio para la superficie sembrada, al involucrar los escenarios climáticos consignados.

## Resultados y discusión

### Evapotranspiración potencial ajustada

Como se ha mencionado, el método de Hargreaves es el recomendado por la FAO-56 (Allen et al., 2006) cuando



**Figure 2. A regression model between ETo estimated with the Hargreaves method and the Penman-Monteith method with data from 38 INIFAP automatic weather stations.**

**Figura 2. Modelo de regresión entre la ETo estimada con el método Hargreaves y el método Penman-Monteith con los datos de 38 estaciones meteorológicas automáticas del INIFAP.**

**Table 3. Consumptive use and water deficit for bean crop in May-August cycle in irrigated agricultural areas under different climate scenarios in the high plateau of Zacatecas.**

**Cuadro 3. Uso consuntivo y déficit hídrico para el cultivo de frijol en el ciclo mayo-agosto en las áreas agrícolas de riego en diferentes escenarios climáticos en el altiplano del estado de Zacatecas.**

| RCP |                    | CU<br>(mm)/<br>UC<br>(mm) | PP<br>(mm) | Deficit<br>(mm)/<br>Déficit<br>(mm) | SS<br>(ha) | CUSS<br>(Mm <sup>3</sup> )/<br>UCSS<br>(Mm <sup>3</sup> ) | DSS<br>(Mm <sup>3</sup> ) |
|-----|--------------------|---------------------------|------------|-------------------------------------|------------|---|---------------------------|
|     | Current/<br>Actual | 460.2                     | 263.3      | 196.9                               | 21,330     | 98.16   | 42.00                     |
| 4.5 | 2050               | 489.4                     | 256.8      | 232.7                               | 21,330     | 104.39  | 49.63                     |
|     | 2070               | 493.9                     | 254.0      | 239.8                               | 21,330     | 105.35  | 51.15                     |
| 8.5 | 2050               | 497.2                     | 175.6      | 321.6                               | 21,330     | 106.05  | 68.60                     |
|     | 2070               | 525.0                     | 173.0      | 351.9                               | 21,330     | 111.98  | 75.06                     |

CU= Consumptive use of crop. PP=Precipitation. Deficit=CU-PP. SS=Sown area. CUSS=Consumptive use per sown area. DSS=Deficit per sown area.

UC=Uso consuntivo del cultivo. PP=Precipitación. Déficit=UC-PP. SS=Superficie sembrada. UCSS=Uso consuntivo por superficie sembrada. DSS=Déficit por superficie sembrada.

determined a CU for the bean crop of 484 mm, while Rosales and Gallardo (2017) mention that the bean crop needs a CU of 300 to 500 mm. Although experimental studies showed greater water use efficiency with laminae between 425 and 450 mm. In the 2050 and 2070 climates of RCP 4.5, increases of 29.2 and 33.7 mm, respectively, were estimated for the CU of beans regarding the current climate. While in the 2050 and 2070 scenarios from RCP 8.5, an increase in bean CU of 37.0 and 64.8 mm, respectively, regarding the baseline period was estimated for the 2050 and 2070 scenarios from RCP 8.5. Figure 3 shows the CU maps of the current and future scenarios in RCP 4.5 for the irrigated bean crop.

Precipitation occurring in agricultural areas where beans are grown was subtracted from UC to estimate the deficit in each scenario, since the deficit would be zero if it would rain as much as the crop demands. In this case, the deficit went from 196.9 mm in the current scenario to more than 300 mm in the RCP 8.5 scenarios. This may be because precipitation decreases from 263.3 mm in the current scenario to 173.0 in the year 2070 from RCP 8.5. When considering an area (21 330 ha) sown with beans under irrigated conditions, the deficit in the current scenario is 42.00 Mm<sup>3</sup>, changing to 51.15 Mm<sup>3</sup> in the scenario of 2070 of RCP 4.5 and to 77.06 Mm<sup>3</sup> in 2070 from RCP 8.5; this implies an increase of 78.7 %. These data indicate that greater care must necessarily be taken with water to try to reduce the deficit, either with more efficient irrigation systems or with bean varieties that need less water during growth.

**Maize.** CU values and water demand analysis for maize crop for the period of May-September are shown

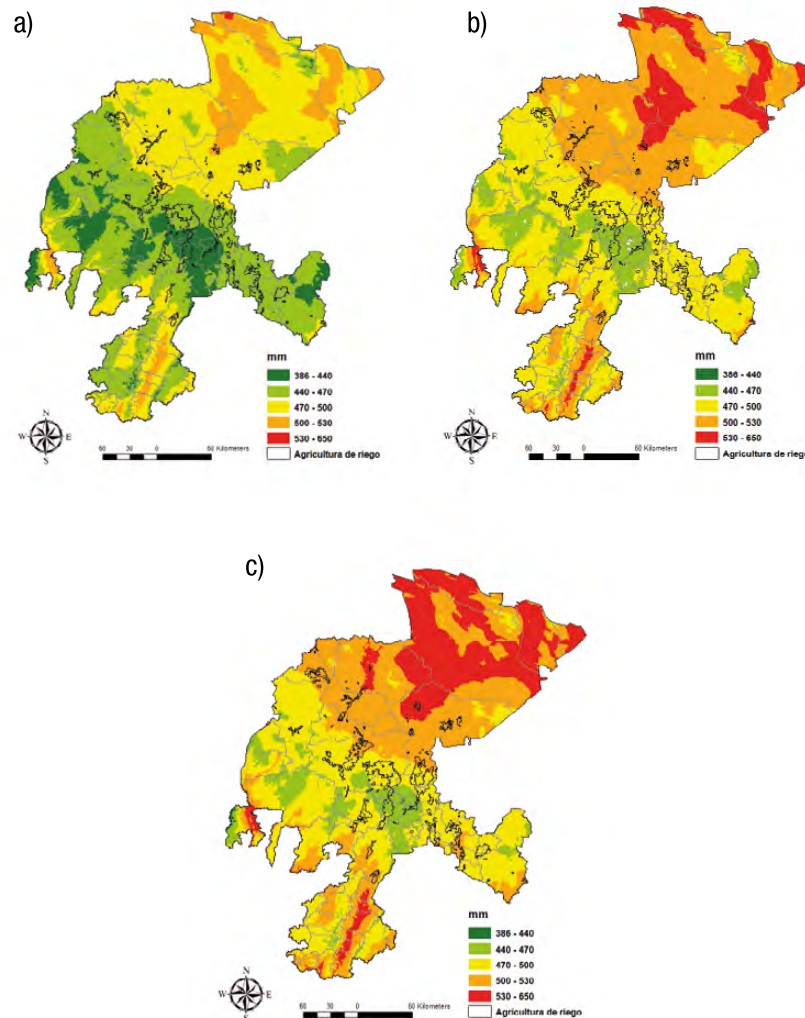
hay datos insuficientes para aplicar el de Penman-Monteith y solo se dispone de datos de temperatura. Como resultado de la relación entre ETo Hargreaves y Penman Monteith se generó el modelo presentado en la Figura 2. Este modelo muestra la relación entre los dos métodos de estimación. Esto concuerda con los resultados de Almorox et al. (2012), quienes realizaron una calibración del método de Hargreaves con relación al método de Penman-Monteith. Ellos encontraron que existe una buena correlación entre ambos métodos; además, concluyeron que el método de Hargreaves es muy adecuado para zonas donde se dispone de pocas variables climáticas.

