

DOI: 10.24850/j-tyca-14-01-03

Artículos

Efecto del cambio climático en el periodo de crecimiento en Guanajuato

Effect of climate change on growth period in Guanajuato

Antonio Vásquez-Ortega¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0313-7507>

Juan Ángel Quijano-Carranza², ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3231-1818>

Enrique Andrio-Enriquez³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8260-4689>

Francisco Cervantes-Ortiz⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2419-5896>

Carlos Cuellar-Zambrano⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6867-1300>

José Honorato Arreguín-Centeno⁶, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7219-5132>

Ricardo Yáñez-López⁷, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8893-2109>



¹Tecnológico Nacional de México-Roque, Celaya, Guanajuato, México, antoniovasort@hotmail.com

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Celaya, Guanajuato, México, jangelquijanoc@gmail.com

³Tecnológico Nacional de México-Roque, Celaya, Guanajuato, México, andrio@itroque.edu.mx

⁴Tecnológico Nacional de México-Roque, Celaya, Guanajuato, México, frcervantes@itroque.edu.mx

⁵Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Celaya, Guanajuato, México, carlos-cz@hotmail.com

⁶Tecnológico Nacional de México-Roque, Celaya, Guanajuato, México, honorato.arreguin@gmail.com

⁷Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Celaya, Guanajuato, México/Tecnológico Nacional de México-Roque, Celaya, Guanajuato, México, ryanez@hotmail.com

Autor para correspondencia: Ricardo Yáñez-López, ryanez@hotmail.com

Resumen

El incremento de la temperatura y la modificación de los patrones de distribución de la lluvia son dos de los efectos más ampliamente documentados del cambio climático global. Los impactos que tales



cambios están provocando en los procesos de producción agrícola constituyen una de las principales amenazas para la producción de alimentos, sobre todo bajo condiciones de temporal. El presente estudio pretende evidenciar los cambios que han tenido lugar en la disponibilidad de humedad para los cultivos y que son atribuibles al cambio climático en el estado de Guanajuato. El análisis consistió en estimar el periodo de crecimiento por disponibilidad de humedad (PC) a partir de las series históricas diarias de clima de 58 estaciones del Servicio Meteorológico Nacional. Las series históricas se dividieron en dos periodos: el primero de 1960 a 1979 y el segundo de 1980 a 2017. En el periodo de 1960-1979, el inicio del PC, calculado al 80 % de probabilidad acumulativa, ocurrió el día 193 (día juliano), el cual corresponde al 11 de julio; mientras que en el periodo 1980-2017 se presentó hasta el día 211, que corresponde al 30 de julio. En lo que se refiere a la duración del PC, calculada al 80 % de probabilidad de excedencia, se observa una reducción, al pasar de 110 días en el periodo 1960-1979 a solo 75 días en el periodo 1980-2017. De continuar estas tendencias, la superficie agrícola susceptible de ser cultivada bajo condiciones de temporal en el estado se reducirá drásticamente en pocos años.

Palabras clave: cambio climático, humedad residual, secano, estación de crecimiento.

Abstract

Increasing temperature and modifying rain distribution patterns are two of the most widely documented effects of global climate change. The impacts that these changes are causing in agricultural production processes constitute one of the main threats to food production, especially under rainfed conditions. This study aims to show the changes that have taken place in the availability of moisture for crops and that are attributable to climate change in the State of Guanajuato. The analysis consisted in estimating the Growth Period by the availability of moisture (GP) from the daily historical series of the climate of 58 stations of the National Meteorological Service. The historical series were divided into two periods, the first from 1960 to 1979 and the second from 1980 to 2017. In 1960-1979, the GP start, calculated at 80 % cumulative probability, occurred on day 193 (Julian day), which corresponds to July 11, while in the period 1980-2017, it was presented until day 211, which corresponds to July 30. Regarding the GP duration, calculated at 80 % probability of exceedance, a reduction is observed from 110 days in 1960-1979 to only 75 days in 1980-2017. If these trends continue, the agricultural area that can be cultivated under rainfed conditions in the State will be drastically reduced in a few years.

Keywords: Climate risk, residual moisture, rainfed, growth station.

Recibido: 03/05/2021

Aceptado: 18/09/2021

Introducción

El cambio climático es un fenómeno que en términos generales se asocia con el calentamiento global, pero que en realidad comprende una serie más amplia de cambios en el comportamiento del clima, como la distribución de la lluvia y la frecuencia con que se presentan eventos meteorológicos extremos. El calentamiento de la atmósfera es quizás el efecto más ampliamente documentado del cambio climático global. De acuerdo con la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) (NOAA, 2021) aunque la tendencia de calentamiento no ha sido uniforme, la mayor parte de las regiones del mundo ha registrado incrementos en la temperatura media del rango de 0.07 °C por década desde 1880. Esta tasa se ha incrementado significativamente a razón de 0.18 °C por década a partir de 1981 (Figura 1).



