

## **Impacto potencial del cambio climático en la región productora de durazno en Zacatecas, México\***

### **Potential impact of climate change on the peach producing region in Zacatecas, Mexico**

**Guillermo Medina-García<sup>1§</sup>, José Ariel Ruiz-Corral<sup>2</sup>, Jorge A. Zegbe<sup>1</sup>, Jesús Soria Ruiz<sup>3</sup>, Víctor Rodríguez Moreno<sup>4</sup> y Gabriel Díaz Padilla<sup>5</sup>**

<sup>1,3</sup>INIFAP-Campo Experimental Zacatecas, Carretera Zacatecas-Fresnillo km 24.5, Calera, Zacatecas, 98600, México. <sup>2</sup>INIFAP- Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, Carretera libre Tepatitlán-Lagos de Moreno km 8, Tepatitlán, Jalisco, 47600, México. <sup>4</sup>INIFAP- Sitio Experimental Metepec, Carretera Toluca-Zitácuaro km. 4.5, Vialidad Adolfo López Mateos s/n, Zinacantepec, Estado de México, 51350, México. <sup>5</sup>INIFAP-Campo Experimental Pabellón, Carretera Aguascalientes-Zacatecas km 32.5, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, 20660, México. <sup>3</sup>INIFAP-Campo Experimental Cotaxtla, Carretera Veracruz-Córdoba km 34.5, Medellín de Bravo, Veracruz, México. <sup>§</sup>Autor para correspondencia: medina.guillermo@inifap.gob.mx.

#### **Resumen**

En el estado de Zacatecas se localiza la región cultivada con durazno criollo bajo condiciones de temporal más importante de México con una superficie establecida de 12 025 ha. Actualmente a nivel mundial es aceptado que globalmente existe un fenómeno de calentamiento atmosférico global y que en parte ha sido consecuencia del aumento en la concentración de los llamados “gases de efecto invernadero”. Se realizó un análisis retrospectivo con índices de cambio climático para la zona duraznera de temporal. Se utilizaron anomalías de temperatura para el período 2011-2060, estimadas con un ensamble de 10 modelos de circulación general, para generar mapas de temperatura futura a partir de la climatología de referencia 1961-2003. Con éstos mapas de temperatura se obtuvieron mapas de horas frío para cinco escenarios futuros. El análisis retrospectivo mostró tendencia en el incremento de la temperatura máxima y mínima y como consecuencia un decremento del frío en el periodo invernal. Con los escenarios futuros de la acumulación de horas frío se cuantificó la disminución promedio de las horas, así como la disminución de la superficie de las áreas con mayor acumulación de frío y el aumento de las áreas con menor acumulación de frío en las zonas de producción. Los

#### **Abstract**

In the State of Zacatecas is located the most important region planted with native peach under rainfed conditions of Mexico with a surface of 12 025 ha. Currently, worldwide is accepted that globally there is a phenomenon of global atmospheric warming and that in part is due to the increase in the concentration of the so-called "greenhouse gases". A retrospective analysis of climate change indices for peach under rainfed was conducted. We used temperature anomalies for the period 2011-2060, estimated with an assembly of 10 global climate models (GCMs) for generating maps of future temperatures using the climate of reference from 1961 to 2003. With these maps of temperature, we obtained maps of cold hours for five future scenarios. The retrospective analysis showed a trend in the increase of the maximum and minimum temperature and consequently a decrease of cold in the winter period. With future scenarios of cold hours the average hours and decreased surface areas with higher cold accumulation and increase in areas with lower accumulation of cold production areas decrease was quantified. The results show the decline of the winter cold; however, since peaches are grown medium to low cold requirement, it is considered that in the short to medium

\* Recibido: abril de 2014  
Aceptado: agosto de 2014

resultados evidencian el decremento del frío invernal; sin embargo, dado que los duraznos cultivados son de mediano a bajo requerimiento de frío, se considera que a corto y mediano plazo no habrá impacto de la disminución de las horas frío sobre el crecimiento y desarrollo del durazno. No obstante, a mediano plazo será conveniente la introducción y evaluación de variedades con bajo requerimiento de frío como ‘Victoria Temprano’, ‘Fred’ y ‘Michele’. A largo plazo, habrá que buscar nichos con mayor acumulación de frío o variedades con bajo requerimiento de frío.

**Palabras clave:** *Prunus persica* L. Batsch., calentamiento global, horas frío.

## Introducción

Muchos cambios se han observado en el clima global durante el siglo pasado. El aumento en la concentración de dióxido de carbono ha sido el factor principal que ha causado el calentamiento en los últimos 50 años. La temperatura media global del aire ha aumentado desde 1970. Todos los modelos climáticos proyectan que las emisiones de gases que atrapan el calor, causadas por el hombre, provocarán un mayor calentamiento en el futuro. Con base en escenarios que no asumen las políticas climáticas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, se prevé que la temperatura media mundial aumente entre 2 y 11.5 °C para finales de este siglo (UNEP, 2009).

Folland *et al.* (2001) indican que durante la segunda mitad del siglo XX, el promedio mundial de temperatura del aire incrementó en 0.6 °C. Sin embargo, este calentamiento no fue espacial o temporalmente uniforme. Por lo general, la detección del cambio climático se asocia más a menudo con el análisis de los cambios en los eventos extremos que con los cambios en la media de las variables de clima (Katz y Brown, 1992). Recientemente, se han hecho considerables esfuerzos para estimar no sólo los cambios en series de temperatura media, sino también los cambios en la frecuencia, intensidad y duración de los fenómenos extremos (El Kenawy *et al.*, 2011).

Se augura que el cambio climático afectará significativamente todas las actividades humanas, incluyendo la productividad de la agricultura principalmente en áreas marginales (Conde *et al.*, 2004). Estudios recientes han demostrado que la temperatura de las áreas agrícolas de México ha estado incrementando de manera perceptible desde la década de los noventa (Ruiz *et al.*, 2010; Zarazúa-Villaseñor *et al.*, 2011).

term there will be no impact of the decline in cold hours on the growth and development of peach. However, in the medium term it will be convenient the introduction and evaluation of varieties with low cold requirement such as ‘Victoria Temprano’, ‘Fred’ and ‘Michele’. In the long term we’ll have to find niches with higher accumulation of cold or varieties with low cold requirement.

**Keywords:** *Prunus persica* L. Batsch., cold hours, global warming.

## Introduction

Many changes have been observed in the global climate over the past century. The increase in the concentration of carbon dioxide has been the main factor that caused warming in the last 50 years. The global average air temperature has increased since 1970. All climate models project that emissions of heat-trapping gases caused by humans, will cause further warming. Based on scenarios that assume no climate policies to reduce emissions of greenhouse gases, it is expected that the global average temperature increases between 2 and 11.5 °C by the end of this century (UNEP, 2009).