Con el modelo resultante se ajustó la ETo de Hargreaves estimada con la base de datos del SICCRM. Dicho modelo se generó con datos de las estaciones de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para finalmente obtener ETo de Hargreaves ajustada por Penman-Monteith.

#### Uso consuntivo de los cultivos

**Frijol.** Los valores del UC y el análisis de la demanda de agua para el cultivo de frijol en el ciclo junio-septiembre, se presentan en el Cuadro 3. Los valores que se presentan se obtuvieron solo para las áreas agrícolas de riego donde se siembra la mayor parte de este cultivo. El UC en el escenario actual resultó ser 460.2 mm, lo cual es similar a lo consignado por González et al. (2017), quienes determinaron un UC para el cultivo de frijol de 484 mm, mientras que Rosales y Gallardo (2017) mencionan que el cultivo de frijol requiere un UC de 300 a 500 mm. Aunque en trabajos experimentales se ha encontrado una mayor eficiencia del uso de agua con láminas entre 425 y 450 mm. En los climas 2050 y 2070 del RCP





**Figure 3. Consumptive use of bean crop in the baseline period (A), and 2050 (B) and 2070 (C) climates of RCP 4.5.**  
**Figura 3. Uso consuntivo del cultivo de frijol en el clima base (A), y climas 2050 (B) y 2070 (C) del RCP 4.5.**

in Table 4. CU of maize for the baseline period is 587.5 mm. This agrees with that reported by Garcia et al. (2016), who reported a CU for maize of 570 mm, although Villanueva et al. (2001) determined a CU of 550 mm, while Martinez (1999) mentions that maize crops need a CU of 610 mm to have a yield of 10 t·ha<sup>-1</sup>. For the Irrigation Districts (ID), CONAGUA (2010) reports a CU of 670 mm in maize crops, although this value is the national average. The variation of crop CU depends mainly on the study zones and the phenology of varieties.

CU of maize was estimated with an increase of 34.5 and 40.5 mm in the climates of 2050 and 2070 of RCP 4.5, respectively; while CU of maize was estimated with an increase of 50.6 and 78.3 mm, respectively, for climates of 2050 and 2070 from RCP 8.5. Precipitation occurring in agricultural areas where maize is grown

4.5 se estimaron aumentos de 29.2 y 33.7 mm, respectivamente, en el UC del frijol con respecto al clima actual. Mientras que en los escenarios 2050 y 2070 del RCP 8.5 se estimó un aumento en el UC del frijol de 37.0 y 64.8 mm, respectivamente, con respecto al clima base. En la Figura 3 se presentan los mapas del UC del escenario actual y los futuros en el RCP 4.5 para el cultivo de frijol de riego.

Al UC se le restó la precipitación que ocurre en las áreas agrícolas de riego donde se siembra el frijol para estimar el déficit que existe en cada escenario, ya que el déficit sería cero si lloviera lo mismo que demanda el cultivo. En este caso el déficit pasó de 196.9 mm en el escenario actual a más de 300 mm en los escenarios del RCP 8.5. Esto puede deberse a que la precipitación disminuye de 263.3 mm en el escenario actual a 173.0 en el año 2070 del RCP 8.5.

was subtracted from UC to estimate the deficit for each scenario. In this case, the deficit went from 208.8 mm in the baseline period and to 375.2 mm in the 2070 climate from RCP 8.5. This may be due to precipitation decreasing from 378.6 to 290.5 mm. The deficit was estimated with an increase of up to 79.7 %, regarding the area (26 646 ha) sown with maize for the baseline period, which is 55.65 Mm<sup>3</sup>, changing to 68.54 Mm<sup>3</sup> for the scenario of 2070 of RCP 4.5 and to 99.98 Mm<sup>3</sup> for the scenario of 2070 from RCP 8.5.

**Alfalfa.** UC values and water demand analysis for alfalfa crop were estimated for the irrigated areas where this crop is grown (Table 5). UC of alfalfa for the baseline period in the irrigated area of Zacatecas was estimated at 1 715.3 mm, resulting higher than that reported by Rosales and Gallardo (2017), who reported a UC of 1,600 mm; while Sánchez et al. (2017) indicate that the alfalfa crop needs a UC of 1,322 mm, although other researchers such as Montemayor et al. (2010) have found a UC of 1,160 mm. For the Irrigation Districts, CONAGUA (2010) reports a UC of 1,350 mm, as a national average. The variation of UC for alfalfa, like that of the other crops, depends mainly on the study areas and phenology of varieties.

UC of alfalfa was estimated with an increase of 104.3 mm for the scenario of 2050 of RCP 4.5; for the scenario of 2070 an increase of 126.8 mm was estimated; while UC was estimated with an increase of 109.4 and 190.6 mm, respectively, for the scenarios of 2050 and 2070 from RCP 8.5. Precipitation occurring in agricultural areas where alfalfa is grown was subtracted from UC to estimate the deficit for each scenario. In this case, the deficit went from 1,249.1 mm in the base scenario to 1,471.4 mm in the scenario of 2070 fro

Al considerar una superficie sembrada con frijol en condiciones de riego de 21 330 ha, el déficit en el escenario actual es de 42.00 Mm<sup>3</sup>, pasando a 51.15 Mm<sup>3</sup> en el 2070 del RCP 4.5 y a 77.06 Mm<sup>3</sup> en el 2070 del RCP 8.5; ello implica un aumento de 78.7 %. Estos datos indican que necesariamente se debe tener un mayor cuidado con el agua para tratar de disminuir el déficit, ya sea con sistemas de riego más eficientes o con variedades de frijol que requieran menor cantidad de agua durante su desarrollo.