Global Land and Ocean
January–December Temperature Anomalies

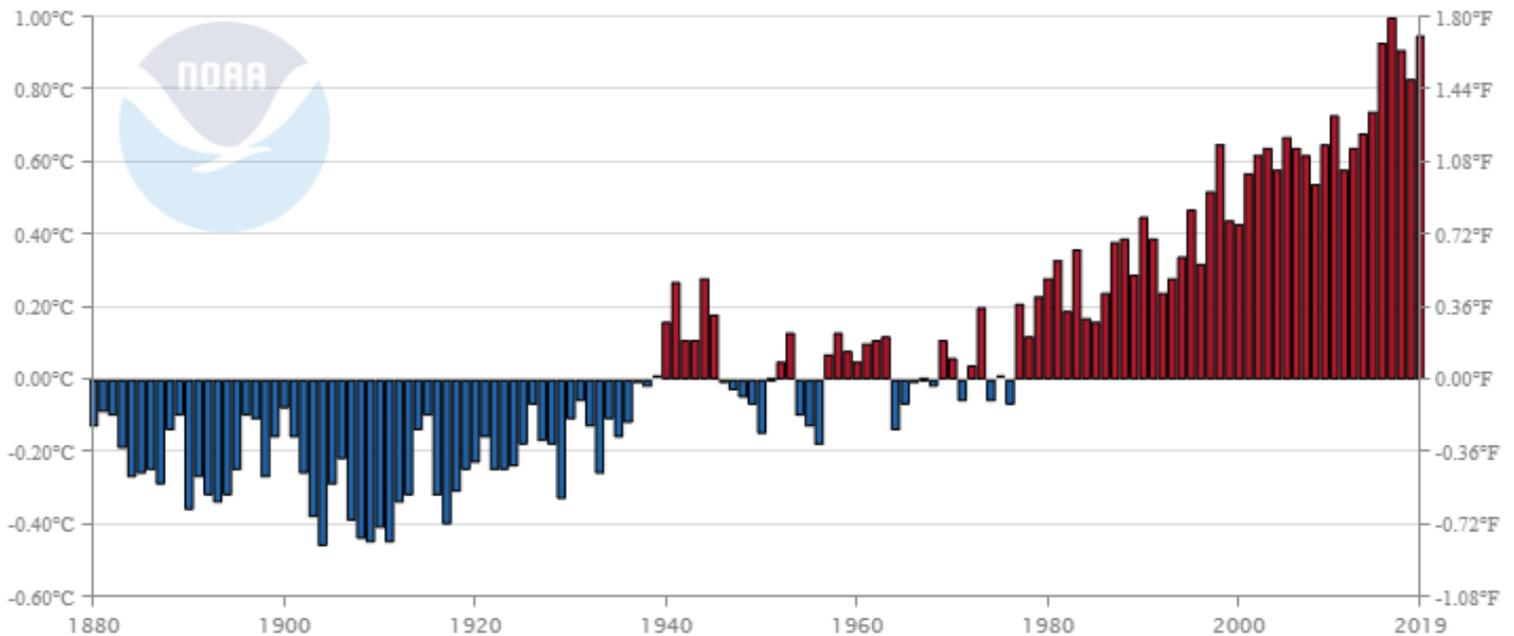


Figura 1. Anomalía de la temperatura global en el periodo 1880-2019 (NOAA, 2021).

Al nivel local existen evidencias de un calentamiento más acelerado de la atmósfera a partir del inicio de la década de 1980. En la Figura 2 se muestra la anomalía de la temperatura media anual para el caso de la estación meteorológica 11009 del Servicio Meteorológico Nacional, correspondiente a la localidad de Celaya, Guanajuato, México, en el periodo de 1962 a 2017.

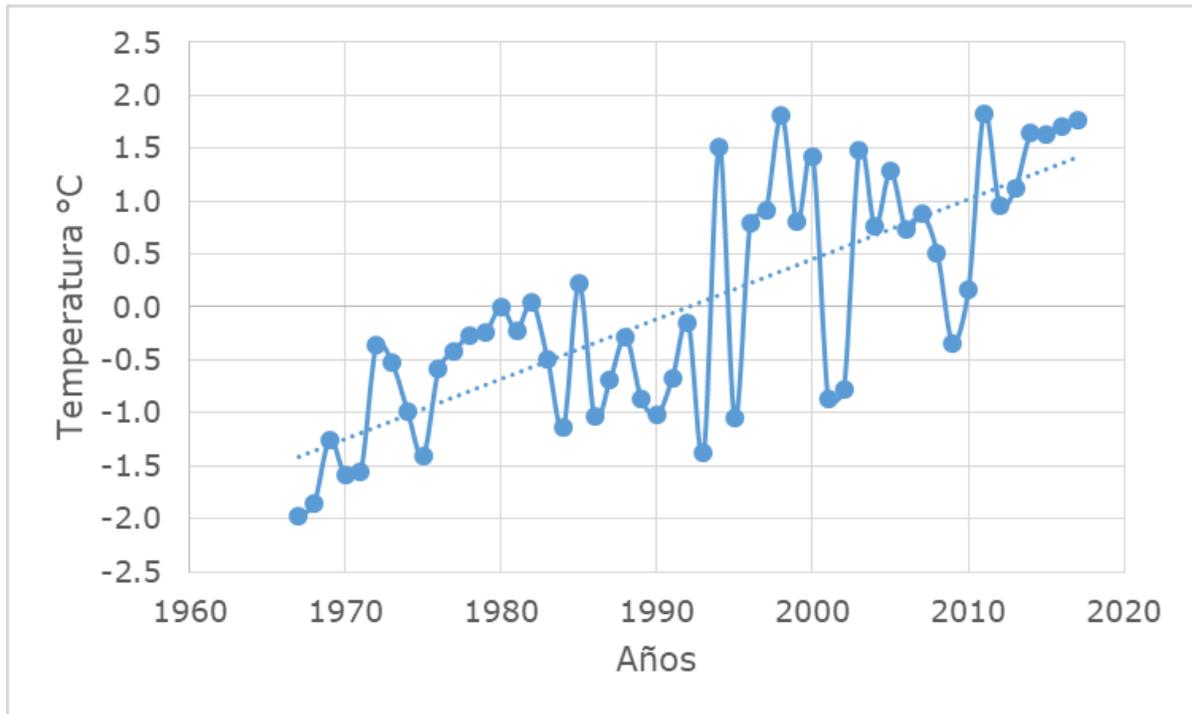


Figura 2. Anomalía de la temperatura media anual en Celaya, Guanajuato, México, en el periodo 1962-2017.

Los impactos del cambio climático en la agricultura incluyen incrementos en la siniestralidad de los cultivos, sobre todo bajo condiciones de temporal, mayor agresividad de plagas y enfermedades, y mayores costos de producción. También se vinculan con este proceso reducciones en la productividad de los cultivos y en las zonas de buen potencial de producción.

Un aumento en la temperatura estacional media puede disminuir la duración del crecimiento de los cultivos y, por lo tanto, afectar el rendimiento final. Los sistemas de producción de alimentos son extremadamente sensibles a los cambios climáticos, como las variaciones en la temperatura y precipitaciones, que pueden provocar brotes de plagas y enfermedades, mermando la cosecha.