Folland *et al.* (2001) indicated that during the second half of the twentieth century, the global average air temperature increased 0.6 °C. However, this heating was not uniform in space or time. Usually, the detection of climate change is more often associated with the analysis of changes in extreme events to changes in the average climate variables (Katz and Brown, 1992). Recently, considerable efforts have been made to estimate not only the changes in average temperature series, but also changes in the frequency, intensity and duration of extreme events (El Kenawy *et al.*, 2011).

It is predicted that, the climate change will significantly affect all human activities, including agricultural productivity mainly in marginal areas (Conde *et al.*, 2004). Recent studies have shown that the temperature of the agricultural areas of Mexico has been increasing noticeably since the early nineties (Ruiz *et al.*, 2010; Zarazúa-Villaseñor *et al.*, 2011). However, trends presented regionally different patterns even locally, detecting increases in temperatures in some cases, while in others decreases were detected (Carlón and Mendoza, 2007; Brito-Castillo *et al.*, 2009; Santillán-Espinoza *et al.*, 2011).

Sin embargo, tendencias observadas a nivel regional presentan diferentes patrones aún a escala local, detectando incrementos en las temperaturas en algunos casos, mientras que en otros se detectaron decrementos (Carlón y Mendoza, 2007; Brito-Castillo *et al.*, 2009; Santillán-Espinoza *et al.*, 2011).

En México, existe una preocupación por el cambio climático y sus posibles impactos sobre el sector productivo primario, debido a que existen aún pocos estudios cuantitativos y documentados enfocados a las áreas agrícolas (Tejeda y Rodríguez, 2007). Se han realizado estudios sobre la temática de cambio climático y su impacto en la agricultura, pero pocos han analizado a detalle los efectos sobre sistemas producto en particular, lo cual limita el diseño de estrategias de adaptación al cambio climático en este sector (Ruiz *et al.*, 2011).

En lo que respecta a las anomalías de temperatura de manera estacional, las cuatro estaciones del año muestran un calentamiento general desde mediados de los setentas (Jones *et al.*, 2009). Ésta tendencia ha alargado el período libre de heladas en varias regiones de latitudes medias y altas, con una disminución de 10% en el número de días con helada a nivel global (Salinger, 2005).

Los frutales de clima templado requieren frío durante la temporada invernal, primero para romper el letargo invernal y segundo para producir rendimientos económicamente rentables. El calentamiento global tiene el potencial de reducir el frío disponible en el invierno y afectar la producción. Diversos investigadores(as) han pronosticado la disminución en la acumulación del frío invernal en varias regiones del mundo, en escenarios climáticos futuros, utilizando modelos de circulación general u otras metodologías (Jindal y Mankotia, 2004; Baldocchi y Wong 2008; Luedeling *et al.*, 2009; Yu *et al.*, 2010; Luedeling *et al.*, 2011). Medina *et al.* (2011) determinaron una reducción de las unidades frío en la región manzanera del estado de Chihuahua en México.

En México la superficie plantada con durazno bajo condiciones de temporal en 2012 fue de 29 388 ha. Los estados con mayor superficie son Zacatecas que cultiva 12 025 ha (40.9%), Michoacán 2 949 ha (10%) y Puebla 2 880 ha (9.8%), los cuales en conjunto representan 60.8% de la superficie plantada y casi 45% de la producción nacional de este frutal (SIACON, 2013a). En ese mismo año, en el estado de Zacatecas 94.6% de la superficie cultivada con durazno criollo de temporal se ubicó en los municipios de Sombrerete (4 336 ha), Calera (2 814 ha), Jerez (1 994 ha), Fresnillo (1 778 ha) y Enrique Estrada (450 ha) (SIACON, 2013b).

In Mexico, there is a concern about climate change and its potential impacts on the primary production sector, because few documented quantitative studies focused on agricultural areas still exist (Tejeda and Rodríguez, 2007). Studies have been conducted on the subject of climate change and its impact on agriculture, but few have analysed in detail the effects on product systems in particular, limiting the design of adaptation strategies to climate change in this sector (Ruiz *et al.*, 2011).

With regard to temperature anomalies seasonally, four seasons show a general warming since the mid-seventies (Jones *et al.*, 2009). This trend has extended the frost-free period in several regions of middle and high latitudes, with a 10% decrease in the number of days with frost globally (Salinger, 2005).

Fruit trees require cold temperate climate during the winter season, the first to break winter dormancy and second to produce economically viable yields. Global warming has the potential to reduce the available cold in the winter and affect production. Several researchers have predicted a decrease in the accumulation of the cold winter in many regions of the world in future climate scenarios using general circulation models and other methodologies (Jindal and Mankotia, 2004; Baldocchi and Wong 2008; Luedeling *et al.* 2009; Yu *et al.*, 2010; Luedeling *et al.*, 2011). Medina *et al.* (2011) found a reduction in cold units in the apple growing region of the State of Chihuahua in Mexico.

In Mexico, the planted region with peach under rainfed conditions in 2012 area was 29 388 ha. The States with the largest areas are Zacatecas, cultivating 12 025 ha (40.9%), Michoacán 2 949 ha (10%) and Puebla 2 880 ha (9.8%), which together account for 60.8% of the planted area and nearly 45% domestic production of this fruit (SIACON, 2013a). In the same year, in the State of Zacatecas 94.6% of the cultivated peach under rainfed surface was located in the municipalities of Sombrerete (4 336 ha), Calera (2 814 ha), Jerez (1 994 ha), Fresnillo (1 778 ha) and Enrique Estrada (450 ha) (SIACON, 2013b).

The peach requires between 400 and 1000 h cold (CH) during the winter period (Westwood, 1993). This is why there are cultivars of low cold requirement (<400 CH) medium requirement (400-650 CH) and high cold requirement (> 750 CH). Regarding the cold requirements in Mexican genotypes, Zacatecas require between 250 and 650 CH

El durazno requiere entre 400 y 1 000 h frío (HF) durante el período invernal (Westwood, 1993). Es por ello, que existen cultivares de bajo requerimiento de frío (<400 HF), de mediano requerimiento (400-650 HF) y alto requerimiento de frío (>750 HF). En cuanto a requerimientos de frío en genotipos criollos mexicanos, los Zacatecanos requieren entre 250 y 650 HF (Pérez, 1995). En México la tendencia es a cultivar variedades de durazno de bajo requerimiento de frío como son: San Juan, Azteca y Supremo 200 HF, Cardenal, Diamante, Oro Azteca y Regio 250 HF, Oro San Juan 275, Toro 300 HF y Tlaxcala 450 HF (Espíndola *et al.*, 2009). En el estado de Zacatecas hasta ahora no han sido reportados problemas de acumulación de frío de manera recurrente en las regiones productoras de durazno.