**Maíz.** Los valores del UC y el análisis de la demanda de agua para el cultivo de maíz en el periodo mayo-septiembre se presentan en el Cuadro 4. El UC del cultivo de maíz para el clima base es de 587.5 mm. Ello coincide con lo consignado por García et al. (2016), quienes informaron un UC para el cultivo de maíz de 570 mm, aunque Villanueva et al. (2001) determinaron un UC de 550 mm, mientras que Martínez (1999) menciona que el cultivo de maíz requiere un UC de 610 mm para obtener un rendimiento de 10 t·ha<sup>-1</sup>. Para los Distritos de Riego (DR), la CONAGUA (2010) reporta un UC de 670 mm en el cultivo de maíz, aunque este valor es la media nacional. La variación del UC de los cultivos depende principalmente de las zonas de estudio y de la fenología de las variedades.

El UC del cultivo de maíz se estimó con un aumento de 34.5 y 40.5 mm en los climas 2050 y 2070 del RCP 4.5, respectivamente; mientras que el UC del maíz se estimó con un aumento de 50.6 y 78.3 mm, respectivamente, para los climas 2050 y 2070 del RCP 8.5. Al UC se le restó la precipitación que ocurre en las zonas agrícolas donde se cultiva el maíz para estimar el déficit para cada escenario. En este caso, el déficit pasó de 208.8 mm en el clima base y a 375.2 mm en el clima 2070

**Table 4. Consumptive use and water deficit for maize crop in the May-September cycle for irrigated agricultural areas under different climate scenarios in Zacatecas.**

**Cuadro 4. Uso consuntivo y déficit hídrico para el cultivo de maíz en el ciclo mayo-septiembre en las áreas agrícolas de riego en diferentes escenarios climáticos en el estado de Zacatecas.**

| RCP | Scenario/<br>Escenario | CU<br>(mm)/<br>UC<br>(mm) | PP<br>(mm) | Deficit<br>(mm)/<br>Déficit<br>(mm) | SA (ha)/<br>SS (ha) | CUSA (Mm <sup>3</sup> )/<br>UCSS (Mm <sup>3</sup> ) | DSA<br>(Mm <sup>3</sup> )/<br>DSS<br>(Mm <sup>3</sup> ) |
|-----|------------------------|---------------------------|------------|-------------------------------------|---------------------|---|---|
|     | Current                | 587.5                     | 378.6      | 208.8                               | 26,646              | 156.54  | 55.65   |
| 4.5 | 2050                   | 622.0                     | 372.0      | 250.0                               | 26,646              | 165.74  | 66.61   |
|     | 2070                   | 627.9                     | 370.8      | 257.2                               | 26,646              | 167.32  | 68.54   |
| 8.5 | 2050                   | 638.1                     | 294.7      | 343.4                               | 26,646              | 170.02  | 91.50   |
|     | 2070                   | 665.7                     | 290.5      | 375.2                               | 26,646              | 177.39  | 99.98   |

CU= Consumptive crop use. PP=Precipitation. Deficit=UC-PP. SA=Sown area. CUSA=Consumptive use per sown area. DSA=Deficit per sown area.

UC=Uso consuntivo del cultivo. PP=Precipitación. Déficit=UC-PP. SS=Superficie sembrada. UCSS=Uso consuntivo por superficie sembrada. DSS=Déficit por superficie sembrada.

**Table 5. Consumptive use and water deficit for alfalfa in irrigated agricultural areas under different climate scenarios in Zacatecas.****Cuadro 5. Uso consuntivo y déficit hídrico para el cultivo de alfalfa en las áreas agrícolas de riego en diferentes escenarios climáticos en el estado de Zacatecas.**

| RCP | Scenario/<br>Escenario | UC (mm) | Pp (mm) | Deficit (mm)/<br>Déficit (mm) | SA (ha)/<br>SS (ha) | UCSA (Mm <sup>3</sup> )/<br>UCSS (Mm <sup>3</sup> ) | DSA (Mm <sup>3</sup> )/<br>DSS (Mm <sup>3</sup> ) |
|-----|------------------------|---------|---------|-------------------------------|---------------------|---|---|
|     | Current/Actual         | 1,715.3 | 466.2   | 1249.1                        | 16,169              | 277.35  | 201.97  |
| 4.5 | 2050                   | 1,819.6 | 456.8   | 1362.9                        | 16,169              | 294.21  | 220.36  |
|     | 2070                   | 1,842.1 | 452.9   | 1389.2                        | 16,169              | 297.85  | 224.62  |
| 8.5 | 2050                   | 1,824.7 | 438.1   | 1386.6                        | 16,169              | 295.03  | 224.19  |
|     | 2070                   | 1,905.9 | 434.5   | 1471.4                        | 16,169              | 308.17  | 237.91  |

CU= Consumptive crop use. PP=Precipitation. Deficit=UC-PP. SA=Sown area. CUSA=Consumptive use per sown area. DSA=Deficit per sown area.

UC=Uso consuntivo del cultivo. PP=Precipitación. Déficit=UC-PP. SS=Superficie sembrada. UCSS=Uso consuntivo por superficie sembrada. DSS=Déficit por superficie sembrada.

RCP 8.5. This may be because precipitation decreases from 466.2 to 434.5 in the scenario of 2070 from RCP 8.5. The deficit for the base scenario is 201.97 Mm<sup>3</sup>, changing to 224.62 Mm<sup>3</sup> for the scenario of 2070 from RCP 4.5, and to 237.91 Mm<sup>3</sup> for the scenario of 2070 from RCP 8.5, increasing to 17.8 % in the latter scenario. The above regarding the area (16 169 ha) sown with alfalfa.

**Pepper.** UC values and water demand analysis for pepper crop of the period May-September were estimated for the irrigated areas where this crop is grown (Table 6). UC of pepper crop for the baseline climate was estimated at 540.9 mm, resulting similar to that reported by Serna and Zegbe (2012), who determined a UC for pepper crop of 527 mm, while Servín et al. (2012) indicate that pepper crop needs a UC of 567 mm, although Lara et al. (2010) and Serna et al. (2011) determined other values of UC for this crop (480 mm and 628 mm, respectively). According to that known, pepper crop develops with a UC linked to a range of 480 to 628 mm; this variation depends on phenology of varieties of pepper crop.

Pepper crop UC was estimated with an increase of 33.0 and 87.0 mm, respectively, for the scenarios of 2050 and 2070 from RCP 4.5; while pepper UC was estimated with an increase of 45.1 and 73.2 mm for the scenarios of 2050 and 2070 from RCP 8.5, respectively.