El estado de Guanajuato se localiza en el centro de México, donde confluyen una zona de clima semiárido templado (BS1kw), que cubre la parte norte del estado, y una zona de clima semicálido subhúmedo (A)c(w0), que abarca el centro y sur del estado en la región denominada "El Bajío" (García, 2004). La superficie agrícola se compone de 1 470 000 ha, de las cuales 850 000 son de secano. La superficie cultivada bajo condiciones de temporal corresponde casi en su totalidad a cultivos como el maíz y el frijol, que registra por lo general rendimientos marginales y alcanza índices de siniestro de hasta un 70 %, sobre todo en el norte del estado (SIAP, 2020), debido principalmente a las variaciones interanuales en la cantidad y distribución de la precipitación (González, Navar, & González, 2008; Ortega & Velasco, 2013). El objetivo de la presente investigación consistió en evaluar los cambios en el inicio y duración del periodo de crecimiento en el estado de Guanajuato de 1960 a 2017. Se consideró este periodo para el estudio dado que en éste se cuenta con una mayor disponibilidad de datos meteorológicos y además durante el mismo se ha documentado un evidente calentamiento de la atmósfera.

Metodología

Para analizar los cambios en la disponibilidad de humedad en el periodo señalado se calculó el periodo de crecimiento (PC), el cual se define como la época del año en la que las condiciones de humedad y temperatura son idóneas para la germinación, establecimiento, crecimiento y maduración de los cultivos (Yousif *et al.*, 2018).

De acuerdo con la metodología de FAO (Kassam *et al.*, 1994), en la determinación del PC se identifican los siguientes componentes:

Inicio del PC. Está basado en el inicio del periodo de lluvias y se define como el tiempo cuando $PP = 0.5 * ETP$, considerándose que esta cantidad de agua es suficiente para la germinación de semillas de diferentes cultivos.

Periodo húmedo. Es el intervalo de tiempo en el cual la PP es mayor a la Eto. Cuando existe un periodo húmedo no sólo se satisfacen las demandas de evapotranspiración de los cultivos a una cobertura máxima, sino también el déficit de humedad en el perfil del suelo; pero no siempre el inicio del periodo húmedo coincide con el del PC.

Fin del PC. Cuando no existe periodo húmedo, el fin del PC coincide con el término de la estación lluviosa; es decir, el PC termina cuando $PP = 0.5 * ETP$ por última vez. Cuando existe periodo húmedo, el PC va más allá del fin de la estación lluviosa, pues los cultivos frecuentemente completan su ciclo con la humedad residual almacenada en el perfil del suelo. En ambos casos, el PC puede terminar si ocurre una helada.

Con base en lo anterior, el presente estudio comprendió las siguientes etapas:

- Selección de las estaciones meteorológicas.
- Delimitación de los periodos de estudio.
- Cálculo de la humedad residual, inicio y duración del PC por año.
- Construcción de distribuciones de probabilidad para el inicio y duración del PC en los dos periodos de estudio.
- Elaboración de mapas para el inicio y la duración del PC.

Selección de las estaciones meteorológicas

Desde el sitio web del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se descargaron los registros diarios de la serie histórica disponible para las



151 estaciones meteorológicas ubicadas en el estado de Guanajuato (Conagua, 2020). A partir del análisis de la longitud de la serie histórica y pruebas de calidad de los datos se seleccionaron 58 estaciones para llevar a cabo el análisis del PC.

Delimitación de los periodos de estudio

El análisis incluyó la división de la serie histórica de cada estación en dos periodos: el primero de 1960 a 1979 y el segundo de 1980 a 2017. Esta partición de la serie histórica se hizo para verificar si la intensificación del cambio climático que reporta la NOAA a partir del inicio de la década de 1980 se manifiesta también en el inicio y la duración del PC.

Cálculo de la humedad residual, inicio y duración del PC por año

La duración del PC se calcula como el tiempo, en días, durante el cual las temperaturas permiten un crecimiento del cultivo y la precipitación, más la humedad almacenada en el perfil del suelo supera la mitad de la evapotranspiración. La evapotranspiración (ET) es la suma de las cantidades de agua evaporada desde el suelo y transpirada por las plantas. La evapotranspiración potencial (ETP) o evapotranspiración de referencia (E_{to}) es la máxima cantidad de agua que puede ser perdida por una capa continua de vegetación que cubra todo el terreno (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006; IIASA & FAO, 2012).

Para calcular la E_{to} se utilizó el método de Priestley y Taylor, tal como se describe en Utset, Farré, Martínez-Cob y Cavero (2004), el cual es en esencia un balance de calor de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$E_{T0} = \alpha \frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma}$$

Donde:

a = constante empírica con un valor promedio de 1.26 (Utset *et al.*, 2004).

Δ = pendiente de la curva de saturación de vapor/temperatura, expresada en kPa/°C.

γ = constante psicrométrica, expresada en kPa/°C.

Rn = radiación neta, expresada en mm/día.

G = flujo de calor del suelo, expresada en mm/día.

Este método es particularmente útil cuando no se dispone de información sobre velocidad de viento y presión media de vapor.

De acuerdo con lo anterior se estimó la humedad residual ($HR = PP - ET_0 * .5$) al nivel diario, utilizando datos de precipitación y ET_0 . En la Figura 3 se muestra el diagrama de flujo para el cálculo de la humedad residual.