Para contar con suficiente información y poder diseñar e implementar medidas de adaptación que eviten o minimicen, en lo posible, los impactos negativos del cambio climático, es necesario estimar en escenarios climáticos futuros, la disponibilidad de recursos agroclimáticos, entre ellos la acumulación de frío, con el fin de lograr una adecuada planeación del desarrollo agrícola a corto, mediano y largo plazo en esta región.

## Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en la región duraznera del estado de Zacatecas, México, la cual se encuentra entre los 102° 30' 00" y 103° 52' 12" de longitud oeste y 22° 30' 00" y 24° 00' 00" de latitud norte y comprende los municipios de Sombrerete, Calera, Jerez, Fresnillo y Enrique Estrada (Figura 1).

La primera parte del estudio consistió en realizar un análisis retrospectivo para determinar si realmente en la región objetivo se está registrando un cambio en la temperatura. Para ello, se seleccionaron una serie estaciones de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) con el mayor número posible de datos y ubicadas dentro de la región duraznera.

Se utilizó el programa RClimDex Ver.1.0 desarrollado por Zhang y Yang (2004) en el Servicio Meteorológico de Canadá, para obtener índices de cambio climáticos siguiendo metodologías de Zhang *et al.* (2005) y Haylock *et al.* (2006). RClimDex es un programa libre (<http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>) que se ejecuta en la plataforma R (<http://www.r-project.org/>). RClimDex proporciona en total 27 índices (incluyendo índices de temperatura y precipitación); sin embargo, para explicar

(Pérez, 1995). In Mexico the tendency is to grow varieties of peach of low cold requirement such as: San Juan, Azteca and Supremo 200 CH, Cardenal, Diamante, Oro Azteca and Regio 250 CH, Oro San Juan 275, Toro 300 CH and Tlaxcala 450 CH (Espíndola *et al.*, 2009). In the State of Zacatecas so far no problems have been reported of accumulation of cold repeatedly in peach production regions.

In order to have sufficient information to design and implement adaptation measures to avoid or minimize, as possible, the negative impacts of climate change, it is necessary to estimate future climate scenarios, the availability of agroclimatic resources, including the accumulation of cold, in order to achieve proper planning of agricultural development in the short, medium and long term in this region.

## Materials and methods

The study was conducted in peach region of the State of Zacatecas, Mexico, which is located between 102° 30' 00" and 103° 52' 12" west longitude and 22° 30' 00" and 24° 00' 00" north latitude and includes the municipalities of Sombrerete, Calera, Jerez, Fresnillo and Enrique Estrada (Figure 1).



**Figura 1. Ubicación de los municipios productores de durazno de temporal del estado de Zacatecas, México.**

**Figure 1. Location of peach producing municipalities under rainfed in the State of Zacatecas, Mexico.**

The first part of the study was to conduct a retrospective analysis to determine whether they are objective in the region experiencing a change in temperature. For this,

mejor el comportamiento de la temperatura en la región de estudio se eligieron sólo siete índices basados en los datos de temperatura máxima y mínima (Cuadro 1).

a series stations of the National Water Commission (CONAGUA) with the largest number of data located within the selected region.

**Cuadro 1. Índices de cambio climático relacionados con temperatura máxima y mínima.**

**Table 1. Indices of climate change related to maximum and minimum temperature.**

Índice	Nombre del índice	Definición	Unidad
FD0	Días con helada	Número de días en un año cuando TN (mínimo diario) $< 0^{\circ}\text{C}$	Días
TXx	Max Tmax	Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria	$^{\circ}\text{C}$
TNx	Max Tmin	Valor mensual máximo de temperatura mínima diaria	$^{\circ}\text{C}$
TNn	Min Tmin	Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria	$^{\circ}\text{C}$
TN10p	Noches frías	Porcentaje de días cuando TN $< 10$ iésimo percentil	%
TX90p	Días calientes	Porcentaje de días cuando TX $> 90$ iésimo percentil	%
WSDI	Indicador de la duración de periodos calientes	Contaje anual de días con por lo menos 6 días consecutivos en que TX $> 90$ iésimo percentil	Días

La segunda parte del estudio consistió en la estimación de los escenarios climáticos futuros para la región de estudio. En esta parte se utilizó la base de datos de anomalías mensuales de temperatura media obtenidas del modelo ensamble (10 modelos globales de circulación general) para el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero A2 (IPCC, 2007) elaborado por Magaña y Caetano (2007). Se obtuvieron valores de anomalías de temperatura media mensual a nivel nacional para los años 2000 a 2060.

Posteriormente, se tomó como climatología actual de referencia del Sistema de Información Ambiental (SIA) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) del período 1961-2003 (Ruiz *et al.*, 2003). Ésta última información se trabajó en formato raster, sumándole algebraicamente las anomalías futuras estimadas por Magaña y Caetano (2007), y así calcular los valores de temperatura media mensual para los años 2011 a 2060. Una vez que se estimaron las temperaturas medias mensuales para cada uno de esos años, se obtuvieron las temperaturas medias mensuales para los cinco escenarios futuros: 1) 2011-2020; 2) 2021-2030; 3) 2031-2040; 4) 2041-2050; y 5) 2051-2060. Para cada uno de estos escenarios se estimaron las temperaturas mínimas para los meses de noviembre a febrero mediante modelos de regresión del SIA, a partir de la temperatura media y la oscilación térmica, después lo cual se contó en el SIA con imágenes de temperaturas medias y mínimas de los meses de noviembre a febrero en los cinco escenarios futuros.

We used the program RCLimDex Ver. 1.0 developed by Zhang and Yang (2004), Meteorological Service of Canada, for climate change indices we used the following methodologies by Zhang *et al.* (2005) and Haylock *et al.* (2006). RCLimDex is a free program (<http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>) running on the R platform (<http://www.r-project.org/>). RCLimDex provides a total of 27 indices (including temperature and precipitation indices); however, to better explain the behaviour of the temperature in the study region, only seven indices based on data of maximum and minimum temperature were chosen (Table 1).

The second part of the study was the estimation of future climate scenarios for the study area. In this part we used the database of monthly mean temperature anomalies obtained model assembly (10 global general circulation models) for the emission scenario A2 greenhouse gases (IPCC, 2007) developed by Magaña and Caetano (2007). Values of monthly mean temperature anomalies were obtained at the national level for the years 2000-2060.