Precipitation occurring in agricultural areas where peppers are grown was subtracted from UC to estimate the deficit in each scenario, since the deficit would be zero if it would rain as much as the crop demands. In this case, the deficit went from 208.3 mm in the base scenario to 358.1 mm for the scenario of 2070 from RCP 8.5. This may be due to a decrease in precipitation from 332.7 to 256.0 mm in the same scenario. The

del RCP 8.5. Esto puede deberse a que la precipitación disminuye de 378.6 a 290.5 mm. El déficit se estimó con un aumento de hasta 79.7 %, considerando la superficie sembrada con maíz de 26 646 ha para el clima base que es de 55.65 Mm<sup>3</sup>, pasando a 68.54 Mm<sup>3</sup> en el clima 2070 del RCP 4.5 y a 99.98 Mm<sup>3</sup> en el 2070 del RCP 8.5.

**Alfalfa.** Los valores del UC y el análisis de la demanda de agua para el cultivo de alfalfa se estimaron para las áreas de riego donde se siembra este cultivo (Cuadro 5). El UC del cultivo de alfalfa para el clima base en la zona de riego del Estado se estimó en 1 715.3 mm, resultando mayor que lo consignado por Rosales y Gallardo (2017), quienes informaron un UC de 1,600 mm; mientras que Sánchez et al. (2017) indican que el cultivo de alfalfa requiere un UC de 1,322 mm, aunque hay investigadores como Montemayor et al. (2010) que han encontrado un UC de 1,160 mm. Para los Distritos de Riego, la CONAGUA (2010) reporta un UC de 1,350 mm, como media nacional. La variación del UC del cultivo de alfalfa, al igual que la de los demás cultivos, depende principalmente de las zonas de estudio y de la fenología de las variedades.

El UC del cultivo de alfalfa se estimó con un aumento de 104.3 mm para el escenario 2050 del RCP 4.5; para el escenario 2070 se estimó un aumento de 126.8 mm; mientras que el UC se estimó con un aumento de 109.4 y 190.6 mm, respectivamente, para los escenarios 2050 y 2070 del RCP 8.5. Al UC se le restó la precipitación que ocurre en las zonas agrícolas donde se cultiva la alfalfa para estimar el déficit de cada escenario. En este caso, el déficit pasó de 1,249.1 mm en el escenario base, a 1,471.4 mm en el escenario 2070 del RCP 8.5. Esto puede deberse a que la precipitación disminuye de 466.2 a 434.5 en el escenario 2070 del RCP 8.5. El déficit para el escenario base es de 201.97 Mm<sup>3</sup>,

**Table 6. Consumptive use and water deficit for pepper crop from May to September in irrigated agricultural areas under different climate scenarios on high plateau of Zacatecas.**

**Cuadro 6. Uso consuntivo y déficit hídrico para el cultivo de chile en el ciclo mayo-septiembre en las áreas agrícolas de riego en diferentes escenarios climáticos en el altiplano del estado de Zacatecas.**

| RCP | Scenario/<br>Escenario | UC (mm) | Pp (mm) | Deficit (mm)/<br>Déficit (mm) | SA (ha)/<br>SS (ha) | UCSA (Mm <sup>3</sup> )/<br>UCSS (Mm <sup>3</sup> ) | DSA (Mm <sup>3</sup> )/<br>DSS (Mm <sup>3</sup> ) |
|-----|------------------------|---------|---------|-------------------------------|---------------------|---|---|
|     | Current/Actual         | 540.9   | 332.7   | 208.3                         | 28,505              | 154.19  | 59.36   |
| 4.5 | 2050                   | 573.9   | 329.3   | 244.6                         | 28,505              | 163.59  | 69.73   |
|     | 2070                   | 627.9   | 370.8   | 257.2                         | 28,505              | 178.99  | 73.32   |
| 8.5 | 2050                   | 586.0   | 259.1   | 326.9                         | 28,505              | 167.05  | 93.18   |
|     | 2070                   | 614.1   | 256.0   | 358.1                         | 28,505              | 175.05  | 102.07  |

UC= Consumptive crop use. PP=Precipitation. Deficit=UC-PP. SA=Sown area. CUSA=Consumptive use per sown area. DSA=Deficit per sown area.

UC=Uso consuntivo del cultivo. PP=Precipitación. Déficit=UC-PP. SS=Superficie sembrada. UCSS=Uso consuntivo por superficie sembrada. DSS=Déficit por superficie sembrada.

deficit was estimated with an increase of up to 71.9 %, regarding the area sown with pepper of 28 505 ha for the baseline climate, which is 59.36 Mm<sup>3</sup>, changing to 73.32 Mm<sup>3</sup> in the climate of 2070 from RCP 4.5, and to 102.07 Mm<sup>3</sup> in the scenario of 2070 from RCP 8.5.

**Garlic.** UC values and water demand analysis for garlic crop for the period from October to April were estimated for irrigated areas where this crop is grown (Table 7). UC of garlic for the baseline climate is 544.8 mm, resulting similar to that estimated by Huez et al. (2009), who reported a UC of 525 mm; while Pais (2004) mentions that garlic crop needs a UC of 450 mm, although there are researchers such as Barrios et al. (2005) who have determined UC values for this crop between 717 and 790 mm. According to that reported, garlic crop develops with a UC between 450 and 790 mm; this variation depends mainly on environmental conditions of the growing areas, as well as the phenology of garlic crop varieties.

Garlic UC was estimated with an increase of 34.6 and 43.2 mm for the scenarios of 2050 and 2070 from RCP 4.5, respectively; while garlic UC was estimated with an increase of 31.8 and 50.2 mm for the scenarios of 2050 and 2070 from RCP 8.5, respectively.

Precipitation occurring in agricultural areas where garlic is grown was subtracted from UC to estimate the deficit in each scenario. In this case, the deficit went from 456.6 mm in the base scenario to 461.8 mm in the scenario of 2070 from RCP 8.5; this may be because precipitation increases from 88.2 to 133.1 mm in the same scenario, so the deficit in this crop is barely affected. The deficit was estimated with an increase of up to 1.1 %, regarding the area (2 878 ha) grown with garlic, the deficit for the base scenario is

pasando a 224.62 Mm<sup>3</sup> en el escenario 2070 del RCP 4.5, y pasando a 237.91 Mm<sup>3</sup> en el 2070 del RCP 8.5, aumentando hasta 17.8 % en este último escenario. Lo anterior considerando la superficie sembrada con alfalfa de 16 169 ha.