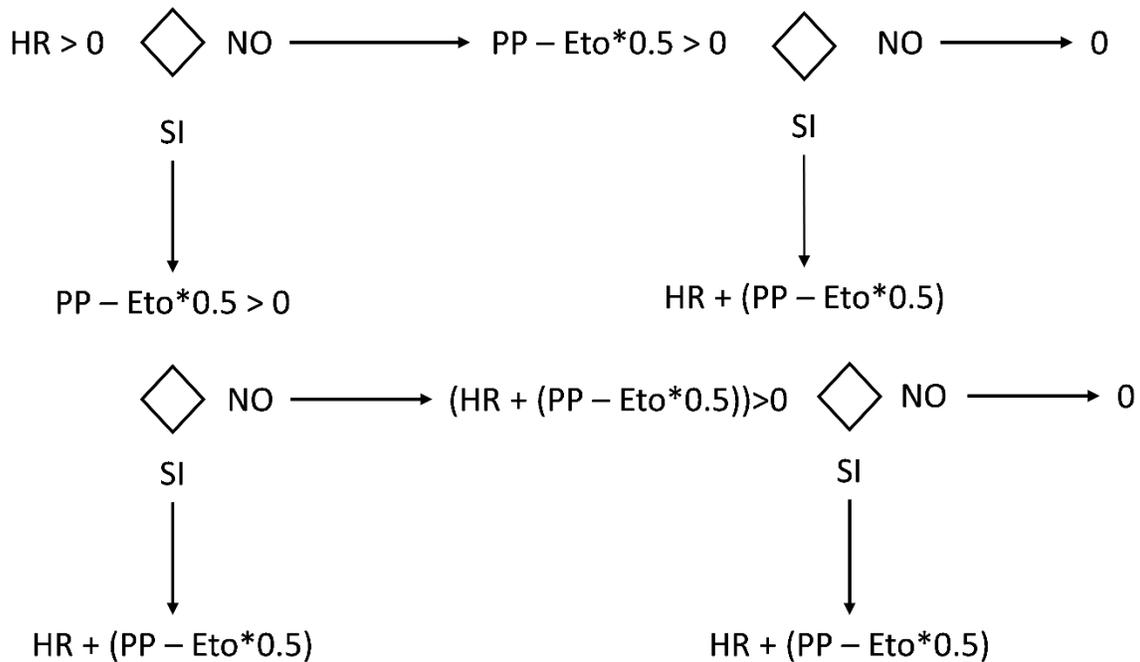


Figura 3. Diagrama de flujo para el cálculo de la humedad residual.

A partir del cálculo de la HR se determinó el inicio del PC cuando la humedad residual alcanzó un valor igual o mayor a 50 mm, considerando que ésta es suficiente para asegurar la germinación de la semilla (Aguilar *et al.*, 2005). El fin del PC se estableció cuando una vez iniciado éste, la humedad residual llegó a cero o la temperatura alcanzó un valor igual o menor a cero grados centígrados. Tal determinación se realizó para cada año de la serie histórica de las 58 estaciones meteorológicas seleccionadas. Con el fin de determinar si ha habido efectos del cambio climático que se reflejen en el PC se calcularon las anomalías tanto para el inicio como la duración del PC. Se utilizó el *software* SIMPEC (Quijano

& Rocha, 2011) para el procesamiento y cálculo de la HR a partir de los datos meteorológicos.

Construcción de distribuciones de probabilidad para el inicio y duración del PC en los dos periodos de estudio

Para el inicio del PC, los datos de la serie histórica se ordenaron de menor a mayor y se ubicó el percentil 80, el cual corresponde a la fecha más tardía en que inicia el PC 8 de cada 10 años. Para la duración del PC, los datos de la serie histórica se ordenaron de mayor a menor y se ubicó el percentil 80, el cual corresponde a la probabilidad de excedencia, es decir, a la duración más corta del PC 8 de cada 10 años (Arteaga-Ramírez, Vázquez-Peña, Coras-Merino, & Ángeles-Montiel, 2006). Con los datos del percentil 80 en cada caso se probó la hipótesis de que las diferencias entre los dos periodos a través de las diferentes estaciones son iguales a cero, donde:

$$H_0: \overline{Dif} \text{ Inicio PC} = 0$$

$$H_a: \overline{Dif} \text{ Inicio PC} \neq 0$$



$H_0: \overline{Dif} \text{ Duración PC} = 0$

$H_a: \overline{Dif} \text{ Duración PC} \neq 0$

Donde $\overline{Dif} \text{ Inicio PC}$ es la media de las diferencias en el inicio del PC entre los periodos de 1960 a 1979 y 1980 a 2017 a través de las diferentes estaciones meteorológicas evaluadas, y $\overline{Dif} \text{ Duración PC}$ es la media de las diferencias en la Duración del PC entre los periodos de 1960 a 1979 y 1980 a 2017 a través de las diferentes estaciones meteorológicas evaluadas. La prueba estadística se realizó mediante la distribución *t* de *student* para muestras apareadas, donde el estadístico de prueba está dado por:

$$t \text{ calc} = \frac{\overline{Dif} - 0}{S \text{ Dif} / \sqrt{n}}$$

Donde $S \text{ Dif}$ representa la desviación estándar de las diferencias entre los dos periodos analizados.

Elaboración de mapas para el inicio y la duración del PC

Los datos puntuales de inicio y duración del PC al 80 % de probabilidad se cargaron en el *software* ArcMap 10.1 (Esri Inc., 2012). A partir de estos datos se realizó la interpolación por el método IDW y se elaboraron los mapas tanto de inicio como duración del PC para el estado de Guanajuato, utilizando como filtro las zonas agrícolas. Se utilizó el marco geoestadístico municipal 2018, y el uso de suelo y vegetación serie 6 (INEGI, 2021).

Resultados

En la Tabla 1 se muestra un resumen de las características del PC en Guanajuato en los dos periodos analizados (1960-1979 y 1980-2017). A partir del percentil 80, acumulativo en el caso del inicio y de excedencia en el de la duración, se presentan los valores máximo (max), mínimo (min), promedio (media) y desviación estándar (desv. est.) obtenidos a

través de las 58 estaciones meteorológicas consideradas en este estudio. En ambos casos, el análisis estadístico detectó diferencias altamente significativas entre los periodos 1960-1979 y 1980-2017. En el periodo de 1960 a 1979, el inicio del PC ocurrió en promedio el día 193, el cual corresponde al 11 de julio; mientras que en el periodo de 1980 a 2017 se presentó hasta el día 211, que corresponde al 30 de julio. En lo que se refiere a la duración del PC, se observa una reducción, al pasar de 110 días en promedio en el periodo de 1960 a 1979 a solo 75 días en el periodo de 1980 a 2017.

Tabla 1. Características de inicio (día juliano) y duración (días) del PC en Guanajuato en dos periodos de estudio.

Periodo de crecimiento	Variable	1960-1979	1980-2017	Estadístico <i>t</i>
Inicio	Max	242	365	3.47 **
	Min	178	184	
	Percentil 80	192.98	211.40	
	Desv. est.	16.08	42.98	
Duración	Max	150	132	8.38 **
	Min	30	0	
	Percentil 80	110.32	74.81	
	Desv. est.	34.29	41.33	

El comportamiento típico de la humedad residual, y la delimitación del inicio y duración del PC se puede apreciar en la Figura 4. Los datos corresponden a la estación Salvatierra (11060) en dos años representativos de los dos periodos que se están comparando en esta investigación: el año 1970, como representativo del periodo 1960-1979; y el año 1999, como representativo del periodo 1980-2017. Como puede apreciarse, el inicio del PC ocurre en la misma fecha en ambos años, alrededor del 24 de junio; sin embargo, la duración es aproximadamente un mes menor en 1999, que culmina a mediados de octubre; mientras que en 1970, la humedad residual llega a cero hasta la última semana de noviembre.