Later, we used as a reference of the current climatology the Environmental Information System (CIS) of the National Research Institute for Forestry, Agriculture and Livestock (INIFAP) for the period 1961-2003 (Ruiz *et al.*, 2003). The latter information is worked into raster format algebraically adding future anomalies estimated by Magaña and Caetano (2007), and thus calculating the values of monthly mean temperature for the years 2011 to 2060. Once the monthly

Para contar con imágenes de horas frío (HF) para los meses de noviembre a febrero y escenarios, éstas se estimaron a partir de datos diarios de temperatura máxima y mínima de 2 642 estaciones del periodo 1961-2003. Para tal efecto, primero se estimaron temperaturas horarias utilizando una función senoidal (Snyder, 1985), con las cuales se cuantificaron las HF entre 0 y 7 °C, intervalo de temperatura donde el frutal acumula frío (Luedeling *et al.*, 2009) en los meses de noviembre a febrero en el estado de Zacatecas (Medina y Ruiz, 2004).

Con las HF diarias cuantificadas para toda la serie histórica de cada estación, se estimaron promedios mensuales, luego se generaron modelos no lineales (Gompertz) (Ec.1) con el sistema de análisis estadístico (Version 9.1; SAS Institute, Cary, NC, USA) entre los promedios mensuales de HF y los promedios mensuales de la temperatura mínima del mes correspondiente, los cuales se utilizaron para estimar las HF mensuales a partir de los mapas de temperatura mínima del SIA. Los modelos resultantes se aplicaron con el SIG Idrisi (Eastman, 2012). Se presenta el modelo ajustado para el mes de enero.

$$HF01 = a * \text{Exp}(- \text{Exp}(- b * (\text{MIN}01 * c))) \quad 1)$$

Donde: a= asíntota; b= tasa de desarrollo o pendiente; c= punto de inflexión.

Después que se obtuvieron los mapas de HF de la climatología actual y en los cinco escenarios futuros, se obtuvieron de esos mapas los promedios mensuales de HF en las áreas agrícolas más importantes de los cinco municipios que comprenden la región duraznera (Figura 2). Dentro de esas áreas agrícolas se localizan las huertas de durazno, lo cual no significa que todas las áreas agrícolas están plantadas con este frutal. También se clasificaron los mapas de HF en rangos 50 unidades y se obtuvo el número de hectáreas de cada rango en las áreas agrícolas de la región duraznera en los diferentes escenarios. Finalmente, con base en el análisis de la información, se propusieron algunas medidas de adaptación a los escenarios climáticos estudiados en la zona duraznera de Zacatecas.

## Resultados y discusión

Las pendientes de los modelos generados resultaron ser positivas y otras negativas; es decir, el comportamiento de la temperatura fue diferente en las siete estaciones seleccionadas (Cuadro 2). Sin embargo, se observan tendencias que indican claramente el incremento de la temperatura en las

average temperatures were estimated for each one of those years, monthly average temperatures for the five future scenarios were obtained: 1) 2011-2020; 2) 2021-2030; 3) 2031-2040; 4) 2041-2050; and 5) 2051-2060. For each of these scenarios the minimum temperatures for the months of November to February were estimated using regression models "SIA" from the mean temperature variation, having SIA images of mean and minimum temperatures for the months of November to February in the five future scenarios.

In order to have pictures of cold hours (CH) for the months of November to February and scenarios, these were estimated from daily data of maximum and minimum temperature of 2 642 stations for the period 1961-2003. To this end, first time temperatures were estimated using a sine function (Snyder, 1985), with which the CH was quantified between 0 and 7 °C, temperature range where the fruit accumulate cold (Luedeling *et al.*, 2009) in the months of November to February in the State of Zacatecas (Medina and Ruiz, 2004).

With the H" quantified daily for the entire time series for each station, monthly averages were estimated, generating then nonlinear models (Gompertz) (Eq.1) with the Statistical Analysis System (Version 9.1; SAS Institute, Cary, NC, USA) between the monthly averages of CH and monthly average minimum temperature for the corresponding month, which were used to estimate monthly CH from the minimum temperature maps SIA. The resulting models were applied to the GIS Idrisi (Eastman, 2012). The adjusted model for the month of January is presented.

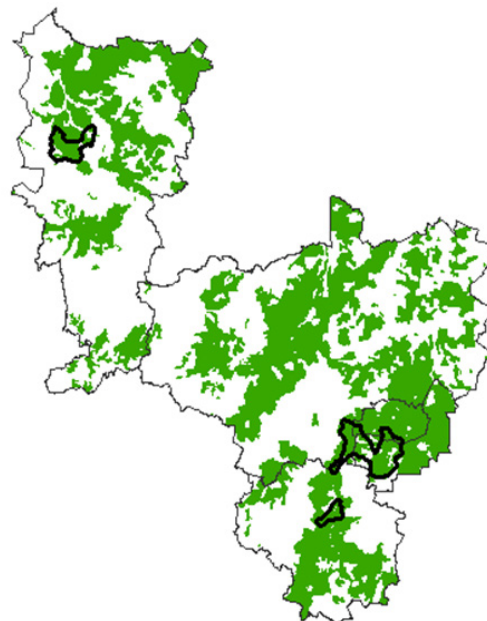
$$HF01 = a * \text{Exp}(- \text{Exp}(- b * (\text{MIN}01 * c))) \quad 1)$$

Where: a= asymptote; b= rate of development or pending; c= inflection point.

After obtaining the maps CH of the current climatology and the five future scenarios, these maps were obtained from the monthly averages of CH in major agricultural areas of the five municipalities that comprise the region (Figure 2). Within these agricultural areas the peach orchards are located, which does not mean that all agricultural areas are planted with this fruit. Maps CH ranges were also classified into 50 units and the number of acres of each range was obtained in agricultural areas of the region in different scenarios. Finally, based on the analysis of information, some adaptation measures to climate scenarios studied in the Zacatecas area were proposed.

series históricas de las estaciones. Los tres primeros índices en el Cuadro 2 corresponden a la temperatura máxima y considerando en conjunto los valores de las pendientes de estos tres índices en las siete estaciones, 13 de 17 pendientes fueron positivas; esto significa una tendencia hacia el incremento de la temperatura máxima. El índice mensual máximo de temperatura mínima diaria (TNx) e índice mensual mínimo de temperatura mínima diaria (TNn) considerados en conjunto, muestran valores de las pendientes positivas en 11 de 14, sugiriendo de igual manera un incremento de la temperatura mínima. Los dos restantes índices, número de días con helada (FD0) y noches frías (TN10p), resultaron con tendencia negativa en 10 de 12 valores de la pendiente, lo que indica una tendencia en la disminución del número de días con helada y porcentaje de noches frías, respectivamente. El análisis retrospectivo mediante la estimación de índices de cambio climático muestra una tendencia hacia incrementar la temperatura en la región de estudio; lo cual conlleva a un decremento de las HF en el periodo invernal.