**Chile.** Los valores del UC y el análisis de la demanda de agua para el cultivo de chile del periodo mayo-septiembre se estimaron para las áreas de riego donde se siembra este cultivo (Cuadro 6). El UC del cultivo de chile para el clima base se estimó en 540.9 mm, resultando similar a lo reportado por Serna y Zegbe (2012), quienes determinaron un UC para el cultivo de chile de 527 mm, mientras que Servín et al. (2012) indican que el cultivo de chile requiere un UC de 567 mm, aunque Lara et al. (2010) y Serna et al. (2011) determinaron otros valores de UC para este cultivo (480 mm y 628 mm, respectivamente). De acuerdo con lo que se sabe, el cultivo de chile se desarrolla con un UC ligado a un rango de 480 a 628 mm; esta variación depende de la fenología de las variedades del cultivo de chile.

El UC del cultivo de chile se estimó con un aumento de 33.0 y 87.0 mm, respectivamente, para los escenarios 2050 y 2070 del RCP 4.5; mientras que el UC del chile se estimó con un aumento de 45.1 y 73.2 mm para los escenarios 2050 y 2070 del RCP 8.5, respectivamente.

Al UC se le restó la precipitación que ocurre en las zonas agrícolas donde se cultiva el chile para estimar el déficit de cada escenario. En este caso, el déficit pasó de 208.3 mm en el escenario base, a 358.1 mm en el escenario 2070 de RCP 8.5. Esto puede deberse a que la precipitación disminuye de 332.7 a 256.0 mm en el mismo escenario. El déficit se estimó con un aumento de hasta 71.9 %, considerando la superficie sembrada

**Table 7. Consumptive use and water deficit for garlic crop for the cycle from October to April in irrigated agricultural areas under different climate scenarios on high plateau of Zacatecas.**

**Cuadro 7. Uso consuntivo y déficit hídrico para el cultivo de ajo en el ciclo octubre-abril en las áreas agrícolas de riego en diferentes escenarios climáticos en el altiplano del estado de Zacatecas.**

| RCP | Scenario/<br>Escenario | UC (mm) | Pp (mm) | Deficit (mm)/<br>Déficit (mm) | SA (ha)/<br>SS (ha) | UCSA (Mm <sup>3</sup> )/<br>UCSS (Mm <sup>3</sup> ) | DSA (Mm <sup>3</sup> )/<br>DSS (Mm <sup>3</sup> ) |
|-----|------------------------|---------|---------|-------------------------------|---------------------|---|---|
|     | Current/Actual         | 544.8   | 88.2    | 456.6                         | 2,878               | 15.68   | 13.14   |
| 4.5 | 2050                   | 579.4   | 80.0    | 499.4                         | 2,878               | 16.67   | 14.37   |
|     | 2070                   | 588.0   | 77.1    | 510.9                         | 2,878               | 16.92   | 14.70   |
| 8.5 | 2050                   | 576.6   | 133.3   | 443.3                         | 2,878               | 16.59   | 12.76   |
|     | 2070                   | 594.9   | 133.1   | 461.8                         | 2,878               | 17.12   | 13.29   |

CU= Consumptive crop use. PP=Precipitation. Deficit=UC-PP. SA=Sown area. CUSA=Consumptive use per sown area. DSA=Deficit per sown area.

UC=Uso consuntivo del cultivo. PP=Precipitación. Déficit=UC-PP. SS=Superficie sembrada. UCSS=Uso consuntivo por superficie sembrada. DSS=Déficit por superficie sembrada.

13.14 Mm<sup>3</sup>, changing to 14.70 Mm<sup>3</sup> in the 2070 scenario from RCP 4.5, and to 13.29 Mm<sup>3</sup> in the 2070 scenario from RCP 8.5. The garlic crop would benefit because of the estimated increase in precipitation during the winter season.

**Combined analysis.** This analysis includes the sown area of each crop. The crop with the lowest water deficit during growing cycle is garlic with 13.14 Mm<sup>3</sup> in the baseline climate and could increase to 14.7 and 13.29 Mm<sup>3</sup> for the scenarios of 2070 from RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios, respectively (Table 8). Alfalfa is the species with the largest water deficit during the crop cycle with 201.97 Mm<sup>3</sup> for the baseline climate and could increase to 224.62 and 237.91 Mm<sup>3</sup> in the scenarios of 2070 from RCP 4.5 and RCP 8.5, respectively (Table 8). This behavior is partly because the first crop cycle is in autumn-winter and the second is an annual crop.

Water deficit per hectare was estimated to remove the effect of the area grown per crop. The crop with the lowest water deficit is beans with 1 969.0 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>; this deficit could increase up to 2 398.0 and 3 519.0 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> for the scenarios of 2070 RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios, respectively (Table 9). Alfalfa crop had the largest water deficit with 12,490.9 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>; this deficit could increase up to 13 892.0 and 14 714.1 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> for the scenarios of 2070 from RCP 4.5 and RCP 8.5, respectively (Table 9). The above is partly because of the length of the crop cycle, as beans have a four-month cycle and alfalfa has a 12-month cycle. Garlic and alfalfa crops had greater water deficits because of their longer crop cycle; in the case of alfalfa, which is a forage crop, it could be substituted, in part, by forage maize to reduce water consumption.

con chile de 28 505 ha para el clima base que es de 59.36 Mm<sup>3</sup>, pasando a 73.32 Mm<sup>3</sup> en el clima 2070 del RCP 4.5, y a 102.07 Mm<sup>3</sup> en el escenario 2070 del RCP 8.5.

**Ajo.** Los valores del UC y el análisis de la demanda de agua para el cultivo de ajo del periodo octubre-abril se estimaron para las áreas de riego donde se siembra este cultivo (Cuadro 7). El UC del cultivo de ajo para el clima base es de 544.8 mm, resultando similar al estimado por Huez et al. (2009), quien consignó un UC de 525 mm; mientras que País (2004) menciona que el cultivo de ajo requiere un UC de 450 mm, aunque hay investigadores como Barrios et al. (2005) que han determinado valores de UC para este cultivo entre 717 y 790 mm. De acuerdo con lo reportado, el cultivo de ajo se desarrolla con un UC entre 450 a 790 mm; esta variación depende principalmente de las condiciones ambientales de las zonas productoras, así como de la fenología de las variedades del cultivo de ajo.

El UC del cultivo del ajo se estimó con un aumento de 34.6 y 43.2 mm para los escenarios 2050 y 2070 del RCP 4.5, respectivamente; mientras que el UC del ajo se estimó con un aumento de 31.8 y 50.2 mm para los escenarios 2050 y 2070 del RCP 8.5, respectivamente.

