

IMPACTO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA AGRICULTURA DE TEMPORAL EN EL ESTADO DE TLAXCALA, MÉXICO

IMPACT OF CLIMATE VARIABILITY ON RAINFED AGRICULTURE IN THE STATE OF TLAXCALA, MEXICO

Rogelio Bernal-Morales¹, Ma. de los Ángeles Velasco-Hernández², Tomás Morales-Acoltzi³, Maricela Hernández-Vázquez⁴, Saturnino Orozco-Flores⁴, José Jiménez-López⁴

¹Centro de Investigación en Cambio Climático, Facultad de Agrobiología, UATx, Av. Tlahuicole 505-A, Col. Adolfo López Mateos, Tlaxcala, Tlax. 90040, (rbernal07@hotmail.com), ²Facultad de Ingeniería Química, BUAP. Ciudad Universitaria. Avenida San Claudio y 18 sur, 72570. Puebla, México. (ambientalbuap@yahoo.com.mx), ³Modelación Matemática de Procesos Atmosféricos, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Ciudad de México 04510, (acoltzi@atmosfera.unam.mx), ⁴Licenciatura en Ciencias Ambientales, Campus Tlaxco, Facultad de Agrobiología, UATx, Calle Benito Juárez # 3, Antigua casa Agrícola Col. Centro. 90250, Tlaxco, Tlax., (mariheva@live.com.mx, orosat80@hotmail.com, pepejilo@outlook.com).

RESUMEN

El incremento de la población implicará tener que aumentar la producción de alimentos a escala mundial, lo que ejercerá más presión sobre los recursos naturales, especialmente el agua, debido a que la agricultura de riego utiliza 78% del agua extraída. Además, no siempre está disponible, debido a la variabilidad que presenta la precipitación -cantidad y distribución, por lo que será imprescindible un buen manejo del recurso hídrico, que permita su máximo aprovechamiento, para garantizar la seguridad alimentaria. Se evaluó el posible impacto de la variabilidad natural o cambio climático en el periodo de crecimiento de los principales cultivos de temporal como el maíz, cebada y el trigo, en el estado de Tlaxcala. Para ello, se analizaron las variables de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima. Para identificar el periodo de crecimiento de los cultivos de temporal se utilizó un método objetivo y sistemático, aplicando la descomposición de una función discreta en sus armónicos. Los resultados mostraron una disminución en el periodo de crecimiento en cinco estaciones, mientras que en cinco de ellas se presenta un aumento y en las dos restantes tienen la misma duración. Este impacto diferenciado permitirá planificar las actividades agrícolas de temporal y se hará una mejor selección de cultivos –variedades– para cada zona.

Palabras clave: armónicos, periodo de crecimiento, periodo libre de helada.

ABSTRACT

The growth in population would imply having to increase food production worldwide, which would exert more pressure on natural resources, especially water, because irrigation agriculture uses 78% of the water extracted. In addition, it is not always available because of the variability that precipitation, quantity and distribution present, which is why good management of the water resource will be essential, that could allow its maximum exploitation to ensure food security. The possible impact of natural variability and/or climate change was evaluated in the growth period of the main rainfed crops such as maize, barley and wheat, in the state of Tlaxcala. For this purpose, the variables of precipitation, maximum temperature and minimum temperature were analyzed. An objective and systematic method was used to identify the growth period of the rainfed crops, applying the decomposition of a discrete function in their harmonics. The results showed a decrease in the growth periods in five stations, while they show an increase in five of them, and in the two remaining ones they have the same duration. This differentiated impact will allow planning rainfed agricultural activities and a better selection of crops –varieties– for each zone.

Key words: harmonics, growth period, frost-free period.

INTRODUCTION

The Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) mentions that covering the food requirements of 2.3 billion additional people in 2050 will be a great challenge,

* Autor responsable ✦ Author for correspondence.

Recibido: febrero, 2019. Aprobado: abril, 2019.

Publicado como ARTÍCULO en ASyD 17: 713-733. 2020.

INTRODUCCIÓN

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, por sus siglas en inglés) menciona que cubrir los requerimientos de alimentación de 2 mil 300 millones de personas adicionales en 2050 será un gran desafío, ya que se tendrán que gestionar los recursos naturales disponibles, especialmente el hídrico. Esto debido a que la disponibilidad de agua se verá aún más restringida, ya que se prevé que la demanda mundial de agua aumente 55%, debido a la creciente demanda de la industria, la generación de energía termoeléctrica y el uso doméstico. Ante tal escenario se ve poco margen para el uso o empleo de agua en la agricultura de riego (OECD, 2012), por lo que se hace imprescindible un buen manejo de los recursos hídricos disponibles, que permita su aprovechamiento al máximo para potencializar la agricultura.

El cambio climático (CC) está afectando la productividad agrícola, especialmente la agricultura de temporal. Las predicciones climáticas indican un mundo más cálido dentro de los próximos 50 años, las temperaturas máximas y mínimas aumentarán causando una disminución sustancial del rendimiento en áreas de baja latitud; mientras que la lluvia proyectada no tiene un patrón de variabilidad distinto. Por lo tanto, identificar y evaluar las prácticas adecuadas de adaptación y mitigación tiene una importancia primordial y contribuciones para mejorar la productividad de los cultivos, reducir los impactos negativos del CC en la disponibilidad y productividad del agua (Abadi Berhane, 2018).

Uno de los escenarios a nivel mundial, muestra una pérdida de 10% en la producción de maíz para el año 2055 (Jones y Thornton, 2003). Por otra parte, Peng *et al.* (2004) mencionan que el rendimiento del cultivo de arroz disminuirá 10% por cada incremento de 1°C en la temperatura al aproximarse la estación seca.

Los impactos relacionados con el cambio climático ya son evidentes en muchas regiones y sectores y se espera que sean cada vez más perjudiciales en todo Estados Unidos. Los cambios climáticos interactúan con otros factores ambientales y sociales de maneras que pueden moderar o intensificar estos impactos. Los beneficios actuales del calentamiento incluyen temporadas de cultivo más largas para la agricultura, sin embargo, las estaciones de crecimiento más

since the available natural resources, especially water, will have to be managed. This is because the water availability will be increasingly restricted, since it is foreseen that the global demand for water will increase by 55%, due to the growing demand from industry, thermoelectric energy generation, and domestic use. Facing this scenario, there is scarce margin for the use or exploitation of water in irrigation agriculture (OECD, 2012), which is why good management of the available water resources that would allow its maximum exploitation to potentiate agriculture, becomes essential.

Climate change (CC) is affecting agricultural productivity, especially rainfed agriculture. Climate predictions indicate a warmer world within the next 50 years, maximum and minimum temperatures will increase causing a substantial decrease of the yield in low latitude areas, while the rain projected does not have a different variability pattern. Therefore, identifying and evaluating the adequate adaptation and mitigation practices have primordial importance and contribute to improve the productivity of the crops, and to reduce the negative impacts of CC on the availability and productivity of water (Abadi Berhane, 2018).

One of the scenarios at the global level shows a loss of 10% in maize production by the year 2055 (Jones and Thornton, 2003). On the other hand, Peng *et al.* (2004) mention that the yield of the rice crop will decrease 10% for every 1 °C increase in temperature when the dry season approaches.

The impacts related to climate change are already evident in many regions and sectors and it is expected that they will be increasingly damaging in the entire United States. Climatic changes interact with other environmental and social factors in ways that can moderate or intensify these impacts. The current benefits of warming include longer cultivation seasons for agriculture, although the longer growth seasons, together with higher temperatures and levels of carbon dioxide, can increase the production of pollen, intensifying and lengthening the allergy season (Melillo *et al.*, 2014).

Climate variability is a defining factor, and species can be found with a flowering phase, or another phenophase, that is controlled by temperature; there are other plants where the photoperiod is determinant and even some species where water availability is the factor that triggers

largas, junto con temperaturas más altas y niveles de dióxido de carbono, pueden aumentar la producción de polen, intensificando y alargando la temporada de alergias (Melillo *et al.*, 2014).

La variabilidad del clima es un factor determinante, se pueden encontrar especies cuya floración u otra fenofase está controlada por la temperatura, otras plantas donde el fotoperiodo es determinante, e incluso algunas especies donde la disponibilidad de agua sea el factor que desencadene un determinado evento fenológico (Alvarado *et al.*, 2002).

Monterroso *et al.* (2015) mencionan que la agricultura es uno de los sectores más vulnerables ante el CC, y han evaluado los efectos del CC en la agricultura, los resultados muestran una posible reducción en las áreas potenciales, disminución en el periodo de crecimiento y en el rendimiento de los cultivos de maíz, frijol, trigo y café. En América Latina y el Caribe (ALC), el arroz, trigo, maíz, frijol y soya juegan un papel importante debido a sus aportes a la economía y a la seguridad alimentaria (Rodríguez *et al.*, 2016). La agricultura de temporal en México es vulnerable a las variaciones climáticas, como las sequías, las inundaciones y las heladas. Los efectos esperados del CC en el rendimiento del maíz de temporal serían negativos, al reducirse el periodo de crecimiento, especialmente en la etapa de llenado de grano (Conde *et al.*, 2000).

En cambio, el calentamiento global, podría resultar favorable para el trigo en algunas regiones, pero podría ver disminuida su producción en forma considerable, en zonas donde se registran temperaturas óptimas o bien en ámbitos más fríos o templados en donde aún no se desarrolla (Ortiz *et al.*, 2008). Es por lo que se considera que los patrones climáticos actuales que afectarán el desarrollo y los procesos fisiológicos de los cultivos, es diferenciado en las demandas hídricas de los cultivos por efecto del CC, se requiere analizarlos localmente con información validada en campo (Goyal, 2004).

Resolver el problema de rendimientos agrícolas es crucial para la supervivencia de los agricultores, quienes viven en ambientes marginales, donde las condiciones agroclimáticas son un desafío, por lo que el manejo del riesgo es una preocupación importante para las familias rurales (Altieri y Nicholls, 2009). Existen estudios con relación a la cuantificación de los efectos del CC sobre la agricultura (Alayon *et al.*, 2016; Martínez *et al.*, 2017; Meza, 2017), aunque también se señala que dichos estudios aún son desconocidos y

specific phenological events (Alvarado *et al.*, 2002). Monterroso *et al.* (2015) mention that agriculture is one of the most vulnerable sectors in face of CC, and they have evaluated the effects of CC on agriculture; their results show a possible reduction in potential areas, a decrease in the growth period and in the yield of maize, bean, wheat and coffee. In Latin America and the Caribbean (LAC), rice, wheat, maize, bean and soy play an important role because of their contributions to the economy and to food security (Rodríguez *et al.*, 2016). Rainfed agriculture in Mexico is vulnerable to climate variations, such as droughts, flooding and frosts. The expected effects of CC on rainfed maize yield would be negative, since the growth period is reduced, especially in the stage of grain filling (Conde *et al.*, 2000).

Instead, global warming could be favorable for wheat in some regions, but its production could be decreased considerably in zones where optimal temperatures are found or else in colder or temperate environments where it still has not developed (Ortiz *et al.*, 2008). This is why it is considered that current climate patterns that will affect the development and physiological processes of crops are differentiated in the water demands of crops as a result of CC, and they need to be analyzed locally with information validated in the field (Goyal, 2004).