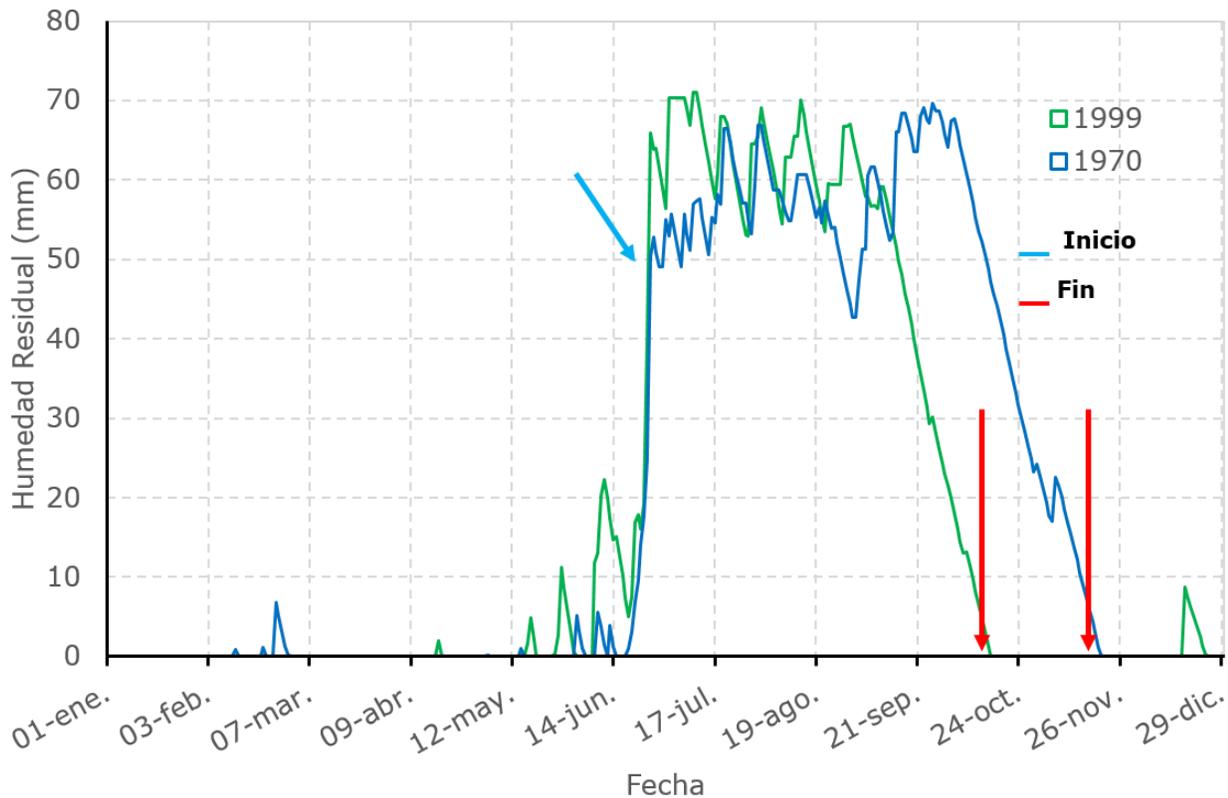


Figura 4. Dinámica de humedad residual en los años 1970 y 1999 en la estación de Salvatierra.

El análisis de las anomalías refleja con claridad los efectos del cambio climático sobre el PC. A manera de ejemplo, la Figura 5 muestra las anomalías tanto para el inicio (a), como la duración (b) del PC en la estación San Felipe (11065) del municipio de San Felipe, Guanajuato. En el caso del inicio del PC es evidente que en el periodo 1960-1979 predominan anomalías negativas, en tanto que a partir de 1980 hay un

incremento notable en la frecuencia y magnitud de anomalías positivas, las cuales reflejan la tendencia del retraso en el inicio del PC en este periodo. En lo que se refiere a la duración del PC, el gráfico b ilustra claramente la prevalencia de anomalías positivas en el periodo 1960-1979 y anomalías negativas después de 1980, lo cual es indicativo de la reducción sensible en la duración del PC en este periodo respecto al de 1960-1979.