Al UC se le restó la precipitación que ocurre en las zonas agrícolas donde se cultiva el ajo para estimar el déficit de cada escenario. En este caso, el déficit pasó de 456.6 mm en el escenario base, a 461.8 mm en el escenario 2070 del RCP 8.5; esto puede deberse a que la precipitación aumenta de 88.2 a 133.1 mm en el mismo escenario, por lo que no se ve muy afectado el déficit en este cultivo. El déficit se estimó con un aumento

**Table 8. Water deficit per crop cycle in the climatological baseline and in the future scenarios in Mm<sup>3</sup>, based on the total grown area.**

**Cuadro 8. Déficit hídrico por ciclo de cultivo en la climatología base y en los escenarios futuros en Mm<sup>3</sup>, considerando el total de la superficie sembrada.**

| Crop/Cultivo | Current/Actual | RCP 4.5 |        | RCP 8.5 |        |
|--------------|----------------|---------|--------|---------|--------|
|              |                | 2050    | 2070   | 2050    | 2070   |
| Beans/Frijol | 42.000         | 49.63   | 51.15  | 68.60   | 75.06  |
| Maize/Maíz   | 55.65          | 66.61   | 68.54  | 91.50   | 99.98  |
| Alfalfa      | 201.97         | 220.36  | 224.62 | 224.19  | 237.91 |
| Pepper/Chile | 59.36          | 69.73   | 93.18  | 93.18   | 102.07 |
| Garlic/Ajo   | 13.14          | 14.37   | 14.70  | 12.76   | 13.29  |

**Table 9. Water deficit per crop cycle in the climatological baseline and in the future scenarios in m<sup>3</sup> per hectare.**

**Cuadro 9. Déficit hídrico por ciclo de cultivo en la climatología base y en los escenarios futuros en m<sup>3</sup> por hectárea.**

| Crop/Cultivo | Current/Actual | RCP 4.5  |          | RCP 8.5  |          |
|--------------|----------------|----------|----------|----------|----------|
|              |                | 2050     | 2070     | 2050     | 2070     |
| Beans/Frijol | 1,969.0        | 2,327.0  | 2,398.0  | 3,216.0  | 3,519.0  |
| Maize/Maíz   | 2,088.4        | 2,499.9  | 2,572.2  | 3,433.8  | 3,752.0  |
| Alfalfa      | 12,490.9       | 13,628.6 | 13,892.0 | 13,865.6 | 14,714.1 |
| Pepper/Chile | 2,082.5        | 2,446.2  | 3,269.0  | 3,269.0  | 3,580.8  |
| Garlic/Ajo   | 4,565.7        | 4,994.0  | 5,108.6  | 4,433.1  | 4,618.0  |

## Conclusions

According to the trends for future scenarios, crop UC could increase up to 64.8, 78.3, 190.6, 73.2, and 50.2 mm for beans, maize, alfalfa, pepper, and garlic in the 2070 scenario from RCP 8.5, respectively.

Bean crop had the lowest water deficit with 1969.0 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> in the baseline period, potentially increasing to 3 519.0 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> in the 2070 scenario from RCP 8.5. Alfalfa crop was found to have the highest water deficit with 12 490.9 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> in the baseline period, which could increase to 14 714.1 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> in the 2070 scenario from RCP 8.5.

The possible increase in crop UC in future scenarios could be reduced by using short-cycle crop varieties with higher tolerance to stress, heat and drought. In the case of forage crops such as alfalfa, it could be substituted by forage maize or another species with lower water demand.

*End of English version*

de hasta 1.1 %, considerando la superficie sembrada con ajo de 2 878 ha, el déficit para el escenario base es de 13.14 Mm<sup>3</sup>, pasando a 14.70 Mm<sup>3</sup> en el escenario 2070 del RCP 4.5, y pasando a 13.29 Mm<sup>3</sup> en el escenario 2070 del RCP 8.5. El cultivo de ajo se vería beneficiado debido a que se estima que aumentarían las precipitaciones en la época invernal.

**Análisis conjunto.** Este análisis considera la superficie sembrada de cada uno de los cultivos. El cultivo que presenta un menor déficit hídrico durante su ciclo de cultivo es el ajo con 13.14 Mm<sup>3</sup> en el clima base y pudiera aumentar a 14.7 y 13.29 Mm<sup>3</sup> en los escenarios 2070 del RCP 4.5 2070 y del RCP 8.5, respectivamente (Cuadro 8). La alfalfa es la especie con mayor déficit hídrico durante el ciclo de cultivo con 201.97 Mm<sup>3</sup> en el clima base y pudiera aumentar hasta 224.62 y 237.91 Mm<sup>3</sup> en los escenarios 2070 del RCP 4.5 y del RCP 8.5, respectivamente (Cuadro 8). Este comportamiento se debe en parte a que el ciclo del primer cultivo es en otoño-invierno y el segundo es un cultivo anual.