Solving the problem of agricultural yields is crucial for the survival of farmers, who live in marginal environments where the agro-climate conditions are a challenge, which is why risk management is an important worry for rural families (Altieri and Nicholls, 2009). There are studies related to the quantification of the effects of CC on agriculture (Alayon *et al.*, 2016; Martínez *et al.*, 2017; Meza, 2017), although it should be noted that these studies are still unknown and that they require further research to understand the complexity of the responses of crops to CC and the lack of knowledge about what the climate will be in the medium and long term (Jarvis *et al.*, 2011).

The increase in temperature from the effect of CC could cause great impacts on the water demand of crops, causing a reduction from the shortening of the phenological cycle of crops in the Fall-Winter cycle, and to a lesser degree of crops in the Spring-Summer cycle (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2011). It means that agriculture and food security are threatened

que requieren mayor investigación para comprender la complejidad de las respuestas de los cultivos al CC y al desconocimiento de cuál será el clima en el mediano y largo plazo (Jarvis *et al.*, 2011).

El incremento de la temperatura por efecto del CC, podría ocasionar grandes efectos en la demanda hídrica de los cultivos, provocará reducción por acortamiento del ciclo fenológico de los cultivos del ciclo Otoño-Invierno, y en menor grado para los cultivos del ciclo Primavera-Verano (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2011). Significa que la agricultura y la seguridad alimentaria se encuentran amenazadas por el CC en América Latina y el Caribe; y los efectos que éste pueda producir en cada país dependerán de la geografía, de los recursos biofísicos y de su gestión, de la agroecología, de los sistemas de producción agropecuaria, del comportamiento ante el riesgo, de las inversiones y de la capacidad de adaptación, entre otros factores (Ortiz, 2012).

Las manifestaciones del CC son prácticamente inevitables y se intensificarán durante este siglo y por tanto es indispensable instrumentar procesos de adaptación (Galindo *et al.*, 2015). Debido a la heterogeneidad de los cambios en el clima, que corresponden a patrones de lluvia e incrementos de las temperaturas, las medidas que deberían tomarse en la región, para adaptarse a sus efectos serán diferentes entre países y cultivos (Rodríguez *et al.*, 2016).

Se anticipa que el CC cause impactos sobre la producción agrícola, los cuales serán diversos, severos y específicos, de acuerdo a la ubicación geográfica, por otra parte, los sistemas agrícolas tradicionales en especial los indígenas, son depósitos de abundantes principios y medidas que pueden ayudar a que los sistemas agrícolas modernos se vuelvan más resilientes a los extremos climáticos (Nicholls *et al.*, 2017). Se considera que la adaptación ante el CC, implica transitar de lo inevitable a lo sostenible. Diversos estudios y modelos predicen una disminución de la seguridad alimentaria en países en desarrollo asumiendo escenarios de severos cambios en el clima y con poca capacidad de adaptación a los cambios a nivel de fincas (Reddy and Hodges, 2000).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) menciona que habrá un mayor impacto de los eventos climáticos extremos en los sectores vinculados al clima, como el agua, la agricultura y la seguridad alimentaria. También se predice que los cambios en el clima podrían

by CC in Latin America and the Caribbean, and the effects that it can produce in each country will depend on the geography, biophysical resources and their management, agroecology, agricultural and livestock production systems, behavior in face of risk, investments, and the capacity to adapt, among other factors (Ortiz, 2012).

The manifestations of CC are practically inevitable and they will intensify during this century and therefore it is essential to implement adaptation processes (Galindo *et al.*, 2015). Due to the heterogeneity of changes in the climate, which correspond to rain patterns and temperature increases, the measurements that ought to be taken in the region to adapt to their effects will be different between countries and crops (Rodríguez *et al.*, 2016).

It is anticipated that CC will cause impacts on agricultural production, which will be diverse, severe and specific, according to the geographic location; on the other hand, traditional agricultural systems, particularly indigenous, are deposits of abundant principles and measures that can help modern agricultural systems to become more resilient to climatic extremes (Nicholls *et al.*, 2017). It is considered that adaptation in face of CC implies going from the inevitable to the sustainable. Various studies and models predict a decrease in food security in developing countries, assuming scenarios of severe changes in climate and scarce capacity for adaptation to changes at the farm level (Reddy and Hodges, 2000).

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) mentions that there will be a higher impact from extreme climate events on the sectors linked to climate, such as water, agriculture and food security. It is also predicted that changes in climate could greatly affect the management systems of water resources (IPCC, 2012). On the other hand, the IPCC (2014) concludes that there will be more negative impacts of climate change in the yield of crops, than positive impacts. The projections where temperature increases 2 °C indicate that CC without adaptation will have a negative impact on production of the main crops.

Zarazúa *et al.* (2011), when estimating the impact of CC on agro-climate and phenological parameters of maize cultivation, indicate that there will be more extreme thermal conditions, and

afectar gravemente a los sistemas de gestión de los recursos hídricos (IPCC, 2012). Por otra parte, el IPCC (2014) concluye que habrá más impactos negativos del cambio climático en el rendimiento de los cultivos, que impactos positivos. Las proyecciones en donde se incremente la temperatura 2°C indican que el CC sin adaptación tendrá un impacto negativo en la producción de los principales cultivos.

Zarazúa *et al.* (2011) al estimar el impacto del CC sobre los parámetros agroclimáticos y fenológicos del cultivo de maíz, indican que habrá condiciones térmicas más extremas, y por ende el periodo de crecimiento se verá afectado, ya que habrá una disminución de éste.

Ruiz-Corral *et al.*, (2016) evaluaron el impacto del CC sobre la estación de crecimiento en el estado de Jalisco, México. Los resultados indican que existen diferencias interregionales para la fecha de inicio, fecha de finalización y duración de la estación de crecimiento. Esta se reducirá entre 1 y 21 días en 2050 y de 1 a 35 días en 2070, con respecto a la climatología de referencia (1961-2010). Esta disminución de la duración es mayormente debida a un retraso en el inicio de las lluvias y en menor grado un adelanto en la finalización del período de lluvias.

Ruiz Corral *et al.* (2000) cuantificaron los cambios en la estación de crecimiento en el estado de Jalisco. Analizaron 42 estaciones y los resultados indican una reducción promedio de 6 días, debido a un retraso promedio de 2 días en el inicio de la estación de crecimiento y de un adelanto promedio de 4 días al final de esta.

Christiansen *et al.* (2011) mencionan que comprender los efectos del impacto del CC sobre la estación de crecimiento es importante para cuantificar las condiciones futuras del uso del agua. Para esto modelaron cambios futuros en la duración de la estación de crecimiento en 14 cuencas en 11 estados, en busca de tendencias en la longitud total (anual), así como los cambios en el momento de inicio (primavera) y el final (otoño) de la estación de crecimiento. Los resultados mostraron un aumento en la duración de la estación de crecimiento anual en las 14 cuencas, con un promedio de 27 a 47 días para los tres escenarios. El cambio en el inicio y el final de la temporada de crecimiento de primavera y otoño varió en las 14 cuencas, con mayores aumentos en la duración total de la temporada de crecimiento en las regiones montañosas y menores aumentos en las regiones del Medio Oeste, Nordeste y Sudeste.

therefore the growth period will be affected, since it will decrease.

Ruiz-Corral *et al.* (2016) evaluated the impact of CC on the growth season in the state of Jalisco, Mexico. Their results indicate that there are interregional differences for the starting date, ending date, and duration of the growth season. It will be reduced between 1 and 21 days in 2050 and from 1 to 35 days in 2070, compared to the reference climatology (1961-2010). This decrease of duration is mostly due to a delay in the beginning of rainfall and to a lesser degree to an advance in the ending of the rainy period.

Ruiz Corral *et al.* (2000) quantified the changes in the growth season in the state of Jalisco. They analyzed 42 seasons and the results indicate an average reduction of 6 days, due to an average delay of 2 days at the beginning of the growth season and an average advance of 4 days at the end of it.

Christiansen *et al.* (2011) mention that understanding the effects of the impact of CC on the growth season is important to quantify the future conditions of water use. For this, they modelled future changes in the duration of the growth season in 14 basins in 11 states, in search for trends in total length (annual), as well as changes in the moment of beginning (Spring) and ending (Fall) of the growth season. The results showed an increase in the duration of the annual growth season in the 14 basins, with an average of 27 to 47 days for the three scenarios. The change in the beginning and ending of the growth season from Spring to Fall varied in the 14 basins, with greater increases in the total duration of the growth season in the mountainous regions and lower increases in the regions of the Mid-West, Northeast and Southeast.

Piñeiro (2012) mentions that “Climate change and food security can lead to a ‘vicious cycle’ since modern agriculture appears as an important generator of greenhouse gases, which in turn affect it negatively through temperature increase and higher variability of precipitations”. The European Environment Agency (EEA) mentions that the changes in temperatures and the variation of the growth period can affect the yields of crops. Therefore, it is expected that the yields of crops will increasingly vary from one year to another due to extreme climatic events and other factors such as pests and diseases (EEA, 2015).

Piñeiro (2012) menciona que el “Cambio climático y la seguridad alimentaria pueden llevar a un “círculo vicioso”, ya que la agricultura moderna aparece como un importante generador de gases de efecto invernadero, que a su vez la afectan negativamente a través del aumento de la temperatura y la mayor variabilidad de las precipitaciones”. La European Environment Agency (EEA) menciona que los cambios en las temperaturas y la variación del periodo de crecimiento pueden afectar los rendimientos de los cultivos. Por lo que se espera que los rendimientos de los cultivos varíen cada vez más de un año a otro debido a eventos climáticos extremos y otros factores como plagas y enfermedades (EEA, 2015).

Por otra parte, Kang *et al.*, (2009) revisaron literatura relacionada con la evaluación de los impactos del cambio climático en la productividad de los cultivos utilizando modelos climáticos, hídricos y de rendimiento de los cultivos. Los principales resultados indican que se proyecta que la disponibilidad de agua aumentará en algunas partes del mundo, lo que tendrá su propio efecto sobre la eficiencia del uso del agua y la asignación del agua. Dado que los efectos del cambio climático en el equilibrio hídrico del suelo conducirán a cambios en la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas, en consecuencia, el período de crecimiento del cultivo puede acortarse en el futuro.

La agricultura seguirá siendo el impulso del crecimiento y desarrollo rural, por consiguiente, la productividad agrícola será un factor determinante para satisfacer la creciente demanda de alimento de la población (Osorio *et al.*, 2012).