Los modelos obtenidos con los promedios históricos normales (1961-2003) para cada uno de los meses de noviembre a febrero, considerando a las HF como variable dependiente, se indican en el Cuadro 3. En todos los casos el valor de R<sup>2</sup> fue superior a 90%, lo cual significa que los modelos predictivos son aceptables.



**Figura 2. Áreas agrícolas más importantes de los principales municipios productores de durazno de temporal del estado de Zacatecas, México, dentro de las cuales se ubican las zonas durazneras delimitadas en negro.**

**Figure 2. Most important agricultural areas of the main producing municipalities of peach under rainfed conditions in the State of Zacatecas, Mexico, in which the peach areas are enclosed in black.**

**Cuadro 2. Pendientes de los modelos de ajuste de los índices de cambio climático para cada estación.**

**Table 2. Slopes of adjusting models of climate change indices for each station.**

Núm. folio	Estación	TXx	TX90p	WSDI	FD0	TNx	TNn	TN10p
32003	Víctor Rosales	0.088**	0.82**	1.5**	-0.732**	0.089**	0.098**	-0.132**
32053	Santa Rosa	0.015NS	NE	NE	-0.501**	0.015NS	0.09**	NE
32054	Sombrerete	0.001NS	NE	NE	-0.124**	-0.013NS	0.004NS	NE
32006	El Cazadero	-0.014NS	0.031NS	0.131NS	-0.216NS	-0.016NS	0.041NS	-0.033NS
32018	El Sauz	0.026*	-0.025NS	0.075NS	0.049NS	-0.009NS	0.020NS	-0.096NS
32020	Fresnillo	0.004NS	0.129NS	0.075NS	-0.044NS	0.044*	0.016NS	-0.141*
32021	Col. G. Ortega	-0.038NS	-0.008NS	0.037NS	0.056NS	0.022*	0.005NS	-0.058*

\*, \*\*pendiente significativamente diferente de cero ( $p \leq 0.05$ ), ( $p \leq .01$ ); NS No significativo; NE No estimado; TXx= valor mensual máximo de temperatura máxima diaria; TX90p= porcentaje de días cuando TX > 90 iésimo percentil; WSDI= por lo menos 6 días consecutivos en que TX > 90 iésimo percentil; FD0= número de días en un año cuando TN (mínimo diario) < 0 °C; TNx= valor mensual máximo de temperatura mínima diaria. TNn= valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria; TN10p= porcentaje de días cuando TN < 10 iésimo percentil.

**Cuadro 3. Coeficientes de las variables de los modelos (Gompertz) de predicción para la obtención de las HF mensuales.**

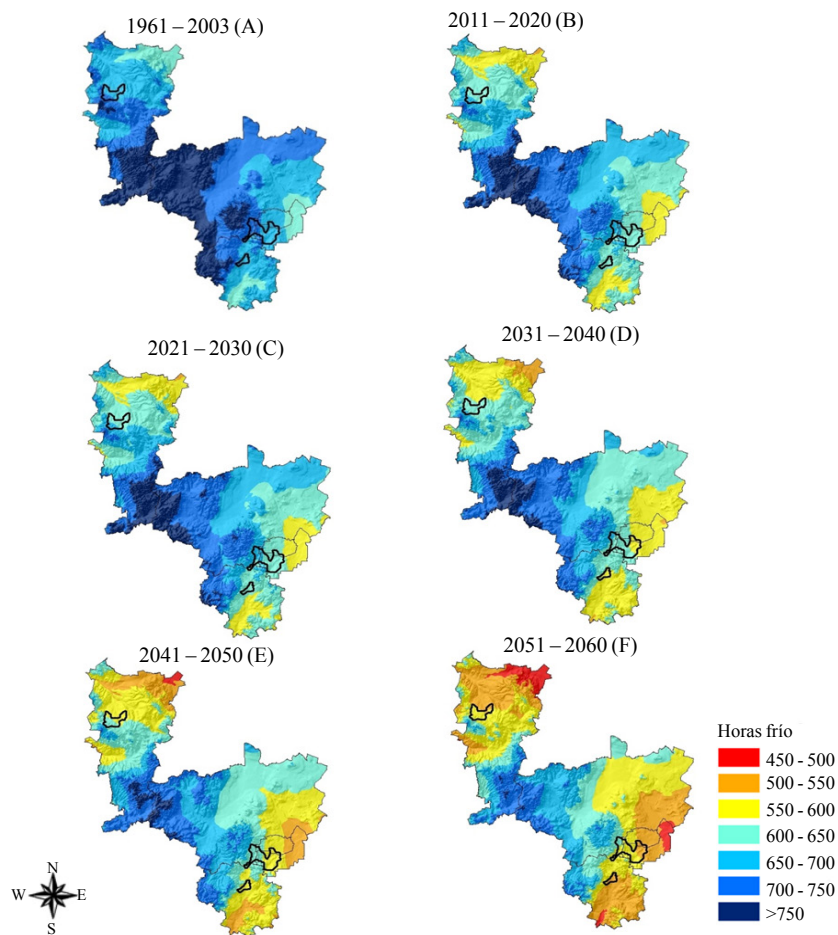
**Table 3. Coefficients of the variables in the models (Gompertz) of prediction for the production of monthly CH.**

Parámetro	Enero	Febrero	Noviembre	Diciembre
A) Asíntota	240.728	219.863	238.04	240.454
B) Tasa de crecimiento	-0.353	-0.325	-0.286	-0.33
C) Punto de inflexión	7.132	6.87	6.792	7.08
R <sup>2</sup> (%)	0.945	0.952	0.956	0.95

La aplicación de los modelos de predicción con los escenarios climáticos actual y futuros, se ejecutó con el SIG Idrisi (Eastman, 2012), produciendo los mapas de HF acumuladas para el periodo de noviembre a febrero (Figura 3). En las figuras se observa que conforme se avanza hacia el futuro, en los escenarios, disminuye el área de los intervalos con mayor cantidad de frío, como son los rangos entre 700 y 750 ó más de 750 HF. En contraste, el área de los intervalos con menor cantidad de HF, como son los rangos entre 450 y 600, aumenta. Esto último claramente pronostica que la cantidad de frío acumulado durante el periodo invernal disminuirá, lo cual soporta resultados señalados previamente por Medina *et al.* (2011) y Jindal y Mankotia (2004).