## Referencias / Referencias

- Allen R.G., Jensen, M. E., Wright, J. L., y R. D. Burman. 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agron. J.* 81:650-662.
- Allen G., R., Pereira S., L., Raes, D., y Smith M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Estudio FAO de Riego y Drenaje No. 56. FAO. Roma. 298 p. <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Almorox J., Elisei, V., Aguirre M., E., y Commegna, M. (2012). Calibración del modelo de Hargreaves para la estimación de la evapotranspiración de referencia en Coronel Dorrego, Argentina. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 44(1), 101-109. [https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos\\_digitales/4512/t44-1-09-almorox.pdf](https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/4512/t44-1-09-almorox.pdf)
- Attipalli R., R., Girish K., R., y Agepati S., R. (2010). The impact of global elevated CO<sub>2</sub> concentration on photosynthesis and plant productivity. *Curr. Science*. 99(1):46-57. <https://www.jstor.org/stable/24108349>
- Ávila-Carrasco, J. R., Mojarro, F., Moriasi, D. N., Gowda, P. H., Bautista-Capetillo, C., Echavarría-Cháirez, F. G., Garbrecht, J. D., Steiner, J. L., Howell, T. A., Kanemasu, E. T., Verser, A. J., Wagner, K., y Hernandez, J. (2012). Calibration of SWAT2009 using crop biomass, evapotranspiration, and deep recharge: Calera Watershed in Zacatecas, Mexico Case Study. *Journal of Water Resource and Protection*, 4, 439-450. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2012.47051>
- Barrios-Díaz, J. M., Larios-García, M. C., Castellanos, J., Z., Alcanzar-González, M. de las N., Tijerina-Chávez, L., y Cruz-Romero, W. (2005). Rendimiento y calidad de ajo con diferente manejo de riego por goteo. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 11, 23-239. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2003.06.043>
- Bravo L., A., Mojarro D., F., y Medina G., G. (2006). Limitaciones del agua: eficiencia del agua y la producción de cultivos. En: Bravo L., A., Salinas G., H. y Rumayor R. A. (comp.). *Sequía: Vulnerabilidad, impacto y tecnología para afrontarla en el Norte Centro de México*. Segunda Edición. Instituto nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo experimental Zacatecas. Libro Técnico Núm. 4, 2ª. Edición. pp 133-195. [http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/SEQUIA\\_Vulnerabilidad\\_impacto\\_y\\_tecnologia\\_para\\_afrontarla\\_en\\_el\\_Norte\\_Centro\\_de\\_Mexico\\_2aEd.pdf](http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/SEQUIA_Vulnerabilidad_impacto_y_tecnologia_para_afrontarla_en_el_Norte_Centro_de_Mexico_2aEd.pdf)
- Carrillo-Martínez, C. J., Álvarez-Fuentes, G., Aguilar-Benítez, G., Can-Chulím, Á., y Pinedo-Escobar, J. A. (2021). Calidad del agua para riego agrícola en la región del acuífero Calera en Zacatecas, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(2), 01-58. <https://doi.org/10.24850/jtyca-2021-02-01>
- CONAGUA. (Comisión Nacional del Agua). (2010). Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Año agrícola 2008-2009. <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/sgih-1-10libroeadr2008-09.pdf>
- Para eliminar el efecto de la superficie sembrada por cultivo, el déficit hídrico por hectárea fue estimado. El cultivo con menor déficit hídrico es el frijol con 1 969.0 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>; este déficit pudiera aumentar hasta 2 398.0 y 3 519.0 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> en los escenarios 2070 del RCP 4.5 2070 y del RCP 8.5, respectivamente (Cuadro 9). El cultivo de alfalfa resultó ser el de mayor déficit hídrico con 12,490.9 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>; este déficit pudiera aumentar hasta 13 892.0 y 14 714.1 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> en los escenarios 2070 del RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente (Cuadro 9). Lo anterior se debe en parte a la duración del ciclo de cultivo, ya que el frijol tiene un ciclo de cuatro meses y la alfalfa de 12 meses. Los cultivos de ajo y alfalfa resultaron con mayores déficits hídricos por su ciclo de cultivo más largo, para el caso de la alfalfa, que es un cultivo forrajero, pudiera sustituirse, en parte, por maíz forrajero y de esta manera se podría reducir el consumo de agua.
- ### Conclusiones
- De acuerdo con las tendencias señaladas para los escenarios futuros, el UC de los cultivos podría aumentar hasta 64.8, 78.3, 190.6, 73.2, y 50.2 mm en los casos de frijol, maíz, alfalfa, chile y ajo en el escenario 2070 del RCP 8.5, respectivamente.
- El cultivo de frijol resultó ser el de menor déficit hídrico con 1 969.0 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> en el clima base, pudiendo aumentar hasta 3 519.0 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> en el escenario 2070 del RCP 8.5. El cultivo de alfalfa resultó ser el de mayor déficit hídrico con 12 490.9 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> en el clima base, el cual pudiera aumentar hasta 14 714.1 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> en el escenario 2070 del RCP 8.5.
- El posible aumento del UC de los cultivos en los escenarios futuros pudiera disminuirse usando variedades de cultivos de ciclo corto, con tolerancia mayor a estrés, calor y sequía. En el caso de cultivos forrajeros como alfalfa, pudiera sustituirse por maíz forrajero u otra especie con consumo menor de agua.
- ### Fin de la versión en español
- Djaman, K., Balde, A. B., Sow, A., Muller, B., Irmak, S., N'Diaye, M. K., y Saito, K. (2015). Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. *Journal of Hydrology: regional studies*, 3, 139-159. [http://digitalcommons.unl.edu/biosysengfacpub/538?utm\\_source=digitalcommons.unl.edu%2Fbiosysengfacpub%2F538&utm\\_medium=PDF&utm\\_campaign=PDFCoverPages](http://digitalcommons.unl.edu/biosysengfacpub/538?utm_source=digitalcommons.unl.edu%2Fbiosysengfacpub%2F538&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages)
- García, B. M., Pérez, M. G. J., Servín, P. M., y Medina, G. G. (2016). Herramienta para planeación agrícola en