La Organización Meteorológica Mundial (OMM), estableció un periodo de referencia reglamentario para la evaluación a largo plazo del CC y la variabilidad del clima, el cual debe ser de 30 años de 1961 a 1990 (OMM, 2011), mientras que, en el más reciente de 1991 a la fecha, se buscan señales de variabilidad natural o cambio climático, en caso de existir. Por su parte, Bernal-Morales *et al.* (2017) establecieron un método objetivo y sistemático para identificar el periodo de crecimiento de los cultivos de temporal. Es importante generar conocimiento que permita identificar el impacto diferenciado del CC en el periodo de crecimiento libre de heladas, para planificar las actividades agrícolas de temporal, que en el estado de Tlaxcala corresponden a 89.07% del total de la superficie agrícola (SAGARPA, 2018). El objetivo de la investigación es identificar el efecto

On the other hand, Kang *et al.* (2009) reviewed the literature related to the evaluation of the impacts of climate change on productivity of crops using models for climate, water, and yields of crops. The main results indicate that it is projected that water availability will increase in some parts of the world, which will have its own effect on the efficiency of water use and the allotment of water. Given that the effects of climate change on the water balance of the soil will lead to changes in evaporation from the soil and transpiration of the plants, as consequence, the growth period of the crop could be shortened in the future.

Agriculture will continue to be the impulse of rural growth and development, and consequently agricultural productivity will be a determinant factor to satisfy the growing demand for food for the population (Osorio *et al.*, 2012).

The World Meteorological Organization (WMO) established a mandatory reference period to evaluate CC and climate variability in the long term, which should be of 30 years, from 1961 to 1990 (OMM, 2011), while signals of natural variability or climate change are sought in the most recent, from 1991 to date, in case of existing. For their part, Bernal-Morales *et al.* (2017) established an objective and systematic method to identify the growth period of rainfed crops. It is important to generate knowledge that allows identifying the differentiated impact of CC on the frost-free growth period, to plan rainfed agricultural activities, which in the state of Tlaxcala correspond to 89.07% of the total agricultural surface (SAGARPA, 2018). The objective of the study is to identify the effect of CC on the frost-free growth period of crops for the state of Tlaxcala. The hypothesis that we considered is whether the natural variability and/or climate change have a positive/negative impact on the frost-free growth period of crops, causing an increase or decrease in its duration.

DATA AND METHODOLOGY

Tlaxcala is located between 19°43'44" and 19°06'18" of latitude North, and between 97°37'31" and 98°42'30" of longitude West. It neighbors to the north with Hidalgo and Puebla; to the east and south with Puebla; and to the west with Puebla, Estado de México and Hidalgo, Figure

del CC sobre el periodo de crecimiento libre de heladas de los cultivos para el estado de Tlaxcala. La hipótesis que consideramos es si la variabilidad natural o cambio climático tienen un impacto positivo/negativo sobre el periodo de crecimiento libre de helada de los cultivos, provocando un aumento o disminución en la duración de este.

DATOS Y METODOLOGÍA

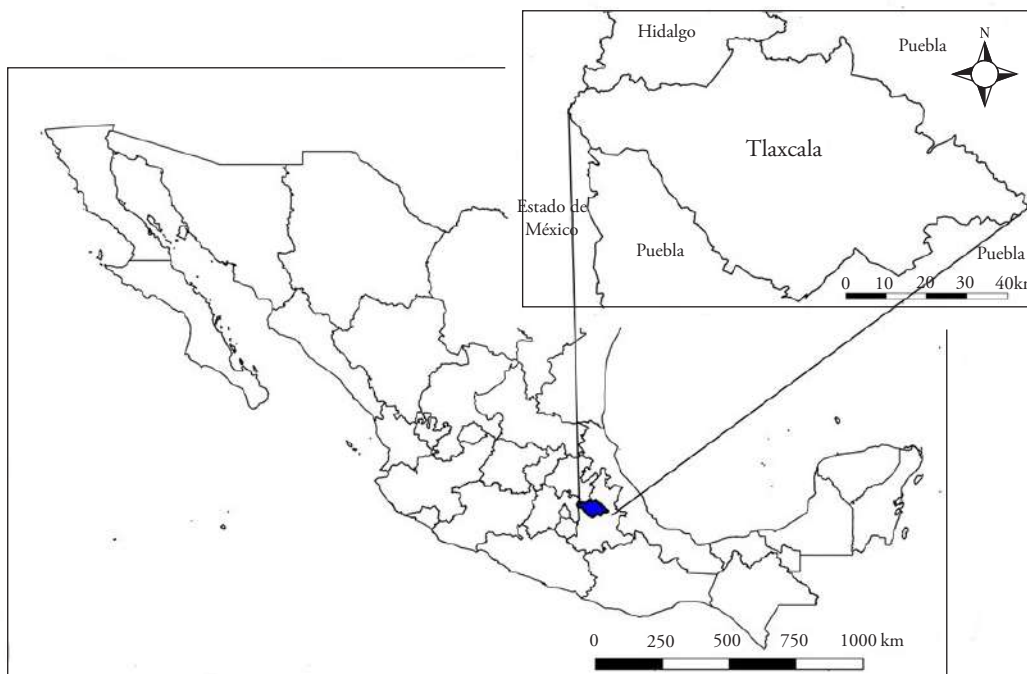
Tlaxcala se ubica entre los 19°43'44" y los 19°06'18" de latitud norte; y a los 97°37'31" y los 98°42'30" de longitud oeste. Colinda al norte con Hidalgo y Puebla; al este y sur con Puebla; al oeste con Puebla, Estado de México e Hidalgo, Figura 1. En el estado, 74.9% de su superficie está destinada a la agricultura (INEGI, 2017), en 2016 la agricultura de temporal participa con 89.07% de la superficie estatal (SAGARPA, 2018).

Se analizó la serie de tiempo (ST) diaria de las variables de precipitación (PCP), temperatura máxima (TMÁX) y mínima (TMÍN) de 33 estaciones climatológicas operando en el estado de Tlaxcala, del periodo 1961-2014 (Servicio Meteorológico Nacional, 2018).

1. In the state, 74.9% of its surface is destined to agriculture (INEGI, 2017), rainfed agriculture participated with 89.07% of the state surface in 2016 (SAGARPA, 2018).

A daily time series (TS) was analyzed of the variables precipitation (PCP), maximum temperature (TMAX), and minimum temperature (TMIN) from 33 climatological stations operating in the state of Tlaxcala, from the period 1961-2014 (Servicio Meteorológico Nacional, 2018). The RclimDex software was applied to the TS to analyze the quality of data, which led to selecting 12 climatological stations with less than 12% of the missing data and at least 10 years in the base period and 15 years in the most recent period. Figure 2 presents the 12 climatological stations selected, the shaded area with white color represents the agricultural surface, while the areas with green color are other soil uses, such as forests, secondary vegetation, bodies of water, shrubs, human settlements and grasslands, among others.

The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 1997) mentions that the growth period (GP) is the number of days,



Fuente: elaboración propia con insumos de INEGI. ♦ Source: prepared by authors with information from INEGI.

Figura 1. Estado de Tlaxcala, México.
Figure 1. State of Tlaxcala, Mexico.

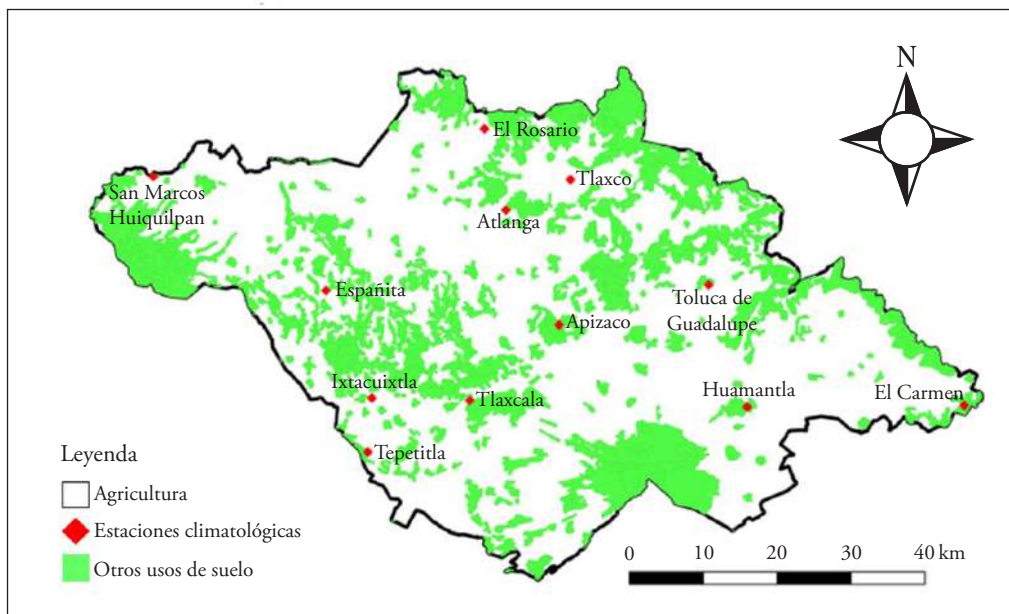
Se aplicó el software RClimDex a la ST para analizar calidad de datos, ello llevó a seleccionar 12 estaciones climatológicas con menos de 12% de datos faltantes y por lo menos 10 años en el periodo base y 15 años en el periodo más reciente. En la Figura 2, se presentan las 12 estaciones climatológicas seleccionadas, el área sombreada con color blanco representa la superficie agrícola, mientras que las de color verde, son otros usos de suelo, como bosques, vegetación secundaria, cuerpos de agua, matorrales, asentamientos humanos y pastizal, entre otros.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 1997), menciona que el periodo de crecimiento (PC) es el número de días, durante un año, en el que las condiciones de humedad y temperatura son favorables para el desarrollo de los cultivos. Para cada estación climatológica seleccionada se calculó, a escala pentadal, la PCP, TMÁX, TMÍN y la Evapotranspiración de referencia (ET_o), las pentadas (cada cinco días) son acumuladas para la PCP y ET_o, mientras que para la TMÁX y TMÍN son valores promedios. La ET_o se calculó con el método de Penman-Monteith, el cual se recomienda como el único método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia.

during a year, when the conditions of moisture and temperature are favorable for the development of the crops. For each climatological station selected, PCP, TMAX and TMIN and reference evapotranspiration (ET_o) were calculated at pentadal scale; the pentadal (every five days) are accumulated for PCP and ET_o, while for TMAX and TMIN are average values. The ET_o was calculated with the Penman-Monteith method, which is recommended as the only standard method for the definition and calculation of reference evapotranspiration.

The beginning of the GP is considered to be when $PCP \geq 0.5 ET_o$, which implies that the amount of water is enough for the germination of cultivation seeds. In the GP there may or may not be a humid period, which is the interval where $PCP > ET_o$. When there is a humid period the demands for evapotranspiration of the crops and the moisture deficit in the soil profile are satisfied. The GP ends when $PCP \leq 0.5 ET_o$, although the ending of the GP generally exceeds a number of days required for evapotranspiration of up to 100 mm (Pájaro and Ortiz, 1992).

For the frost-free period (FFP), the probability of occurrence of the first and last frosts of the year was calculated for the climatological station in



Fuente: elaboración propia con insumos de INEGI y SMN. ♦ Source: prepared by authors with information from INEGI and SMN.

Figura 2. Ubicación de las estaciones climatológicas seleccionadas.
Figure 2. Location of the climatological stations selected.