## Results and discussion

The slopes of the generated models were found to be positive and others negative; i.e., the temperature behaviour was different in the seven selected stations (Table 2). However, trends clearly indicate that the increase in temperature in the historical series of stations is observed. The first three indices in Table 2 correspond to the maximum temperature and considering together the values of the slopes of these three indices in seven seasons, 13 of 17 slopes were positive; this means a trend toward increasing maximum temperature. Monthly maximum daily minimum temperature index (TNx)



**Figura 3. Horas frío acumuladas para el periodo de noviembre a febrero para la climatología actual (A) y para cinco escenarios futuros (B, C, D, E y F) en la región duraznera del estado de Zacatecas.**

**Figure 3. Cold hours accumulated for the period from November to February for the current climate (A) and five future scenarios (B, C, D, E and F) in the peach region of the State of Zacatecas.**

Al mismo tiempo que se obtuvieron los mapas de los escenarios futuros para los municipios, se estimaron los promedios mensuales de HF específicamente en las zonas durazneras ya indicadas en la Figura 3. Los resultados

and minimum monthly daily minimum temperature index (TNn) taken together, show positive slopes values in 11 of 14, suggesting a same way an increase in minimum temperature. The remaining two indices, number of days with frost (FDO)



sugieren que, de la climatología actual (1961-2003) al escenario cinco (2051-2060), la acumulación de HF disminuirá de 688.2 HF a 558.4 HF, respectivamente; i.e., que habrá un diferencial de HF  $\approx$  130 entre ambos periodos (Cuadro 4); situación que ya ha sido presentada para otras áreas frutícolas (Baldocchi y Wong, 2008; Yu *et al.*, 2010).

En la región duraznera de Zacatecas, la mayor parte de la superficie plantada es con durazno criollo de mediano requerimiento de frío (400-650 HF) (Pérez, 1995). De acuerdo con los resultados del Cuadro 4, en el periodo 1961-2003, en promedio, se acumuló frío suficiente para durazno. En los escenarios futuros, el frío promedio acumulado en el periodo invernal, disminuirá hasta el punto en que durante el periodo 2041-2050 las HF acumuladas promedio descenderán por debajo de 600 HF.

**Cuadro 4. Horas frío promedio mensuales en las zonas durazneras más importantes del estado de Zacatecas, México.**  
**Table 4. Average monthly cold hours in the most important peach regions of the State of Zacatecas, Mexico.**

Mes	1961-2003	2011-2020	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060
Enero	202.5	189.7	189.5	184.6	182.2	174.9
Febrero	164.3	149.3	147.2	142.1	134.2	127.2
Noviembre	136.9	118.7	119.2	114.7	111.8	103.2
Diciembre	184.5	173.3	171.7	169.3	162.1	153.2
Suma	688.2	631	627.6	610.8	590.2	558.4

No obstante que la cantidad de frío acumulada en el periodo invernal disminuirá conforme se avanza hacia el futuro, a mediano plazo las HF serán mayores de 600, por lo que se considera que no habrá dificultad en la acumulación de frío para este frutal en las zonas donde actualmente se cultiva en el estado de Zacatecas. En el mismo Cuadro 4, los resultados sugieren que los cuatro meses tendrán una disminución similar en la cantidad acumulada de frío, la cual será aproximadamente de 30 HF para el escenario 2051-2060.

Por otra parte, se clasificaron los mapas de acumulación de frío por intervalos de 50 HF unidades y se obtuvo el número de hectáreas para cada intervalo en las zonas durazneras en los diferentes escenarios (Cuadro 5). En los primeros dos rangos, de 500 a 600 HF, conforme se avanza en los escenarios hacia el futuro, la cantidad de superficie aumenta; es decir, el área aumenta pero no el frío, ya que son intervalos con pocas HF, por lo que al disminuir el frío aumenta la superficie de estas áreas. Por lo contrario, la superficie con intervalos con mayor cantidad de frío (de

and cold nights (TN10p), were negative trend in December 10 slope values, indicating a decreasing trend in the number of days with icy cold and percentage respectively nights. The retrospective analysis by estimating rates of climate change shows a trend towards increasing the temperature in the study region; which leads to a decrease of the CH in the winter period.

The models obtained with normal historical averages (1961-2003) for each of the months of November to February, considering the CH as the dependent variable are shown in Table 3. In all cases the value of R2 was higher than 90%, which means that the predictive models are acceptable.

The application of predictive models with current and future climate scenarios was run with the GIS Idrisi (Eastman, 2012), producing maps of CH accrued for the period from

November to February (Figure 3). In the figures is shown that, as we move forward in stages, the area of the intervals with as much cold reduces, as are the ranges of 700 to 750 or over 750 CH. In contrast, the area of the intervals with fewer CH ranges between 450 and 600, increases. The latter clearly predicts that the amount of cold accumulated during the winter period will decrease, which supports findings previously noted by Medina *et al.* (2011) and Jindal and Mankotia (2004).

While the maps of future scenarios for municipalities were obtained, monthly averages of CH estimated specifically in areas already identified in Figure 3. The results suggest that in the current climate (1961-2003) to stage five (2051-2060), the accumulation of CH decrease of 688.2 CH to 558.4 CH, respectively; i.e., there will be a spread of CH  $\approx$  130 between both periods (Table 4); situation that has been presented to other fruit growing areas (Baldocchi and Wong, 2008; Yu *et al.*, 2010).

In the peach region of Zacatecas, most of the area planted with native peach is of medium cold requirement (400-650 CH) (Pérez, 1995). According to the results of Table 4,

650 a 750) disminuye al disminuir la cantidad de frío. En otras palabras, la superficie con rangos con más frío pasa hacia los rangos con menos frío, demostrando así una clara disminución de frío en el futuro (Fisher *et al.*, 2002; Luedeling *et al.*, 2009).

in the period 1961-2003, on average, cold accumulation was enough for peach. In future scenarios, the average accumulated in the cold winter period will decrease to the point that during the period 2041-2050 the CH cumulative average fall below 600 CH.

**Cuadro 5. Número de hectáreas en diferentes intervalos de acumulación de horas frío en el periodo de noviembre a febrero en las zonas durazneras más importantes de Zacatecas, México.**

**Table 5. Number of hectares in different intervals of cold hours in the period from November to February in the most important peach areas in Zacatecas, Mexico.**

Horas frío	1961-2003	2011-2020	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060
500 - 550	0	0	0	0	0	6 490
550 - 600	0	66	387	7 155	15 183	15 392
600 - 650	0	19 713	20 401	17 331	11 066	4 375
650 - 700	17 843	6 478	5 469	1 771	8	0
700 - 750	8 414	0	0	0	0	0
Suma	26 257	26 257	26 257	26 257	26 257	26 257

De acuerdo a estos resultados, el cultivo de durazno criollo de temporal en las regiones donde actualmente es cultivado en el estado de Zacatecas, aparentemente a corto plazo no tendrá problema en satisfacer los requerimientos de frío invernal, ya que la superficie con HF mayores de 650 es la que primeramente disminuirá. En contraste, como este frutal requiere entre 400 y 650 HF, y los rangos entre 550 y 650 (Cuadro 5) se mantendrán en el futuro, entonces se espera que para entonces haya  $\approx 20$  mil hectáreas susceptibles de ser cultivadas. Apesar de esto, es conveniente a mediano plazo la introducción de variedades con menor requerimiento de frío que las actuales, como podrían ser 'Victoria Temprano', 'Fred' y 'Michele' o de más bajo requerimiento de frío como podrían ser las variedades 'Regio' o 'Sol' (Fernández *et al.*, 2011).