- maíz mediante funciones de respuesta y balance hídrico climático. En: Congreso Mesoamericano de Investigación UNACH 2016. Pp. 153-157. [https://dgp.unach.mx/images/PDF-PARA\\_CARTEL/\\_REVISTA\\_CONGRESO\\_UNACH\\_2016\\_.pdf](https://dgp.unach.mx/images/PDF-PARA_CARTEL/_REVISTA_CONGRESO_UNACH_2016_.pdf)
- González, C. O., Abreu C. B., Herrera S. M., y López B E. (2017). Uso del agua durante el riego del frijol en suelos Eutríc cambisol. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 26(1), 71-77. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2071-00542017000100009](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542017000100009)
- González-Estrada, A., y Camacho A., M. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero de la fertilización nitrogenada en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(8), 1733-1745. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i8.698>
- Hargreaves, G., H., y Samani Z., A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Div., ASCE*, 108:223-230. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001390>
- Hernández, J., Gowda, P., Howell, T., Steiner, J., Mojarro, F., Núñez, E., y Avila, J. (2012). Modeling Groundwater levels on the Calera aquifer region in central Mexico using ModFlow. *Journal of Agricultural Science and Technology B*, 2(1), 52-61. Recuperado de [https://scholarworks.boisestate.edu/civileng\\_facpubs/36/](https://scholarworks.boisestate.edu/civileng_facpubs/36/)
- Huez L. M. A., Preciado, F. A., López E. J., Álvarez, A., Jiménez, J., y Valenzuela, P. (2009). Productividad de ajo (*Allium sativum* L.) bajo riego por goteo en la costa de Hermosillo, México. *Biotechnia*, 11(2), 3-12. <file:///C:/Users/gmedina/AppData/Local/Temp/58-Texto%20del%20art%C3%83%C2%ADculo-118-1-10-20150720.pdf>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5\\_SYR\\_FINAL\\_Front\\_matters.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_Front_matters.pdf)
- Jensen, M. E., Burman R., D., y Allen R. G. (1990). *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. American Society of Civil Engineers. Irrigation Water Requirements Committee of the Irrigation and Drainage Division. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. New York. 332p. <https://doi.org/10.1061/9780784414057>
- Junes, F., H. E., Echavarría Ch., F., y Martínez P., J. J. 2013. Hidrología subterránea y delimitación de zonas potenciales de recarga. En: Mojarro, D., F., De León M. B., Junes F., H. E. y Bautista C., C. F. 2013. *Agua subterránea en Zacatecas. Diagnóstico y gestión sustentable de seis acuíferos*. Universidad Autónoma de Zacatecas. 368 p.
- Lara H., A., Bravo L., A., Luna F., M., Avelar M., J. J., Estrada C., J., y Llamas L. J. J. (2010). Fertilización del Chile Mirasol en riegos por goteo y gravedad en Zacatecas. <https://1library.co/document/y4e5x8vq-fertilizacion-chile-mirasol-riegos-goteo-gravedad-zacatecas.html>
- Martínez H., P., (1999). Determinación de coeficiente de desarrollo (Kc) para el maíz (*Zea mays* L.), Híbrido AN-447. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 63 p. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/5466>
- Medina, G. G., Zegbe D., J. A., Reveles H., M., Mena C., J., Reveles T., L., y Echavarría Ch., F. G. (2016). (Editores). *Tecnología para la producción de cultivos en el área de influencia del Campo Experimental Zacatecas*. Libro Técnico No. 16. INIFAP-CIRNOC. Campo Exp. Zac. 451 p. <http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/guiaTecnicaZac.pdf>
- Medina-García, G., Ruiz-Corral, J. A., Rodríguez-Moreno, V. M., Soria-Ruiz, J., Díaz-Padilla, G., y Zarazúa-Villaseñor, P. (2016). Efecto del cambio climático en el potencial productivo del frijol en México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc. Pub. Esp. Núm. 13:2465-2474*. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i13.461>
- Montemayor, T. J. A.; Walter, A. H.; Olague, R. J.; Román, L. A.; Rivera, G. M.; Preciado, R. P. Montemayor, I. del R. Segura, C. M. A.; Orozco, V. J. A. y Yescas, C. P. 2010. Uso del agua en la alfalfa (*Medicago sativa*) con riego por goteo subsuperficial. *Rev. Mex. Cienc. Pec. 1(2):145-156*
- Ocampo, D., y Rivas, R. (2011). Evaluación de métodos de estimación de la evapotranspiración a escala mensual y anual en Argentina: aplicación en zonas húmedas, semiáridas y áridas. *Cuadernos del Curiham*, Vol. 17:33-41. <https://core.ac.uk/download/pdf/84263995.pdf>
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Ñiñiguez-Covarrubias, M., y Montero-Martínez, M. J. (2011). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*, 45(1), 1-11. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30219760001.pdf>
- Pais L. J. F. (2004). Evaluación técnica y económica de la producción de ajo bajo riego por goteo. Tesis pregrado. 62 p. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/101747>
- Rosales-Serna., R., y Flores-Gallardo, H. (2017). Importancia del agua de riego para la producción sostenible de frijol en Durango. Folleto Técnico Núm. 91. Campo Experimental Valle del Guadiana INIFAP. Durango, Durango, México. 28 p. [https://www.researchgate.net/publication/323510747\\_IMPORTANCIA\\_DEL\\_AGUA\\_DE\\_RIEGO\\_PARA\\_LA\\_PRODUCCION\\_SOSTENIBLE\\_DE\\_FRIJOL\\_EN\\_DURANGO](https://www.researchgate.net/publication/323510747_IMPORTANCIA_DEL_AGUA_DE_RIEGO_PARA_LA_PRODUCCION_SOSTENIBLE_DE_FRIJOL_EN_DURANGO)
- Ruiz, C. J. A., Medina, G. G., Ramírez, D. J. L., Flores, L. H. E., Ramírez, O. G., Manríquez, O. J. D., Zarazúa, V. P., González, E. D. R., Díaz, P. G., y Mora, O. C. (2011). Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc. Pub. Esp. Núm. 2:309-323*. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342011000800011](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000800011)
- Ruiz-Corral, J. A., Medina-García G., Rodríguez-Moreno V. M., Sánchez-González J. J., Villavicencio G. R., Durán Puga N., Grageda G. J., y García R. J. E. (2016).



- Regionalización del cambio climático en México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc. Pub. Esp. Núm. 13:2451-2464*. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i13.460>
- Sánchez, G. R. A., Servin P. M., Gutiérrez B. H., y Serna P. A. (2017). Eficiencia en el uso del agua de variedades de alfalfa (*Medicago sativa* L.) con sistema de riego subsuperficial. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 8(4), 429-435. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v8i4.4255>
- Serna P. A., Zegbe, J. A., y Mena C. J. (2011). Rendimiento y calidad de chile seco Mirasol cultivado bajo riego parcial de la raíz. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 17 (Especial 1): 19-24. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1027-152X2011000400004](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2011000400004)
- Serna, P. A., y Zegbe J. A (2012). Rendimiento, calidad de fruto y eficiencia en el uso del agua del chile 'Mirasol' bajo riego deficitario *Rev. Fitotec. Mex. Vol. 35* (Núm. Especial 5): 53 - 56. <https://www.redalyc.org/pdf/610/61024388010.pdf>
- Servín, P. M., Serna, P. A., y Sánchez G. R. (2012). Producción de chile seco con riego por goteo sub-superficial. Folleto Técnico No. 41. Campo Experimental Zacatecas. CIRNOC-INIFAP, 45p. <http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/prodChileSe.pdf>
- SIAP (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2021). <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119> (Consultado: Febrero de 2021).
- Tinoco, R. J. A., Gómez D. J. D., y Monterroso R. A. I. (2011). Efectos del cambio climático en la distribución potencial del maíz en el estado de Jalisco, México. *Terra Latino Americana*, 29(2), 161-168. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57321257006>
- Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., y Masui, T. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109(1-2), 5. <http://link.springer.com/article/10.1007%25252Fs10584-011-0148-z>
- Vega, G. J. D. (1982). Uso y manejo del agua. Departamento de Suelos e Ingeniería Agrícola del ITESM. Monterrey, N. L. México. Pp 181-195. <https://biotecnia.unison.mx>
- Villanueva D., J., Loredó O., C., y Hernández R., A. (2001). Requerimientos hídricos de especies anuales y perenes en las zonas medias y altiplano de San Luis Potosí. Folleto Técnico Núm. 12. 6. INIFAP-CIRNE. Campo Experimental Palma de la Cruz. San Luis Potosí, SLP. 25 p. <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/755.pdf>
- Walton, D., Meyerson, J., y Neelin, J. D. (2013). Accessing, downloading, and viewing CMIP5 data. *Earth System Grid Federation*. 25 p.
- Xing-Guo, M., Shi H., Zhong-Hui L., Su-Xia L., y Jun X. 2017. Impacts of climate change on agricultural water resources and adaptation on the North China Plain. *Advances in Climate Change Research*. 8(2):93-98. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2017.05.007>