El inicio del PC se considera cuando la $PCP \geq 0.5 ETo$, esto implica que la cantidad de agua es suficiente para la germinación de las semillas de los cultivos. En el PC puede o no haber un periodo húmedo, el cual es el intervalo donde la $PCP > ETo$. Cuando existe un periodo húmedo se satisfacen las demandas de evapotranspiración de los cultivos y el déficit de humedad en el perfil del suelo. El PC termina cuando la $PCP \leq 0.5 ETo$, aunque la finalización del PC generalmente excede un número de días requeridos para evapotranspirar hasta 100 mm (Pájaro y Ortiz, 1992).

Para el periodo libre de heladas (PLH) se calculó, para cada estación climatológica, la probabilidad de ocurrencia de las primeras y últimas heladas en el año a escala pentadal. Para esto se consideró la metodología que utilizaron Bernal-Morales *et al.* (2016), donde calcularon la probabilidad de ocurrencia de las primeras y últimas heladas a escala diaria, para las estaciones 29002 Apizaco, 29003 Atlanga y 29032 Tlaxco. El método requiere considerar las intercepciones entre las curvas de PCP y la ETo , lo que nos proporciona un rango de confort hídrico para la fenología de ciertos cultivos. Como la variable de PCP tiene alta intermitencia, ya que no llueve continuamente a escala diaria se utilizó un método objetivo y sistemático aplicando la descomposición de una función discreta en sus armónicos, para disminuir la alta variabilidad en los datos se utilizaron siete armónicos para evaluar el posible corrimiento-aumento-disminución en la duración del PC, comparando el periodo base 1961-1990 con el más reciente 1991-2014 (Bernal-Morales *et al.*, 2016).

Finalmente, se traslapan el PC y el PLH para determinar los días disponibles de humedad y libre de helada para cada una de las estaciones evaluadas, es decir, el PC libre de helada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se evaluó el posible impacto de la variabilidad natural/cambio climático en el PC libre de heladas en el estado de Tlaxcala, se consideró a escala pentadal la PCP, $T_{máx}$, $T_{mín}$ y ETo . Para determinar el PC se aplicó la descomposición de una función discreta en sus $n/2$ armónicos, donde n es el número de observaciones. Debido a que la variable precipitación tiene alta variabilidad y fuerte intermitencia, pues no necesariamente llueve a escala diaria en forma continua. En esta escala pentadal ($365/5=73$) tendremos

the year at pentadal scale. For this purpose, the methodology used by Bernal-Morales *et al.* (2016) was considered, where the probability of occurrence of the first and last frosts at daily scale was calculated, for the stations 29002 Apizaco, 29003 Atlanga and 29032 Tlaxco. The method requires taking into consideration the interceptions between the PCP curves and the ETo , which provides a range of hydric comfort for the phenology of certain crops. As the PCP variable has high intermittence, since it does not rain continually at a daily scale, an objective and systematic method was used applying the decomposition of a discrete function in their harmonics; to decrease the high variability in the data, 7 harmonics were used to evaluate the possible sliding-increase-decrease in the duration of the GP, comparing the base period 1961-1990 with the most recent, 1991-2014 (Bernal-Morales *et al.*, 2016).

Finally, GP and FFP are overlapped to determine the days available of humidity and free of frost for each of the stations evaluated, that is, the frost-free GP.

RESULTS AND DISCUSSION

The possible impact of the natural variability/climate change in the frost-free GP in the state of Tlaxcala, the PCP, T_{MAX} , T_{MIN} and ETo were considered at pentadal scale. To determine the GP, the decomposition of a discrete function was applied in its $n/2$ harmonics, where n is the number of observations, because the precipitation variable has high variability and strong intermittence, since it does not necessarily rain continually at a daily scale. In this pentadal scale ($365/5=73$), there is the order of $73/2$ harmonics, that is, 36 harmonics; if we use the 36 harmonics we recover our original variable.

Figure 3 presents the GP for the station 29003 Atlanga, for the period 1961-1990, where the continuous blue line represents the original observed PCP, and if we wanted to identify the beginning and the end of the GP with these data, it would be in a subjective way since the cut in the lines cannot be identified at first sight clearly. From this, the importance of applying the decomposition of a discrete function in its $n/2$ harmonics. When applying the method and selecting 7 harmonics

del orden de $73/2$ armónicos, es decir, 36 armónicos; si utilizamos los 36 armónicos recuperamos nuestra variable original.

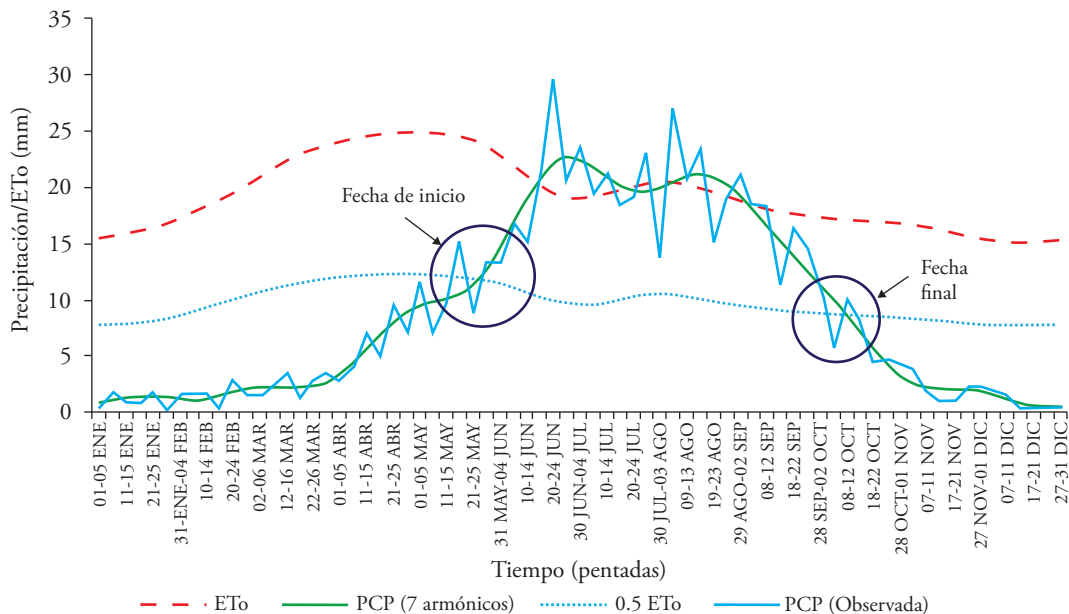
En la Figura 3, presentamos el PC para la estación 29003 Atlanga, para el periodo 1961-1990. Donde la línea continua de color azul representa la PCP observada original, si quisiéramos identificar el inicio y final del PC con estos datos, sería de forma subjetiva ya que no se puede identificar el corte de líneas a primera vista de forma clara. De ahí la importancia de aplicar la descomposición de una función discreta en sus $n/2$ armónicos. Al aplicar el método y seleccionar 7 armónicos (línea continua de color verde) puede observarse como ya se define con mayor claridad la fecha de inicio y final. Con relación a la canícula, en la investigación se clasificó en seca, con agua y húmeda. La canícula seca se presentaría cuando la PCP está por debajo del umbral de $0.5 ETo$, la canícula con agua cuando la PCP está entre el umbral de $0.5 ETo$ y la ETo , mientras que la canícula húmeda se presentaría cuando la PCP está arriba del umbral de la ETo . A continuación se presenta el análisis de tres estaciones climatológicas para ejemplificar las diferentes clasificaciones de la Canícula.

En la Figura 4, se presenta el PC de la estación 29002 Apizaco para el periodo 1991-2014. El inicio

(continuous green line), it can be observed that the date of beginning and ending of the GP is already defined more clearly.

Concerning the midsummer heat, in the study it was classified into dry, with water and humid. The dry midsummer heat would take place when the PCP is under the threshold of $0.5 ETo$, the midsummer heat with water when the PCP is between the threshold of $0.5 ETo$ and the ETo , while the humid midsummer heat would take place when the PCP is above the threshold of the ETo . Next, the analysis of three climatological stations is presented to exemplify the different classifications of the midsummer heat.

Figure 4 presents the GP of station 29002 Apizaco for the period 1991-2014. The beginning of the period is May 21-25 and the ending is October 18-22, with duration of 155 days. Two humid periods stand out, being the first maximum PCP higher compared to the second maximum. The presence of midsummer heat is observed. To be specific, the midsummer heat or relative drought of the middle of the summer is a decrease of precipitation in the midst of summer, generally between July and August. For this climatological station, the midsummer heat that happens is



Fuente: elaboración propia. ♦ Source: prepared by authors.

Figura 3. Periodo de crecimiento, 29003 Atlanga (1961-1990).
Figure 3. Growth period, 29003 Atlanga (1961-1990).

del periodo es del 21 al 25 de mayo y finaliza del 18 al 22 de octubre con una duración de 155 días. Sobresalen dos periodos húmedos, siendo el primer máximo de PCP mayor con respecto al segundo máximo. Se observa la presencia de la canícula. Precisando, la canícula, o sequía relativa de medio verano, es una disminución de la precipitación en pleno verano, generalmente, entre julio y agosto. Para esta estación climatológica la canícula que se presenta es catalogada con agua, porque la PCP está entre el umbral de 0.5 ETo y la ETo.

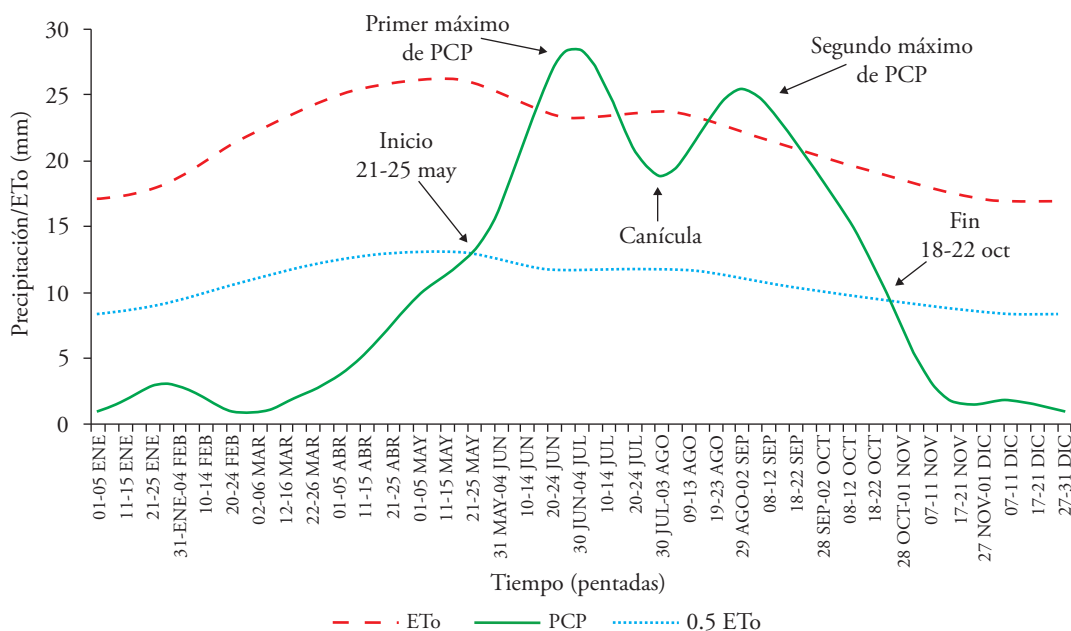
En la Figura 5, se presenta el PC de la estación 29007 El Carmen para el periodo 1991-2014. La fecha de inicio es del 05 al 09 de junio y finaliza del 23 al 27 de septiembre, con una duración de 115 días. Esta estación destaca por no tener periodos húmedos. Sobresalen dos máximos de PCP, siendo el segundo máximo de PCP mayor con respecto al primer máximo, al comparar esto con la estación de Apizaco, se ve cómo se invierte la dinámica. Se visualiza la presencia de la canícula, la cual es clasificada como seca, porque la PCP está por debajo del umbral de 0.5 ETo.