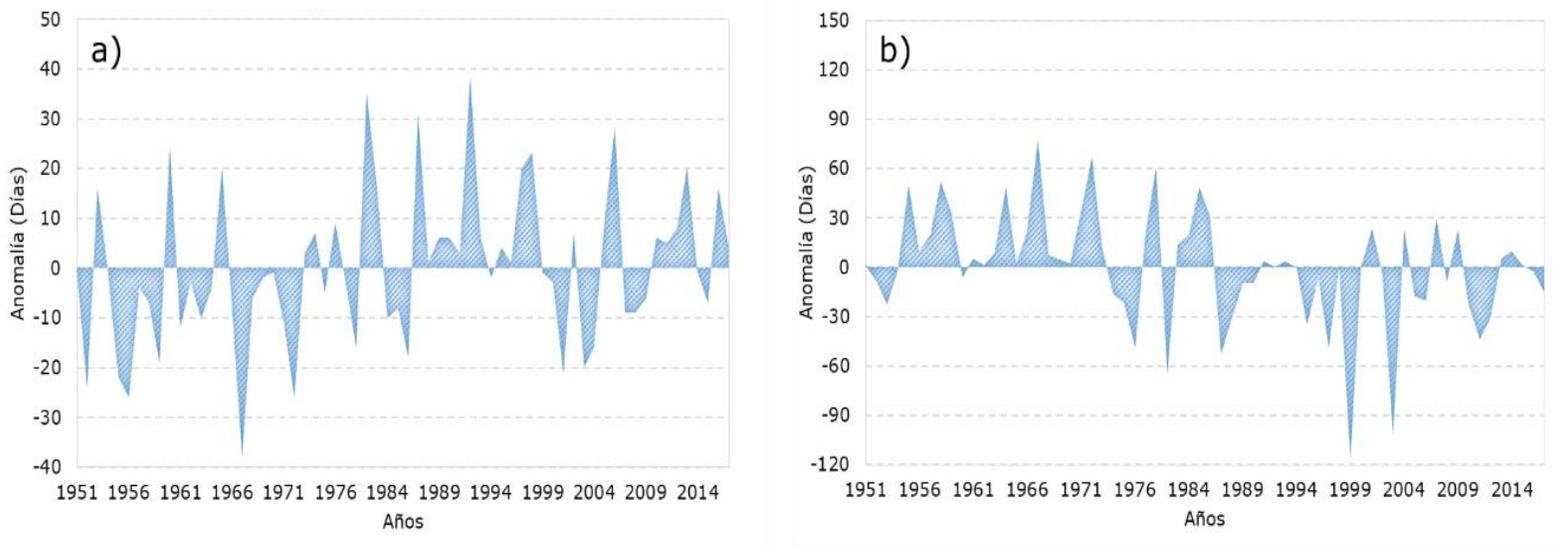


Figura 5. Anomalías del inicio del PC (a) y duración del PC (b) en la estación San Felipe (11065) del municipio de San Felipe, Guanajuato.

La tendencia de retraso en el PC en la mayor parte de zonas agrícolas del estado de Guanajuato se verifica en la Figura 6. En el caso

del inicio del PC (Figura 6a), las tonalidades verdes corresponden a las fechas tempranas y las rojas a las fechas tardías. Como puede apreciarse, en el periodo de 1960 a 1979, el inicio del PC delimitaba con claridad las dos zonas climáticas predominantes en el estado. La zona norte, con inicios en la segunda quincena de julio y primera de agosto, que en los municipios de San José Iturbide, San Miguel de Allende, Dolores Hidalgo, San Felipe y Ocampo, concentra la superficie agrícola de mayor importancia; se identifica también una región con menor importancia agrícola, que presentaba inicios del PC después de la primera quincena de agosto en los municipios de Doctor Mora, San Luis de la Paz y San Diego de la Unión, principalmente. En la zona sur, denominada comúnmente “El Bajío”, el inicio del PC ocurría de manera generalizada en la primera quincena de julio, con algunas zonas en los municipios de Salvatierra, Jaral del Progreso y Yuriria, que presentaban inicios anteriores al 30 de junio. Esta situación cambia drásticamente en el periodo de 1980 a 2017 (Figura 6b), donde prácticamente todo el norte se ubica en la tonalidad roja, con inicio del PC hasta después de la segunda quincena de agosto. En la zona sur se observa una amplia región abarcando municipios muy importantes desde el punto de vista agrícola, que registran un retraso en el inicio del PC hacia la segunda quincena de julio.

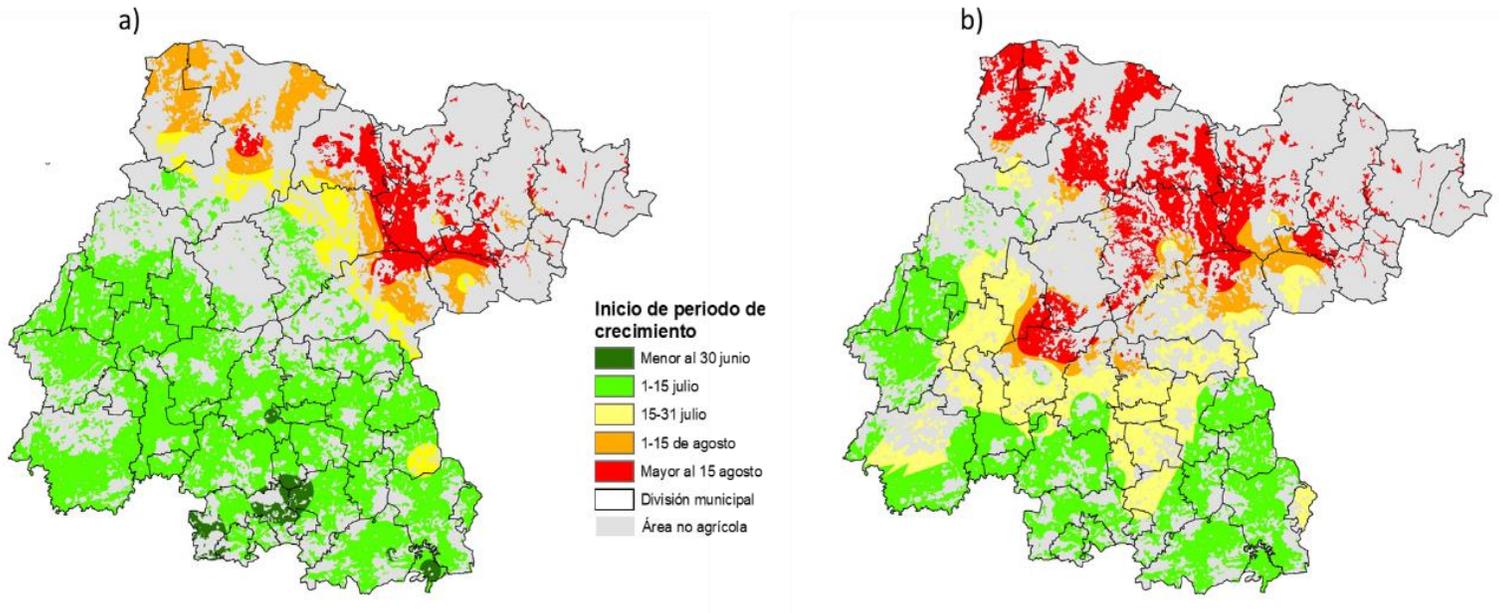


Figura 6. Inicio de periodo de crecimiento en el estado de Guanajuato:
a) periodo 1960-1979; b) periodo 1980-2017.

La duración del PC también registra reducciones importantes en la mayoría de las zonas agrícolas del estado, según se puede apreciar en la Figura 7. La rampa de colores del verde al rojo representa los cambios de mayor a menor duración del PC. En el periodo de 1960 a 1979 (Figura 7a), en los municipios del sur del estado prevalecían duraciones de más de 120 días del PC; mientras que en el periodo de 1980 a 2017 (Figura 7b), el PC se reduce en más de 30 días prácticamente en todos los municipios, afectando con mayor severidad (hasta en 60 días) a municipios como Manuel Doblado, Silao, Romita, León, y algunas zonas

de Irapuato, Salamanca, Juventino Rosas, Villagrán, Cortázar y Valle de Santiago.