También se pueden identificar áreas agrícolas con mayor acumulación de frío y que reúnan otras condiciones para el establecimiento del cultivo, cómo el riego o bien un buen temporal, pensando en la posibilidad de cambiar las huertas a esos lugares.

## Conclusiones

El análisis retrospectivo con los índices de cambio climático mostró una tendencia hacia el aumento de la temperatura mínima y máxima con una correspondiente disminución en la acumulación del frío invernal, lo cual sugiere un efecto debido al cambio climático.

Even though, the amount of accumulated cold in the winter period will decrease as we move forward in the medium term, CH will be higher than 600, so it is considered that there will be no difficulty in accumulating cold for this fruit in areas where it is currently grown in the State of Zacatecas. In the same Table 4, the results suggest that the four months will have a similar decrease in the cumulative amount of cold, which will be approximately 30 CH for the 2051-2060 scenario.

On the other hand, maps of cold accumulation were classified by intervals of 50 CH units and the number of acres for each interval was obtained in peach areas in different scenarios (Table 5). In the first two ranges of 500-600 CH as we move on to the future scenarios, the amount of surface increases; that is, the area increases but the cold, since they are with little intervals CH, which increases with decreasing cold surface of these areas. On the contrary, the surface at intervals with more cold (from 650 to 750) decreases with decreasing amount of cold. In other words, the surface ranges colder goes toward warmer ranges, showing a clear decrease of cold in the future (Fisher *et al.*, 2002; Luedeling *et al.*, 2009).

According to these results, the landrace peach of rainfed in regions where it is currently grown in the State of Zacatecas, apparently of short term will have no problem in meeting the requirements of winter cold as the surface with CH higher than 650 is first to decrease. In contrast, as this fruit requires between 400 and 650 CH, and ranges between 550 and 650 (Table 5) will remain in the future, then it is expected

En las zonas durazneras, el promedio de las HF acumuladas en el periodo invernal disminuyó sostenidamente hacia escenarios futuros de 688.2 a 558.4 HF del escenario climatológico actual al escenario 2051-2060, respectivamente.

La superficie de las zonas durazneras con más de 650 HF disminuirá en el escenario 2051-2060; mientras que la superficie entre 550 y 650 HF aumentará. Esta última superficie es donde eventualmente se podría cultivar el durazno criollo de Zacatecas, siempre y cuando sus requerimientos de frío invernal se encuentren entre 400 y 650 HF.

Dado que la cantidad de frío invernal está disminuyendo y continuará con esta tendencia en el futuro, será conveniente a mediano plazo la introducción y evaluación de variedades con menor requerimiento de HF. De igual manera se podría explorar áreas con mayor acumulación de frío y con facilidades y aptitud para el establecimiento de nuevas huertas.

## Agradecimientos

Esta publicación es derivada del proyecto INIFAP 10235319302: “cambio climático y su impacto sobre el potencial productivo agrícola, forrajero y forestal”.

## Literatura citada

- Baldocchi, D. and Wong, S. 2008. Accumulated winter chill is decreasing in the fruit growing regions of California. *Climatic Change*. 87(1):153-166.
- Brito-Castillo, L., Díaz, C. S. C. y Ulloa, H. R. S. 2009. Observed tendencies in maximum and minimum temperatures in Zacatecas, Mexico and possible causes. *Int. J. Climatol.* 29:211-221.
- Carlón, A. T. y Mendoza, M. E. 2007. Análisis hidrometeorológico de las estaciones de la Cuenca del Lago Cuitzeo. *Investigaciones Geográficas*. México, D. F. 63:56-76.
- Conde, C.; Ferrer, R. M.; Gay, C. y Araujo, R. 2004. Impactos del cambio climático en la agricultura de México. *In: cambio climático una visión desde México*. SEMARNAT-INE. 225-236 pp.
- Eastman, J. R. 2012. IDRISI selva manual. Clark labs - Clark University. Worcester, Mass. USA. 322 p.
- El Kenawy, A.; López-Moreno, J. I. and Vicente-Serrano, S. M. 2011. Recent trends in daily temperature extremes over northeastern Spain (1960-2006). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11:2583-2603.
- Espíndola, B. M. de la C.; Elías, R. R. D.; Aguilar, M. J. J. y Campos, R. E. 2009. Guía técnica para la producción de durazno en la región sur del estado de México. Fundación Salvador Sánchez Colín CICTAMEX, S. C. Coatepec Harinas, México. 77 p.

that by then there will be  $\approx 20\ 000$  hectares that could be cultivated. Despite this, it is desirable in the medium term the introduction of varieties with lower cold requirement than at the present, as could be, Victoria Temprano, Fred and Michele or with lower cold requirements as the varieties Regio or Sol (Fernández *et al.*, 2011).

We can also identify agricultural areas with higher accumulation of cold and meeting other conditions for crop establishment, such as irrigation or a good rainfed, thinking about the possibility of changing the orchards to those places.

## Conclusions

The retrospective analysis of climate change indices showed a trend toward increasing the minimum and maximum temperature with a corresponding decrease in the accumulation of the winter cold, suggesting an effect due to climate change.

In the peach areas, the average of CH accumulated during the winter period decreased steadily toward future scenarios, from 688.2 to 558.4 CH from the current scenario to the 2051 to 2060 scenario, respectively.

The surface of the peach areas with over 650 CH will decrease in the 2051-2060 scenario; while the surface between 550 and 650 CH will increase. The latter area is where eventually we could grow peaches in Zacatecas, as long as their winter cold requirements are between 400 and 650 CH.

Since the amount of winter cold is decreasing and this trend will continue in the future, it will be convenient for the medium term the introduction and evaluation of varieties with lower requirement of CH. Similarly we could explore more areas and cold storage facilities and fitness for establishing new orchards.

*End of the English version*



- Fernández, M. M. R.; Pérez, G. S.; Parra, Q. R. A.; Mondragón, J. C.; Roa, D. R.; Zacatenco, G. Ma. G.; Chávez, J. A. L. y Rumayor, R. A. F. 2011. Variedades mejoradas y selecciones de durazno del INIFAP. INIFAP-CIRC. Folleto técnico Núm. 15. 32 p.