En la Figura 6, se presenta el PC de la estación 29047 Españaíta para el periodo 1991-2014. La duración del PC es de 165 días, la fecha de inicio es del 16 al 20 de mayo y finaliza del 23 al 27 de octubre. Se

cataloged with water, because the PCP is between the threshold of 0.5 ETo and Figure 5 presents the GP of station 29007 El Carmen for the period 1991-2014. The starting date is June 5-7 and the ending, September 23-27, with a duration of 115 days. This station stands out for not having humid periods. Two maximums of PCP stand out, with the second maximum PCP being higher compared to the first maximum, when compared with the Apizaco station, it shows how the dynamics are inverted. The presence of the midsummer heat is made visible, which is classified as dry, because the PCP is under the threshold of 0.5 ETo.

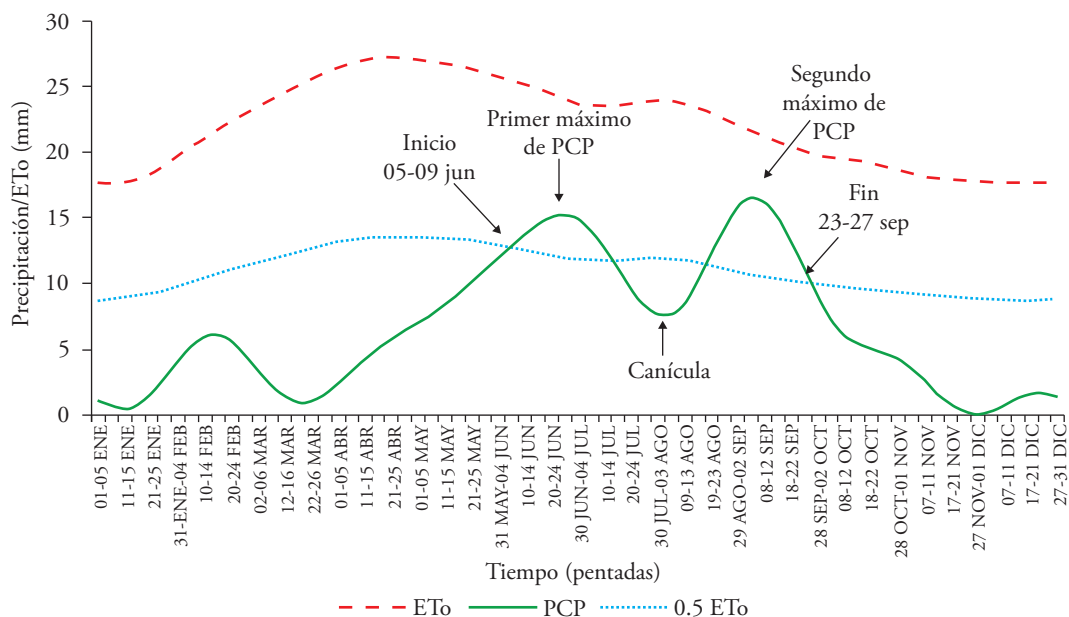
Figure 6 presents the GP of station 29047 Españaíta for the period 1991-2014. The duration of GP is 165 days, the starting date is May 16-20 and the ending, October 23-27. There are two humid periods, relatively equal. The midsummer heat can be seen, but it is cataloged with water, because the PCP is above the threshold of the ETo.

The GP identified in the 12 climatological stations will be reduced when considering the probability of occurrence of the first and last frosts. In the state of Tlaxcala the last frosts are expected, generally, at the end of September, which is why it is imperative to consider these dates to identify



Fuente: elaboración propia. ♦ Source: prepared by authors.

Figura 4. Periodo de crecimiento, 29002 Apizaco (1991-2014).
Figure 4. Growth period, 29002 Apizaco (1991-2014).



Fuente: elaboración propia. ♦ Source: prepared by authors.

Figura 5. Periodo de crecimiento, 29007 El Carmen (1991-2014).
Figure 5. Growth period, 29007 El Carmen (1991-2014).

presentan dos periodos húmedos, relativamente iguales. Se visualiza la canícula, pero esta es catalogada con agua, porque la PCP está arriba del umbral de la ETo.

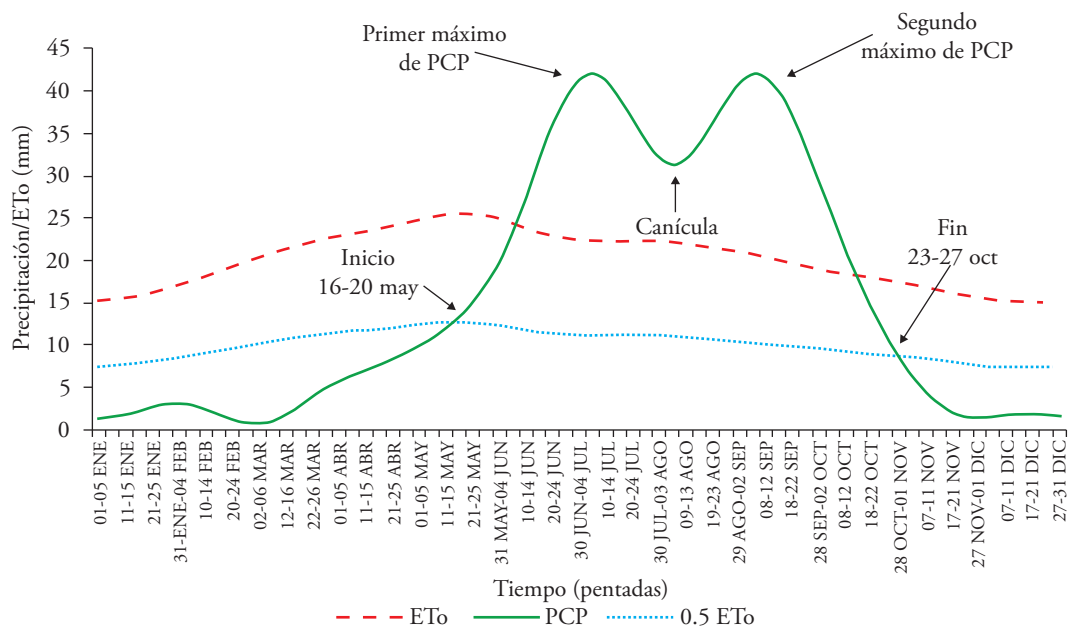
El PC identificado en las 12 estaciones climatológicas, se reducirá al considerar la probabilidad de ocurrencia de las primeras y últimas heladas. En el estado de Tlaxcala las últimas heladas se esperan, generalmente, a finales de septiembre, por lo que es imperativo considerar estas fechas para identificar un PC libre de heladas. Es importante mencionar que hay años en donde se presentan heladas atípicas que afectan los cultivos, por ejemplo, en 2010 hubo un adelanto en días, mientras que en 2011 las heladas del 6-9 de septiembre (con un adelanto de semanas), afectó la región del Altiplano Mexicano.

Con relación a las heladas, para la estación 29003 Atlanga, los datos indican que hay una tendencia a incrementarse las heladas en un promedio que va de 43 en el periodo base (1961-1990) a 61 en el periodo más reciente (1991-2014), lo que aumenta la probabilidad de que se presenten heladas en el periodo más reciente. Se observa un impacto diferenciado, ya que en la estación 29 002 Apizaco hay una tendencia a disminuir las heladas en un promedio que va de 42 en el periodo base a 32 en el periodo más reciente, lo

a frost-free GP. It is important to mention that there are years when atypical frosts take place which affect the crops, for example, in 2010 there was an advance in days, while in 2011 the frosts from September 6-9 (with an advance of weeks) affected the region of the Mexican High Plateau.

Regarding frosts, for station 29003 Atlanga the data indicate that there is a trend for frosts to increase in an average that ranges from 43 in the base period (1961-1990) to 61 in the most recent period (1991-2014), which increases the probability that there are frosts in the most recent period. A differentiated impact is observed, since in station 29002 Apizaco there is a trend to decrease the frosts in an average that ranges from 42 in the base period to 32 in the most recent period, which decreases the probability that frosts will take place in the most recent period (Bernal-Morales *et al.*, 2017).

To calculate the FFP, a probability of occurrence of frosts under or equal to 0.01 was considered, and this is a very demanding threshold. This 0.01 means that a frost has occurred in the respective 5-day period. Figure 7 presents the frost-free period (FFP) for station 29040 Ixtacuixtla (1961-1990). The starting date is April 21-25 and the ending, September 23-27, with a duration of 160 days.



Fuente: elaboración propia. ♦ Source: prepared by authors.

Figura 6. Periodo de crecimiento, 29047 España (1991-2014).
Figure 6. Growth period, 29047 España (1991-2014).

que disminuye la probabilidad de que se presenten heladas en el periodo más reciente (Bernal-Morales *et al.*, 2017).

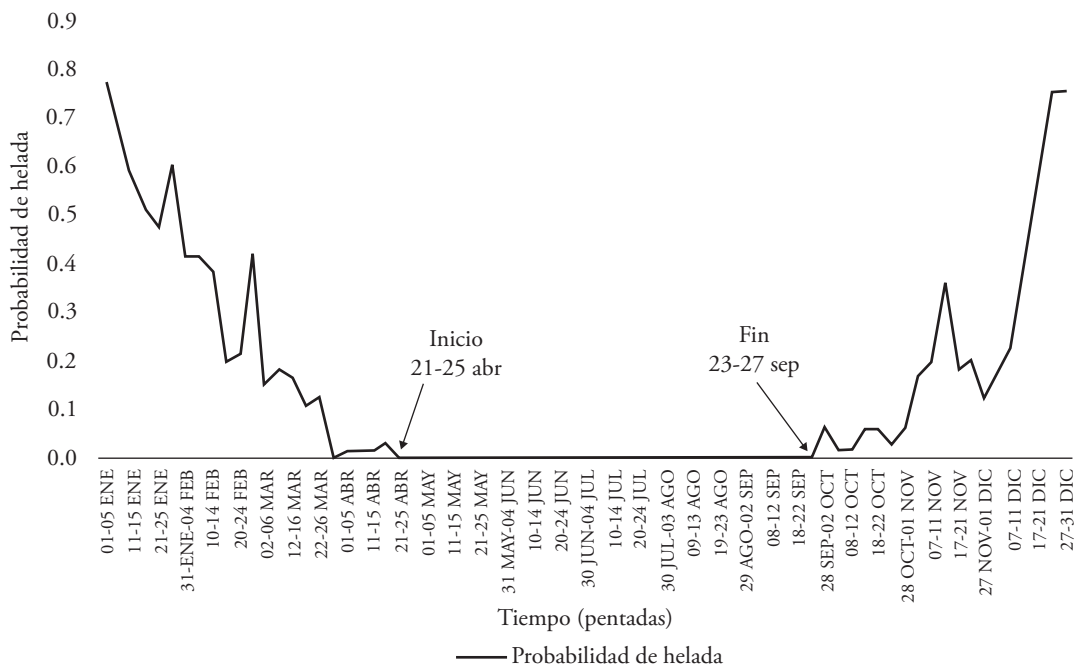
Para calcular el PLH se consideró una probabilidad de ocurrencia de heladas menor o igual a 0.01, esto es un umbral muy exigente. Este 0.01 quiere decir que se ha presentado una helada en la pentada (5 días) respectiva. En la Figura 7, se presenta el periodo libre de heladas (PLH), para la estación 29040 Ixtacuixtla (1961-1990). La fecha de inicio es del 21 al 25 de abril y finaliza del 23 al 27 de septiembre, con una duración de 160 días. Para todas las estaciones climatológicas consideradas se realizó este procedimiento, tanto, para el periodo base, como el más reciente.