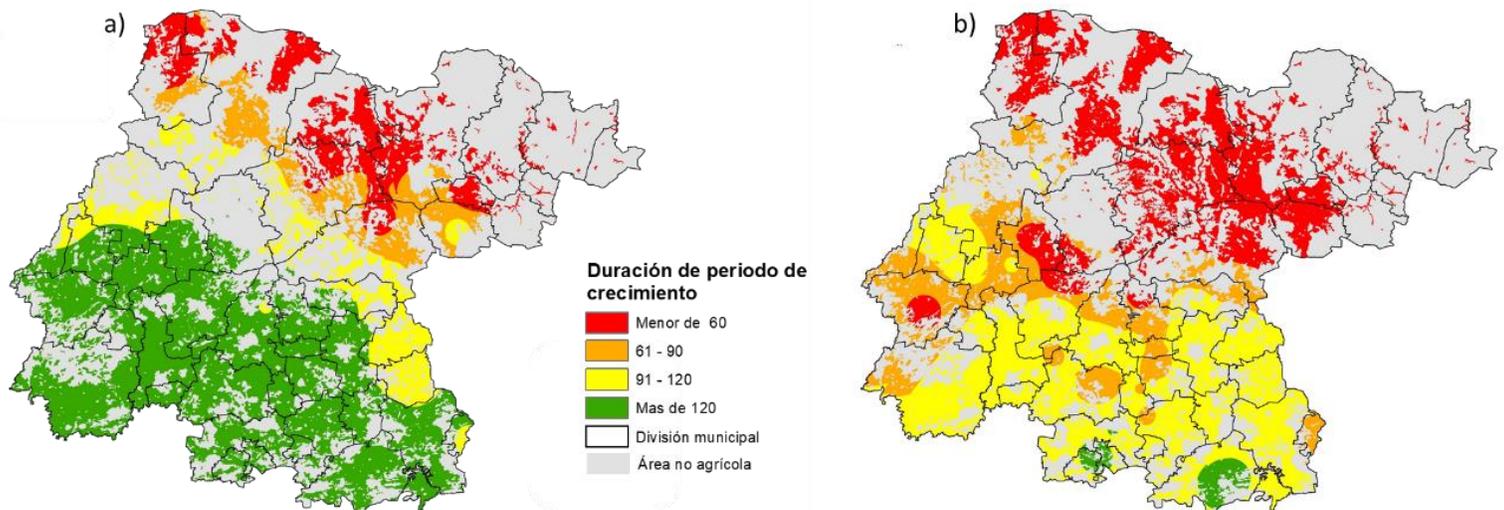


Figura 7. Duración del periodo de crecimiento en el estado de Guanajuato: a) periodo 1960-1979; b) periodo 1980-2017.

En el norte del estado se observa que en el periodo de 1960 a 1979, amplias zonas de los municipios de Ocampo, San Felipe, Dolores Hidalgo, San Miguel de Allende y San José Iturbide disponían de un PC de entre 90 y 120 días (Figura 7a), en tanto que en el periodo de 1980 a 2017 (Figura 7b), prácticamente todo el norte de la entidad registra duraciones del PC menores a 60 días.

Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que la disponibilidad de humedad para los cultivos se ha vuelto más restrictiva en el periodo de 1980 a 2017, pues, por una parte, en el promedio estatal ha habido un retraso de 18 días en el inicio del PC y, por la otra, la duración del PC se ha reducido en promedio 35 días en el promedio estatal. Esto significa que los cultivos disponen ahora de un menor periodo de tiempo para su crecimiento y probablemente bajo condiciones menos favorables, al desplazarse hacia fechas más tardías. Diversos autores han consignado los efectos negativos del cambio climático en la agricultura de zonas templadas y subtropicales en las últimas décadas. López-Blanco, Pérez-Damián, Conde-Álvarez, Gómez-Díaz y Monterroso-Rivas (2018) estimaron una reducción de entre un 2.4 y un 5.5 % en las áreas de buena aptitud para maíz de temporal en México bajo escenarios de cambio climático. Dichas condiciones más restrictivas no necesariamente están relacionados con una disminución en la cantidad de lluvia sino con cambios en los patrones de distribución de la misma; Murray-Tortarolo (2021) analizó las series históricas de clima para México de 1951 a 2017, encontrando que aunque la precipitación media anual no registra cambios

significativos, sí hay una tendencia clara de cambio en los patrones de precipitación, con años húmedos cada vez más húmedos y años secos con tendencia a ser cada vez más secos.

Tanto el retraso como el acortamiento del PC han afectado prácticamente a todas las zonas agrícolas del estado; sin embargo, la situación del norte de la entidad es particularmente preocupante si se considera que de acuerdo con la Comisión Nacional Forestal y la Universidad Autónoma Chapingo (Conafor-UACH, 2013), el 63.4 % de la superficie del estado de Guanajuato presenta algún grado de degradación del suelo, predominando la ocasionada por la actividad agrícola y que concentra los mayores niveles de degradación precisamente en la zona norte. Sin duda estos procesos de degradación del suelo y de afectación del PC amenazan seriamente la actividad agrícola en toda la entidad y particularmente en el norte, donde además se concentra la población rural más vulnerable del estado desde el punto vista socioeconómico. Otros autores, como López-Feldman (2013), han destacado las consecuencias negativas esperadas del calentamiento de la atmósfera y el cambio climático sobre la producción de alimentos, enfatizando que para países como México tales impactos serían más severos en los segmentos más pobres de la población rural. Mall, Gupta y Sonkar (2017) coinciden en la estimación de severos impactos negativos del cambio climático en zonas templadas y subtropicales, y advierten sobre la necesidad de implementar estrategias de adaptación desde el nivel del productor individual. Aguilar *et al.* (2005) propusieron una estrategia para la recuperación de los suelos

en la zona norte del estado de Guanajuato. Los autores presentaron evidencia de que el uso de prácticas conservativas puede mejorar las propiedades hidráulicas del suelo, y favorecer la captación y retención de humedad en beneficio de la actividad agrícola. Los resultados obtenidos por la presente investigación apoyan esta propuesta como la más viable para proteger la actividad agrícola y la sustentabilidad de la producción de alimentos en la entidad.