- Folland, C. K.; Karl, T. R.; Christy, J. R.; Clarke, R. A.; Gruza, G. V.; Jouzel, J.; Mann, M. E.; Oerlemans, J.; Salinger, M. J. and Wang, S. W. 2001. Observed climate variability and change. *In: climate change: the scientific basis. Contribution of working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (Ed.) Houghton, J. T.; Ding, Y.; Griggs, D. J.; Noguer, M.; van der Linden, P. J.; Dai, X.; Maskell, K. and Johnson, C. A. Cambridge Univ. Press. 2001.
- Haylock, M. R.; Peterson, T. C.; Alves, L. M.; Ambrizzi, T.; Anunciação, Y. M. T.; Baez, J.; Barros, V. R.; Berlato, M. A.; Bidegain, M.; Coronel, G.; Garcia, V. J.; Grimm, A. M.; Karoly, D.; Marengo, J. A.; Marino, M. B.; Moncunill, D. F.; Nechet, D.; Quintana, J.; Rebello, E.; Rusticucci, M.; Santos, J. L.; Trebejo, I. and Vincent, L. A. 2006. Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. *J. Climate.* 19:1490-1512.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. *Climate Change 2007: mitigation of climate change. Contribution of working group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Metz, B.; Davidson, O.; Bosch, P.; Dave, R. and Meyer, L. (Eds.). Cambridge University Press, U. K. and USA. 851 p.
- Jindal, K. K. and Mankotia, M. S. 2004. Impact of changing climatic conditions on chilling units, physiological attributes and productivity of apple in western Himalayas. *Acta Hort. (ISHS)* 662:111-117.
- Jones, P. D.; Parker, D. E.; Osborn, T. J. and Briffa, K. R. 2009. Global and hemispheric temperatures anomalies land and marine instrumental records. *In: trends: a compendium of data on global change. Carbon dioxide information analysis center. Oak Ridge National Laboratory, U. S. Department of Energy. USA.* 354 p.
- Katz, R. W. and Brown, B. G. 1992. Extreme events in a changing climate: variability is more important than averages. *Climatic Change.* 21:289-302.
- Luedeling, E.; Zhang, M. and Girvetz, E. H. 2009. Climatic changes lead to declining winter chill for fruit and nut trees in California during 1950-2009. *PLoS ONE.* 4(7):675-688.
- Luedeling, E.; Girvetz, E. H.; Semenov, M. A. and Brown, P. H. 2011. Climate change affects winter chill for temperate fruit and nut trees. *PLoS ONE* 6(5):20155-1371.
- Magaña, V. and Caetano, E. 2007. Pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por Estado y por Sector. Informe Final Proyecto de Investigación. Centro de Ciencias de la Atmósfera-UNAM-Instituto Nacional de Ecología (INE). Documento no publicado. México, D. F. 41 p.
- Medina, G. G. y Ruiz, C. J. A. 2004. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Zacatecas. (periodo 1961-2003). INIFAP-CIRNOC. Libro técnico Núm. 3. Zacatecas, Zacatecas, México. 240 p.
- Medina-García, G.; Ruiz-Corral, J. A.; Ramírez-Legarreta, M. R. y Díaz-Padilla, G. 2011. Efecto del cambio climático en la acumulación de frío en la región manzanera de Chihuahua. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2:195-207.
- Pérez, G. S. 1995. Producción de durazno, ciruelo y chabacano. *In: Memorias de la Primera Reunión Nacional e Internacional. Querétaro y Zacatecas, México, D. F.,* 45-59 p.
- United Nations Environment Programme (UNEP). 2009. *Climate change. Science compendium.* (Eds.) McMullen, P. and J. Jabbour, C. 68 p.
- Ruiz, C. J. A.; González, A. I. J.; Regalado, R. J. R.; Anguiano C. J.; Vizcaíno V. I. y González, E. D. R. 2003. Recursos edafoclimáticos para la planeación del sector productivo en el estado de Jalisco. Libro técnico Núm. 2. INIFAP-CIRPAC. Ed. Conexión Gráfica. 172 p.
- Ruiz, C. J. A.; Medina, G. G.; Manríquez, O. J. D. y Ramírez, D. J. L. 2010. Evaluación de la vulnerabilidad y propuestas de medidas de adaptación a nivel regional de algunos cultivos básicos y frutales ante escenarios de cambio climático. Informe Final de Proyecto INIFAP-INE. Guadalajara, Jalisco. 108 p.
- 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.* 2:309-323.
- Salinger, M. J. 2005. Climate variability and change: past, present and future -an overview. *In: Increasing climate variability and change.* Salinger, J. M. Sivakumar, V. K. and Motha, R. P. (Eds.). Springer. 9-29 pp.
- Santillán-Espinoza, L. E.; Blanco-Macías, F.; Magallanes-Quintanar, R.; García-Hernández, J. L.; Cerano-Paredes, J.; Delgadillo-Ruiz, O. y Valdez-Cepeda, R. D. 2011. Tendencias de temperaturas extremas en Zacatecas, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* (2):207-219.
- Sistema de Información Agropecuaria de Consulta (SIACON) 1980-2012. SAGARPA. 2013a. México, D. F. <http://www.siap.gob.mx/siacion>.
- Sistema de Información Agropecuaria de Consulta (SIACON) 2001-2012. SAGARPA. 2013b. México, D. F. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>.
- Snyder, R. L. 1985. Hand calculating degree days. *Agric. For. Meteorol.* 35:353-358.
- Tejeda, M. A. y Rodríguez, V. L. 2007. Estado de la investigación de los aspectos físicos del cambio climático en México. *Investigaciones Geográficas. Boletín.* 62:31-43.
- Westwood, M. N. 1993. *Temperate-zone pomology.* Timber press. Portland, Oregon. 523 p.
- Yu, H.; Luedeling, E. and Xu J. 2010. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. *PNAS* 107:22151-22156.
- Zarazúa-Villaseñor, P.; Ruiz-Corral, J. A.; González-Eguiarte, D. R.; Flores-López, E. H. y Ron-Parra, J. 2011. Cambio climático y agroclimático para el ciclo otoño-invierno en la región Ciénega de Chapala. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2:295-308.
- Zhang, X. and Yang, F. 2004. RCLimDex (1.0). User manual. Climate research branch. environment Canada. Downsview, Ontario, Canada. 23 p.
- Zhang, X.; Hegerl, G.; Zwiers, F. W. and Kenyon, J. 2005. Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes. *J. Climate* 18:1641-1651.