Una vez que se calculó el PC y el PLH, se determinó el PC libre de helada para cada una de las estaciones. En la Figura 8, se presenta el PC, el periodo libre de heladas (PLH) y se identifica el PC libre de helada, para la estación 29040 Ixtacuixtla (1961-1990). Al comparar el PC y el PLH se observa que hay un desfase tanto al inicio del periodo, como al final del mismo. Lo cual es determinante para identificar el PC libre de heladas. La duración del PC es de 140 días, mientras que para el PLH es de 160 días, debido al desfase comentado el PC libre de helada identificado es de 134 días.

For all the climatological stations considered, this procedure was carried out, both for the base period and for the most recent.

Once the GP and the FFP is calculated, the frost-free GP was determined for each of the stations. Figure 8 presents the GP, the frost-free period (FFP) and the frost-free GP is identified for station 29040 Ixtacuixtla (1961-1990). When comparing the GP and the FFP it can be seen that there is a gap both at the beginning of the period and at the end of it. This is defining to identify the frost-free GP. The duration of the GP is 140 days, while for the FFP it is 160 days, and due to the gap mentioned the frost-free GP identified is 134 days.

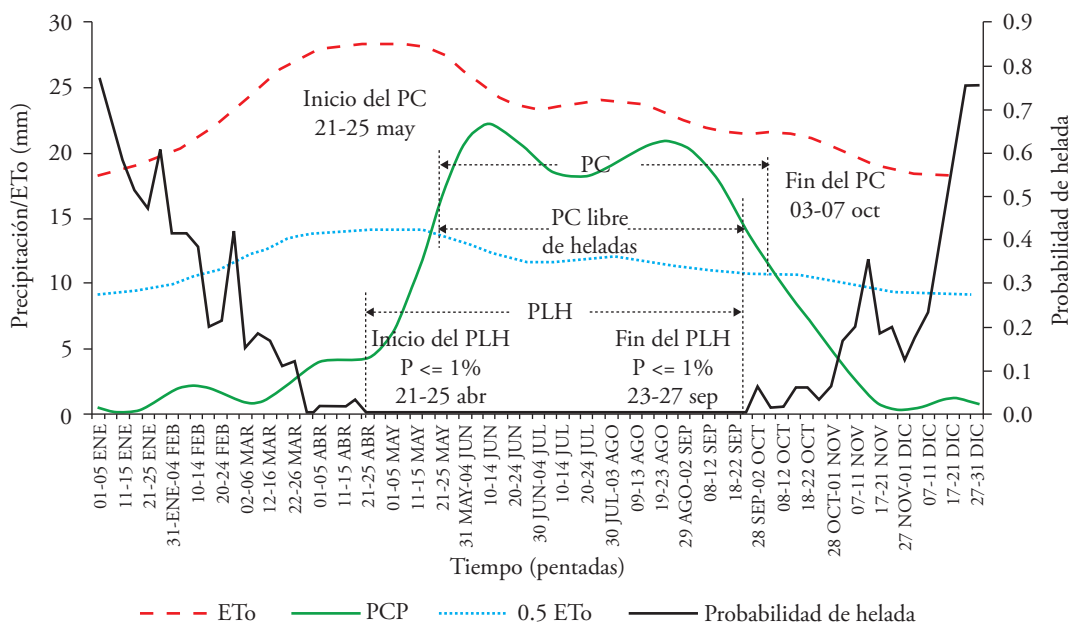
Table 1 presents the comparative of frost-free GP for the base period and the most recent period, from the 12 meteorological stations evaluated. An increase in the duration of the frost-free GP in five stations stands out, while in five stations there is a decrease and in two stations the same duration remains, although not the beginning and ending date. This differentiated impact agrees with the results by Ruiz Corral *et al.* (2000), where 9 stations presented an increase in the duration of the growth season, while 32 a decrease and only one station had the same duration. This reduction of the GP



Fuente: elaboración propia. ♦ Source: prepared by authors.

Figura 7. PLH, 29040 Ixtacuixtla (1961-1990).

Figure 7. PLH, 29040 Ixtacuixtla (1961-1990).



Fuente: elaboración propia. ♦ Source: prepared by authors.

Figura 8. PC, PLH y PC libre de helada, 29040 Ixtacuixtla (1961-1990).

Figure 8. GP, FFP and frost-free GP, 29040 Ixtacuixtla (1961-1990).

En el Cuadro 1, se presenta el comparativo del PC libre de heladas para el periodo base y el más reciente, de las 12 estaciones meteorológicas evaluadas. Destaca un incremento en la duración del PC libre de heladas en cinco estaciones, mientras que en cinco estaciones hay una disminución y en dos estaciones se mantiene la misma duración, más no así la fecha de inicio y final. Este impacto diferenciado coincide con los resultados de Ruiz Corral *et al.* (2000), donde 9 estaciones presentaron un incremento en la duración de la estación de crecimiento, mientras que 32 una disminución y sólo una estación tuvo la misma duración. Esta reducción del PC, coincide con lo encontrado por Gay y Rueda (2016) y con los resultados que presentaron Conde *et al.* (2000) en Atlacomulco (México), Izúcar (Puebla), Ixcamilpa (Puebla), Coatepec (Veracruz), Tuxpan (Veracruz), La Huerta (Jalisco) y Magdalena (Jalisco), donde investigaron la vulnerabilidad de la agricultura de maíz de temporal mediante el modelo CERES-MAIZE y en Atlacomulco se presentó la mayor disminución del PC con 28 días.

Por su parte, Zarazúa *et al.* (2011) para la Ciénega de Chapala encontraron que la estación de crecimiento tendrá un acortamiento y las unidades calor efectivas del maíz serán cubiertas más rápidamente, provocando la reducción de las etapas fenológicas del cultivo.

En Cuba se evaluaron dos regiones, Pinar del Río y Santiago de Cuba, para ambas estaciones se espera una reducción del periodo de crecimiento con respecto a la línea base, de 90 y 56 días, respectivamente, por lo que el cultivo de maíz podría tener afectaciones negativas en el rendimiento (Pérez *et al.*, 2016).

agrees with what was found by Gay and Rueda (2016) and with the results that Conde *et al.* (2000) presented from Atlacomulco (Estado de México), Izúcar (Puebla), Ixcamilpa (Puebla), Coatepec (Veracruz), Tuxpan (Veracruz), La Huerta (Jalisco) and Magdalena (Jalisco), where they researched the vulnerability of rainfed maize agriculture through the CERES-MAIZE model and in Atlacomulco the greatest decrease of GP was found, of 28 days.

For their part, Zarazúa *et al.* (2011) found for the Chapala Swamp that the growth season will be shortened and the effective heat units of the maize will be covered more rapidly, causing the reduction of the phenological stages of the crop.

Two regions were evaluated in Cuba, Pinar del Río and Santiago de Cuba, and for both stations a reduction in the growth period is expected with regard to the base line, of 90 and 56 days, respectively, which is why maize growth could have negative affectations in the yield (Pérez *et al.*, 2016).

In Costa Rica the province of Guanacaste was evaluated, where the maize crop would not present problems despite there being a decrease in the growth period, because currently the growth period is 217 days (Alvarado and Paredes, 2016).

In El Salvador, the analysis was carried out for the department of Usulután, where maize is produced and where the growth period calculated with climatic scenarios decreases regarding the base period (Munguia and Aguilar, 2016). Another study performed in Honduras for the El Paraíso department showed that the maize crop would

Cuadro 1. Periodo de crecimiento libre de heladas de las 12 estaciones meteorológicas evaluadas (1961-2014).

Table 1. Frost-free Growth period, from the 12 meteorological stations evaluated (1961-2014).

Estación (Altitud)	1961-1990	1991-2014	Diferencia (+/-)
Apizaco (2423 m)	119	134	15
Atlanga (2489 m)	109	99	-10
El Carmen (2350 m)	139	64	-75
El Rosario (2678 m)	44	104	60
Españita (2624 m)	164	164	0
Huamantla (2475 m)	64	134	70
Ixtacuixtla (2230 m)	134	129	-5
San Marcos Huaquilpan (2601 m)	114	84	-30
Tepetitla (2227 m)	120	109	-11
Tlaxcala (2230 m)	154	154	0
Toluca de Guadalupe (2640 m)	144	149	5
Tlaxco (2530 m)	100	104	4

Fuente: elaboración propia. ♦ Source: prepared by authors.

En Costa Rica se evaluó la provincia de Guanacaste, en donde el cultivo de maíz no presentaría problemas a pesar de haber una disminución del periodo de crecimiento, debido a que actualmente el periodo de crecimiento es de 217 días (Alvarado y Paredes, 2016).

En El Salvador el análisis se realizó para el departamento de Usulután, donde se produce el maíz, y donde el periodo de crecimiento calculado con escenarios climáticos disminuye con respecto al periodo base (Munguía y Aguilar, 2016). Otro estudio realizado en Honduras para el departamento El Paraíso, el cultivo de maíz sufriría afectaciones atribuibles a la disminución de la precipitación, debido a que la mayor disminución del periodo de crecimiento se presentaría con el escenario pesimista, el cual podría disminuir en 54 días (Castro y Peña, 2016).

En Guatemala se analizaron dos regiones, el departamento de Escuintla y el departamento de Chimaltenango, en el primero se siembra el maíz, aunque cabe destacar que el cultivo más importante es la caña de azúcar. El periodo de crecimiento tendrá una reducción de 111 días y 126 días, para el escenario optimista y pesimista, respectivamente, se menciona que a pesar de esta disminución la región seguirá siendo apta para la siembra del maíz, no así para el cultivo de la caña de azúcar, la cual tiene un periodo vegetativo de 300 a 360 días. Mientras que para la segunda región la disminución del periodo de crecimiento es de 12 y 11 días para los escenarios optimista y pesimista, respectivamente (Conde *et al.*, 2016). Al bajar de escala encontraremos con mayor detalle los impactos de la variabilidad natural o cambio climático, algo similar a lo que ocurre con el calentamiento global, de que hay zonas que se están enfriando y calentando, pero al calcular el promedio da como resultado un calentamiento, debido a que hay más zonas que se están calentando de las que se están enfriando; esto coincidiendo con lo encontrado recientemente por Somboonsuke *et al.* (2018), quienes resaltan que los impactos negativos serán más serios durante las siguientes décadas.