Conclusiones

En el estado de Guanajuato, el cambio climático se manifiesta no solamente en el incremento de la temperatura sino en los patrones de distribución de la lluvia. Estos cambios se han intensificado a partir de la década de 1980, afectando drásticamente a la disponibilidad de humedad para los cultivos.

En los últimos 40 años, el inicio del PC se ha retrasado al menos 15 días y la duración del PC se ha reducido en al menos 30 días prácticamente en todo el estado. En la actualidad, el PC se ha reducido a menos de 60 días en el norte, lo cual limita el uso de la superficie agrícola de esta zona

a la producción de forrajes. De continuar tales tendencias es muy probable que en un periodo corto la superficie agrícola susceptible de cultivarse bajo temporal se reduzca drásticamente.

Es urgente trabajar en programas educativos de productores para promover prácticas de conservación del suelo a fin de recuperar la capacidad de almacenamiento de humedad de los mismos.

Por otra parte, los programas de mejoramiento genético deberían enfocarse en la generación de materiales genéticos con características que permitan su adaptación a las nuevas condiciones de disponibilidad de humedad.

Referencias

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia: Estudio FAO Riego y Drenaje. Recuperado de <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>

Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A., Coras-Merino, P. M., & Ángeles-Montiel, V. (2006). Componente de estación de crecimiento variación temporal espacial en Chapingo, México. *Ingeniería Hidráulica en México*, 21(2), 57-68. Recuperado de <http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1085/97>

4



Aguilar, G. R., García, L. M. L., Paredes, M. R., Quijano, C. J. A., Aguirre, G. J. A., Díaz, E. L. F., & Arévalo, V. A. (2005). Efecto de las prácticas conservacionistas sobre la humedad del suelo y producción de maíz en Guanajuato. En: Sánchez, B. C., Fregoso, T. L. E., Bahena, J. F., & Bravo, E. M. (eds.). *Avances de investigación en agricultura sostenible III*. Morelia, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (Inifap), Centro Nacional de Productividad A.C. (Cenapros).

Conafor & UACH, Comisión Nacional Forestal & Universidad Autónoma de Chihuahua. (2013). *Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación. Informe final*. Zapopan, México: Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo. Recuperado de <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2018/06/linea-base-nacional-de-degradaci%C3%B3n-de-tierras-y-desertificacion.pdf>

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2020). *Información estadística climatológica*. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>

Esri Inc. (2012) *ArcGis 10.1 for Desktop. Software de sistemas de información geográfica*. Recuperado de <https://desktop.arcgis.com/es/desktop/>

García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)* (5ª ed.). México, DF, México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

González, M. J., Navar, C. J. J., & González, O. V. (2008). Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas*, (65), 38-55. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?scrip=sci_arttext&pid=s0188-46112008000100004&ing=es&nrm=iso.

IIASA & FAO, International Institute for Applied Systems Analysis & Food and Agriculture Organization. (2012). *Global agro-ecological zones (GAEZ v3.0)*. Laxenburg, Austria, and Rome, Italy: International Institute for Applied Systems Analysis & Food and Agriculture Organization. Recuperado de http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/13290/1/GAEZ_Model_Documentation.pdf

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). *Portal de Geoinformación 2021*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/datos/?t=0150>

- Kassam, A. H., van Velthuis, H. T., Fischer, G., & Shah, M.M. (1994). *Agro-ecological land resources assessment for agricultural development planning: A case study for Kenya. Resources data base and land productivity: Technical Annex 7: Guide to Computer Programs for Land Productivity Assessments. XQ-94-804.* Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis. Recuperado de <http://www.fao.org/3/t0737e/t0737e00.htm>
- López-Blanco, J., Pérez-Damián, J. L., Conde-Álvarez, A. C., Gómez-Díaz, J. D., & Monterroso-Rivas, A. I. (2018). Land suitability levels for rainfed maize under current conditions and climate change projections in Mexico. *Outlook on Agriculture*, 47(3), 181-191. Recuperado de <https://doi.org/10.1177/0030727018794973>.
- López-Feldman, A. (2013). Climate change, agriculture and poverty: A household level analysis for rural Mexico. *Economics Bulletin*, 33(2), 1126-1139.
- Mall, R. K., Gupta, A., & Sonkar, G. (2017). Effect of climate change on agricultural crops. In: Dubey, S. K., Pandey, A., & Sangwan, R. S (eds.). *Current developments in biotechnology and bioengineering* (pp. 23-46). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Murray-Tortarolo, G. N. (2021). Seven decades of climate change across Mexico. *Atmósfera*, 34(2), 217-226. Recuperado de <https://doi.org/10.20937/ATM.52803>

- NOAA, National Centers for Environmental Information. (2021). *Climate at a glance: Global time series*. Recuperado de <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/>
- Ortega, G. D., & Velasco, I. (2013). Aspectos socioeconómicos y ambientales de las sequías en México. *Aqua-LAC*, 5(2), 78-90. Recuperado de https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2014/06/Aspectos_socioeconomicos_y_ambientales_de_las_sequias_en_Mexico.pdf
- Quijano, C. J. A., & Rocha, R. R. (2011). *Sistema de información para el monitoreo del potencial ecológico de los cultivos, SIMPEC. Sistema de información para el monitoreo del potencial ecológico de los cultivos, SIMPEC*. Celaya, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2020). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Ciudad de México, México: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Recuperado de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>.

- Utset, S. A., Farré, I., Martínez-Cob, A., & Caveró, C. J. (2004). Comparing Penman-Monteith and Priestley-Taylor approaches as reference-evapotranspiration inputs for modeling maize water-use under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*, (66), 205-219. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2003.12.003>
- Yousif, L. A., Khatir, A. A., El-Hag, F. M., Abdelkarim, A. M., Adam, H. S., Abdelhadi, A. W., Kurosaki, Y., & Ali-Babiker, I. A. (2018). Length of the growing season for dry rainfed farming under Monsoon climate in Gedarif, Sudan. *African Journal of Agricultural Research*, 13(42), 2311-2323. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.5897/AJAR2018.13449>.