En la Figura 9, se presenta el PC libre de heladas para el estado de Tlaxcala, donde se visualizan las zonas con mayor número de días disponibles de humedad y libre de helada. El área sombreada con color negro representa otros usos de suelo, por ejemplo, bosques, vegetación secundaria, cuerpos de agua, matorrales, asentamientos humanos, pastizal, entre otros.

suffer affectations attributable to the decrease in precipitation, because the greater decrease of the growth period would take place with the pessimist scenario, which could decrease by 54 days (Castro and Peña, 2016).

Two regions were analyzed in Guatemala, the department of Escuintla and the department of Chimaltenango; maize is sown in the first, although it should be highlighted that the most important crop is sugarcane. The growth period will have a reduction of 111 days and 126 days, for the optimist and pessimist scenario, respectively; it is mentioned that despite this decrease the region will continue to be apt for maize sowing, not so for sugarcane cultivation, which has a vegetative period of 300 to 360 days. Meanwhile, for the second region the decrease in the growth period is 12 and 11 days for the optimist and pessimist scenarios, respectively (Conde *et al.*, 2016).

When lowering the scale, we will find with greater detail the impacts of natural variability and/or climate change, something similar to what occurs with global warming, where there are zones that are becoming cooler and warmer, but when calculating the average it results in warming, because there are more zones that are becoming warmer than those that are becoming cooler. This agrees with what was found recently by Somboonsuke *et al.* (2018), who highlight that the negative impacts will be more serious during the next decades.

Figure 9 presents the frost-free GP for the state of Tlaxcala, where the zones with highest number of days available of humidity and free of frost are visualized. The area shaded with black represents other land uses, for example forests, secondary vegetation, bodies of water, shrubs, human settlements, grasslands, among others.

Results for the state of Tlaxcala indicate that the evidences of the impact of natural variability and/or climate change are differentiated, since there is equal number of stations impacted, 5, with 154 days of increase while 131 days of decrease, with a difference of 23 days of increase and two stations without change.

The differentiated impact, because the relatively small surface is very uneven, and derived from the databases with meteorological time series, particularly with precipitation and maximum and minimum temperatures, indicate a number

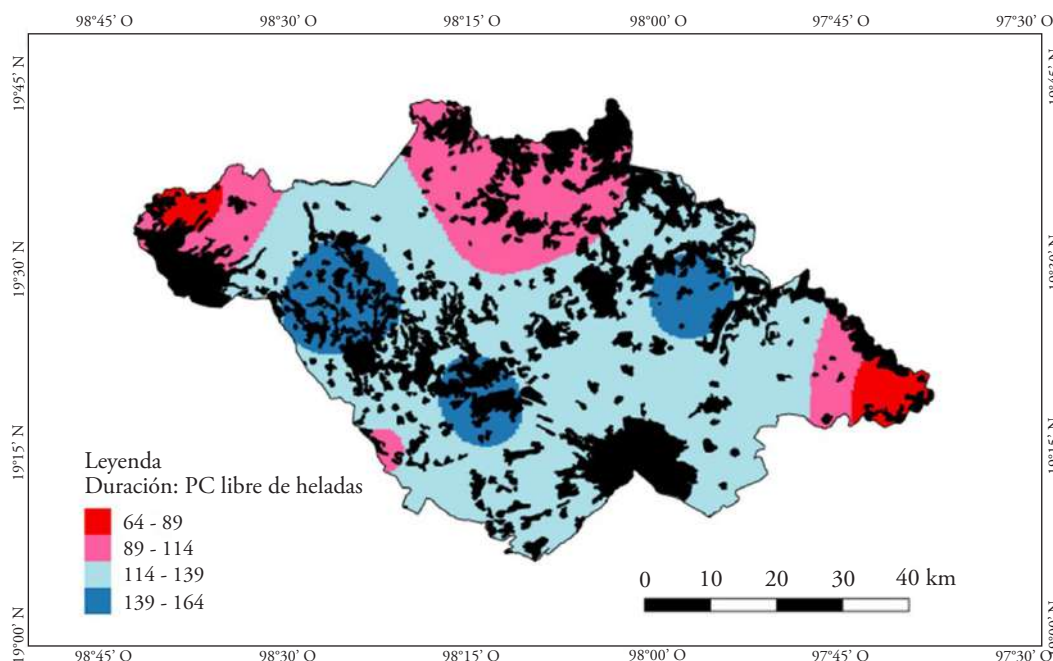
Los resultados para el estado de Tlaxcala, indican que las evidencias del impacto de la variabilidad natural o cambio climático son diferenciadas, ya que hay igual número de estaciones impactadas, 5, con 154 días de incremento, mientras que 131 días de disminución, con una diferencia de 23 días de incremento y dos estaciones sin cambio.

El impacto diferenciado, debido a que la superficie, relativamente pequeña, está muy accidentada, derivado de bases de datos con series de tiempo meteorológicas, en particular con precipitación y temperaturas máximas y mínimas, nos indican un número de forzantes distintos, por ejemplo, la estación de Tlaxcala Capital está registrando en una minicuenca, no está expuesta a forzantes que si están actuando sobre una estación como Apizaco, automáticamente quedan evaluadas como lo indican Ayanladea *et al.* (2017).

Por su parte, Kang *et al.* (2009) mencionan que los rendimientos de los cultivos afectados por el cambio climático serán diferentes en varias áreas, en algunas áreas los rendimientos de los cultivos aumentarán, y en otras áreas disminuirá dependiendo de la latitud del área y la aplicación de riego. Los resultados de modelos existentes muestran que un aumento en la precipitación aumentará el rendimiento del cultivo

of different enforcers; for example, the station of Tlaxcala Capital is found on a mini-basin, it is not exposed to enforcers that are acting on a station such as Apizaco, and they are automatically evaluated as indicated by Ayanladea *et al.* (2017).

For their part, Kang *et al.* (2009) mention that the yields of crops affected by climate change will be different in several areas, in some areas the yields of crops will increase, and in other areas they will decrease depending on the latitude of the area and the application of irrigation. The results from existing models show that an increase in precipitation will increase the yields of crops and, furthermore, the yield of a crop is more sensitive to the precipitation than to the temperature. If the availability of water is reduced in the future, the soils with high capacity for water retention will be better to reduce the impact of the drought while the yields of crops are maintained. With the increase of temperature and the fluctuations of precipitation, it is possible that water availability and production of crops will decrease in the future. If the irrigated areas are expanded, the total production of crops will increase; however, the quality of foods and the environment can be degraded.



Fuente: elaboración propia. ♦ Source: prepared by authors.

Figura 9. PC libre de helada, estado de Tlaxcala (1991-2014).
Figure 9. Frost-free GP, state of Tlaxcala (1991-2014).

y, lo que es más, el rendimiento del cultivo es más sensible a la precipitación que a la temperatura. Si la disponibilidad de agua se reduce en el futuro, los suelos de alta capacidad de retención de agua serán mejores para reducir el impacto de la sequía mientras se mantiene el rendimiento de los cultivos. Con el aumento de la temperatura y las fluctuaciones de precipitación, es probable que la disponibilidad de agua y la producción de cultivos disminuyan en el futuro. Si se expanden las áreas irrigadas, la producción total de cultivos aumentará; sin embargo, la calidad de los alimentos y el medio ambiente puede degradarse.

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) menciona que si ya sabemos cómo va a impactar el cambio climático, se debe informar a los diferentes sectores de la sociedad, con la finalidad de contribuir a la planificación de las actividades, que permitan formular estrategias locales y se elijan las mejores alternativas de desarrollo (CEPAL, 2013), sino ahora estaríamos peor al conocer el impacto y no difundirlo con los sectores pertinentes.

CONCLUSIONES

Para hablar de variabilidad natural o cambio climático se requiere que cada una de las series de tiempo de las estaciones climatológicas evaluadas, contemple el periodo base recomendado por la Organización Meteorológica Mundial, es decir, 1961-1990, mientras que, en el periodo más reciente de 1991 a la fecha, se buscan señales de variabilidad natural o cambio climático.

Se observa un impacto diferenciado en las estaciones evaluadas, lo que permitirá formular estrategias locales ante el riesgo identificado inducido por cambio climático, con la finalidad de contribuir a la planificación de las actividades agrícolas. Este impacto diferenciado se presenta en la duración del PC libre de helada, debido a que hay cinco estaciones climatológicas que tienen un incremento, mientras que en 5 de ellas hay una disminución y en las dos restantes se mantiene el mismo número de días.

El aumento en la duración del PC libre de helada favorecerá a los cultivos al haber mayor cantidad de días con humedad disponible y libre de heladas para su desarrollo, lo que permitirá sembrar variedades de maíz que tienen un ciclo más largo.

Por otra parte, la disminución en la duración del PC libre de helada implicará elegir cultivos alternativos, como el amaranto el cual es de un ciclo más corto, lo

The Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC) mentions that if we already know how climate change will impact, the different sectors of society ought to be informed, with the aim of contributing to planning activities that will allow formulating local strategies and choosing the best alternatives for development (CEPAL, 2013); otherwise, we would be worse now by understanding the impact and not divulging it with the pertinent sectors.

CONCLUSIONS

To speak of natural variability or climate change, it is required that each of the time series from the climatological stations evaluated contemplates the base period recommended by the World Meteorological Organization, that is, 1961-1990, while in the most recent period from 1991 to date, signals are sought of natural variability or climate change.

A differentiated impact is observed in the stations evaluated, which would allow formulating local strategies in face of the risk identified induced by climate change, with the aim of contributing to planning of agricultural activities. This differentiated impact is seen in the duration of the frost-free GP, because there are five climatological stations that have an increase, while in five of them there is a decrease and in the remaining two the same number of days is maintained.

The increase in duration of the frost-free GP will favor the crops by having a larger amount of humidity available and free of frosts for their development, which will allow sowing maize varieties that have a longer cycle.


On the other hand, the decrease in the duration of the frost-free GP would imply choosing alternative crops, such as amaranth of shorter cycle, which has already been done in the southeastern part of the state, primarily in Cuapiaxtla, and now it would be advisable to think about how to take advantage of these modified resources.

The importance of considering in the GP the dates from the first to the last frosts should be noted, which allowed identifying with greater certainty the days of humidity and temperature available for the different crops. What is next is to work with a multidisciplinary team to analyze the phenology of the different crops and to identify the most ideal

cual ya se ha estado llevando a cabo en la zona sureste del Estado, principalmente, en Cuapiaxtla, ahora nos toca pensar en cómo aprovechar estos recursos modificados.

Cabe destacar la importancia de considerar en el PC las fechas de las primeras y últimas heladas, lo que permitió identificar con mayor certeza los días disponibles de humedad y temperatura para los diferentes cultivos. Lo que sigue es trabajar con un equipo multidisciplinario para analizar la fenología de los diferentes cultivos e identificar los cultivos más idóneos y potencializarlos de acuerdo a los “recursos” naturales disponibles de acuerdo a este estudio.

LITERATURA CITADA

- Alayon-Gamboa, J. A., Jiménez-Ferrer G., Nahed-Toral J., y Villanueva-López G. 2016. Estrategias silvopastoriles para mitigar efectos del cambio climático en sistemas ganaderos del sur de México. *Agroproductividad*, 9(9).
- Altieri, M. A., y Nicholls C. I. 2009. Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas. *LEISA revista de agroecología*. 5-8.
- Alvarado, M. A., Foroughbakhch, R., Jurado, E., y Rocha, A. 2002. El cambio climático y la fenología de las plantas. *CIENCIA UANL*. 5(4): 493-500.
- Alvarado, L., y Paredes F. 2016. Escenarios de cambio climático 2075-2009: caso de estudio de impacto en la agricultura de Guanacaste, Costa Rica. *In: Conde, C. y López B. (coords). Variabilidad y Cambio Climático. Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en América Latina y el Caribe. Propuestas para Métodos de Evaluación*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. pp: 103-112.
- Abadi, Berhane. 2018. Climate Change and Variability Impacts on Agricultural Productivity and Food Security. *Climatol Weather Forecasting* 6: 240. doi:10.4172/2332-2594.1000240
- Ayanladea, A., Radeny M., and Morton J. F. 2017. Comparing smallholder farmers' perception of climate change with meteorological data: A case study from southwestern Nigeria. *Weather and Climate Extremes* 15 (2017) 24–33.
- Bernal-Morales, R., Morales-Acoltzi T., Hernández-Vázquez M., Jiménez-López J., y Orozco-Flores S. 2016. Comportamiento de la distribución de heladas en Atlanga, Apizaco y Tlaxco, Tlaxcala, México: 1961-1990 vs 1991-2014. 6to. Congreso Nacional de Investigación en Cambio climático, del 17 al 21 de octubre del 2016.
- Castro, M., y Peña T. 2016. Índice de vulnerabilidad al cambio climático en el sector hídrico a nivel comunitario en Honduras. *In: Conde C., y López B. (coords). Variabilidad y Cambio Climático. Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en América Latina y el Caribe. Propuestas para Métodos de Evaluación*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. pp: 113-132.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2013. Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina. (LC/W/563). Santiago de Chile. 157p.
- crops and potentiate them according to the natural “resources” available based on this study.
- End of the English version—
- 
- Conde, C., Ferrer R. Ma., y Liverman D. 2000. Estudio de la vulnerabilidad de la agricultura de maíz de temporal mediante el modelo CERES-MAIZE. En Gay, C. (ed). México: Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. pp. 89-102. México: Instituto Nacional de Ecología y Universidad Nacional Autónoma de México.
- Conde, C., Hernández G., Esquivel N., López J., López F., Montes R., Nava Y., y Ruiz K. 2016. Variabilidad climática y escenarios de cambio climático. Herramientas para los estudios de impactos potenciales y vulnerabilidad actual y futura. Ejemplos para México, Centroamérica y El Caribe. *In: Conde C. y López B. (coords). Variabilidad y Cambio Climático. Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en América Latina y el Caribe. Propuestas para Métodos de Evaluación*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. pp: 25-72.
- Christiansen, D. E., Markstrom S. L., and Hay L. E. 2011. Impacts of climate change on the growing season in the United States. *Earth Interactions*. 15(33):1-17.
- EEA. 2015. Agriculture and Climate Change. Report by European Environment Agency. Recuperado el 09 de febrero del 2018 de: <https://www.eea.europa.eu/downloads/a898650f58a641589eb0ad2cd92b55be/1481900146/agriculture-and-climate-change.pdf>
- FAO. 1997. Zonificación agro-ecológica: guía general. Boletín de suelos No. 73. FAO. Roma, Italia.
- Galindo, L. M., Samaniego J., Alatorre J. E., Ferrer-Carbonell J., Reyes O., y Sánchez L. 2015. Ocho tesis sobre el cambio climático y el desarrollo sostenible en América Latina. 40 p.
- Gay, C. y Rueda A. J. C. 2016. Resumen Reporte Mexicano de Cambio Climático: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación. Grupo II. Libros: 1.2.3. Capítulo 5. Sistemas de Producción de Alimentos y Seguridad Alimentaria.
- Goyal, R. K. 2004. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case of study of arid zone of Rajasthan (India). *Agric. Water Manage.* 69: 1-11.
- INEGI. 2017. Anuario estadístico y geográfico de Tlaxcala 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México: INEGI, c2017. 557 p.
- IPCC. 2012. Resumen para responsables de políticas en el Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático [edición a cargo de C. B. Field, C. B., V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G. -K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor, y P. M. Midgley]. Informe especial de los Grupos de trabajo I y II del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Nueva York, Estados Unidos de América, pp: 1-19.

- IPCC. 2014. Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 págs. (en árabe, chino, español, francés, inglés y ruso).
- Jarvis A., Ramírez J., Bonilla-Findji O., y Zapata E. 2011. Impacts of Climate Change in Crop Production in Latin America, in *Crop Adaptation to Climate Change* (eds) S. S. Yadav, R. J. Redden, J. L. Hatfield, H. Lotze Campen y A. E. Hall), Wiley-Blackwell, Oxford, UK. DOI: 10.1002/9780470960929.ch4
- Jones, P. G., y Thornton P. K. 2003. The potential impact of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. *Global Environmental Change*. 13: 51–59.
- Y. Kang, S. Kang, and X. Ma. 2009. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security - A review. *Progress in Natural Science* 19:1665-1674.
- Martínez, G., Llovizna S., Silva García J. T., Ávila Meléndez L. A., Moncayo-Estrada R., Cruz Cárdenas G., y Ceja Torres L. F. 2017. El fenómeno de cambio climático en la percepción de la comunidad indígena purépecha del municipio de Chilchota, Michoacán, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 33(4), 641-653.
- Melillo, Jerry M., Terese T.C., Richmond, and Gary W. Yohe (eds). 2014. *Highlights of Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment*. U.S. Global Change Research Program, 148 pp.
- Meza, F. 2017. Estimación de costos asociados a la seguridad hídrica en la agricultura como medida de adaptación al cambio climático en Chile: un estudio en el contexto del Plan de Adaptación al Cambio Climático del Sector Silvoagropecuario. Naciones Unidas Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Monterroso, R. A., Gómez J., Lluch-Cota S., Sáenz R. C., Pérez E. R., Salvadero C., Lluch-Cota D, B, Saldívar-Lucio R., Ponce-Díaz G., Martínez C. C., Ramírez-García G., y Bacadel Moral J. 2015. Sistemas de Producción de Alimentos y Seguridad Alimentaria. *In*: Gay C., Cos A. y Peña T. (eds), Reporte Mexicano de Cambio Climático Grupo II Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Munguía, Y., y Aguilar M. 2016. Efectos e impactos del cambio climático en el maíz blanco en El Salvador. *In*: Conde C. y López B. (coords). *Variabilidad y Cambio Climático. Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en América Latina y el Caribe. Propuestas para Métodos de Evaluación*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. pp: 73-88.
- Nicholls, C. I., Henaio A., y Altieri M. A. 2017. Agroecología y el diseño de sistemas agrícolas resilientes al cambio climático. *Agroecología*. 10(1): 7-31.
- OECD. 2012. *OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction*, OECD Publishing, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264122246-en>
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra E., Íñiguez-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.
- OMM. 2011. Guía de prácticas climatológicas. OMM–Nº 100. Ginebra, Suiza. An-4.
- Ortiz, R. 2012. El cambio climático y la producción agrícola. Banco Interamericano de desarrollo. 13-17.
- Ortiz, R., K. D. Sayre K. D., Govaerts B., Gupta R., Subbarao G. V., Ban T. y Hodson D. 2008. Climate change: Can wheat beat the heat? *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 126: 45–58.
- Orosio-García, N., López-Sánchez H., Gil-Muñoz A., Ramírez-Valverde B., Gutiérrez-Rangel N., Crespo-Pichardo G., y Montero-Pineda A. 2012. Utilización, oferta y demanda de tecnología para producción de Maíz en el valle de Puebla, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*. 9(1): 55-69.
- Pájaro, H. D., y Ortiz S. C. A. 1992. Estimación del periodo de crecimiento por disponibilidad de agua y libre de heladas para la República Mexicana. México. *Revista de Geografía Agrícola*. (17):119-125.
- Peng, S., Huang, J., Sheehy J. E., Laza R. C., Vispas R. M., Zhong X., Centeno G. S., Khush G. S. y Cassman K. G. 2004. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 101(27): 9971–9975.
- Pérez, O., Álvarez A. y Gómez Y. 2016. Cambio climático y vulnerabilidades en Cuba. *In*: Conde C. y López B. (coords). *Variabilidad y Cambio Climático. Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en América Latina y el Caribe. Propuestas para Métodos de Evaluación*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. pp: 113-132.
- Piñeiro, M. 2012. Las relaciones entre Seguridad Alimentaria, Cambio Climático y Comercio Internacional. Serie Seguridad Alimentaria Working Paper Nº 146 | Marzo 2012.
- Reddy, K. R., y Hodges H. F. 2000. *Climate change and global crop productivity*. CABI Publishing, Wallingford.
- Rodríguez De Luque, J. J., González-Rodríguez C. E., Gourdji S., Mason-D’Croz D., Obando-Bonilla D., Mesa-Díez J., y Prager S. D. 2016. Impactos socioeconómicos del cambio climático de América Latina y el Caribe: 2020-2045. *Cuadernos de Desarrollo Rural*. 13(78): 11-34.
- Ruiz-Corral, J. A., Medina-García G., Flores-López H. E., Ramírez-Díaz J. L., De la Cruz-Larios L., Villalpando-Ibarra J. F., De La Mora-Orozco C., Durán-Puga N., García-Romero G. E., y Ruiz-Álvarez O. 2016. Impacto del cambio climático sobre la estación de crecimiento en el estado de Jalisco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Pub. Esp. Núm. 13, 01 de enero - 14 de febrero*. p: 2627-2638.
- Ruiz Corral, José Ariel., Ramírez Díaz José Luis., Flores Mendoza Francisco Javier, y Sánchez González José de Jesús. 2000. Cambio climático y su impacto sobre la estación de crecimiento de maíz en Jalisco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana [en línea]*. 23(2), 169-181[fecha de Consulta 18 de Septiembre de 2019]. ISSN: 0187-7380. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61023201>.
- SAGARPA, 2018. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Recuperado el 9 de febrero del 2018, de: http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/.

- Somboonsuke, B., Phitthayaphinant P., Sdoodee S., and Kongmanee C. 2018. Farmers' perceptions of impacts of climate variability on agriculture and adaptation strategies in Songkhla Lake basin. *Kasetsart. Journal of Social Sciences* 39, 277-283.
- SMN. 2018. Servicio Meteorológico Nacional. Recuperado el 2 de enero del 2018, de: <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=tlax>.
- Zarazúa-Villaseñor, P., Ruiz-Corral J., González-Eguiarte D., Flores-López H., y Ron-Parra J. 2011. Impactos del cambio climático sobre la agroclimatología del maíz en Ciénega de Chapala, Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 2:351-363.