

# Efecto de las variables geo-climáticas sobre el rendimiento de los principales cultivos de temporal primavera-verano del estado de Aguascalientes

*Effect of Geo-Climatic Variables on the Yield of the Main Spring-Summer Seasonal Crops of the State Of Aguascalientes*

**Dora Elena Ledesma Carrión, Amós Antonio Pérez Hernández y Lidia Hernández Hernández\***

\* Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), [dora.ledesma@inegi.org.mx](mailto:dora.ledesma@inegi.org.mx), [amos.perez@inegi.org.mx](mailto:amos.perez@inegi.org.mx) y [lidia.hernandezh@inegi.org.mx](mailto:lidia.hernandezh@inegi.org.mx), respectivamente.

Sembrado de maíz en Aguascalientes/Amós Pérez Hernández



El inminente cambio climático global ha llevado a cuestionarnos: ¿se pueden observar sus efectos a nivel de zonas de tamaño pequeño comparada con la nacional? y ¿qué cultivos son los más afectados? Para poder contestarlas, se evaluó el efecto de las principales variables climáticas y factores no climáticos sobre los rendimientos de cultivos seleccionados del estado de Aguascalientes con modelos multirregresivos y simulación. Con las metodologías de detección de picos en comportamientos no lineales se encontró el corrimiento del inicio de la temporada de lluvias primavera-verano y el acortamiento-reajuste del semiciclo de calentamiento 1976-2007. Se encontraron zonas donde se conserva el equilibrio entre temperaturas-precipitaciones con mejores rendimientos. Se calcularon algunos indicadores de sustentabilidad. En general, algunos cultivos mostraron estrés hídrico, y para el 2030 se agregarán otros si no se toman medidas que resuelvan problemas específicos.

**Palabras clave:** factor de respuesta del cultivo; región; rendimientos; cambio climático.

Recibido: 5 de noviembre de 2020.  
Aceptado: 7 de abril de 2021.

## 1. Introducción

Los rendimientos de los cultivos ( $Y$ ) dependen, principalmente, de la tasa y magnitud del cambio en los atributos climáticos (McCarl *et al.*, 2001). Encontrar correspondencia entre el cambio climático (CC) global con los regionales depende, sobre todo, de la orografía, cercanía a grandes masas de agua, temperatura(s) ( $T$ ), precipitación(es) ( $P$ ),  $CO_2$ , entre otros factores. Estos CC son más evidentes en zonas alejadas de los trópicos (Prakash, 2011; Kunah *et al.*, 2018; McCarl *et al.*, 2001).

Al no disponer de riego, los cultivos de temporal son los más sensibles al cambio climático. En el estado de Aguascalientes (la región de estudio), los hay de temporada primavera-verano ( $P-V$ ), otoño-invierno y perennes. Los dos últimos

The imminent global climate change has led us to ask ourselves: can its effects be observed at the level of small areas compared to the national level, and which crops are the most affected? In order to answer these questions, the effect of the main climatic variables and non-climatic factors on the yields of selected crops in the state of Aguascalientes was evaluated with multi-regressive models and simulation. With the methodologies of peak detection in non-linear behaviors, the shift of the onset of the spring-summer rainy season and the shortening-adjustment of the 1976-2007 warming half-cycle were found. Zones where the temperature-precipitation balance is preserved were found with better yields. Some sustainability indicators were calculated. In general, some crops showed water stress, and by 2030 others will be added if no measures are taken to solve specific problems.

**Key words:** crop-response factor; region; yields; climate change.

carecen de suficientes datos, por lo que se trabajó con los de temporal  $P-V$ .

Se sabe que la  $T$  global se incrementará entre 0.3 y 1.7 °C en el escenario óptimo y de 2.6 a 4.3 °C en el pésimo (WMO, 2011; IPCC, 2013). Además, se reportaron periodos de calentamiento (*cal*) (1910-1945 y 1976-2007) y enfriamiento (*enf*) (1945-1976 y 2007-a la fecha) global. Estos son lapsos tradicionales de 31 años, incluyendo los ciclos de radiación solar (Hu *et al.*, 2013; Valdes *et al.*, 2014; Svalgaard *et al.*, 2005; SWL, 2020). Por ello, la alteración de estos ciclos es evidencia del CC. Estos fenómenos se deben, primordialmente, a los gases de efecto invernadero, cuyo principal compuesto es el  $CO_2$  en la atmósfera. Este y la  $T$  afectan los suelos y los cuerpos masivos de agua que están en la zona de influencia, con la consecuente alteración del ciclo

del agua y, con ello, la intensidad, frecuencia e inicio de la temporada de  $P$  (Hawkins & Sutton, 2011; Vörösmarty & Sahagian, 2000; Conceição *et al.*, 2003; Jokić *S et al.*, 2012; entre otros).

Lo anterior es una extrema simplificación de los complejos mecanismos que conforman el engranaje del clima. En el periodo 1945-1976 se presentaron subciclos *enf-cal-enf* como un reajuste térmico. Para analizar el comportamiento de estos ciclos en la región de estudio, se adaptaron técnicas de análisis espectroscópicas a  $T$  y  $P$  diarias, ampliamente usadas en otras áreas de estudio. El análisis aparece en el *Anexo*, sección A.1. Los resultados se utilizaron como insumos del modelo, en el cual se vincularon variables climáticas ( $vc$ ) —radiación solar, punto de rocío,  $T$  y  $P$ — y geográficas —altitud ( $Alt$ ), latitud ( $Lat$ ), longitud ( $Lon$ ), etc.— con económicas — $Y$  y *factores*— (ver figura 1 más adelante).

El objetivo de este trabajo fue estudiar la interacción entre dichas variables tomando en cuenta las características de la región. La Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA) clasificó estos factores de mejora (*factores*) no climáticos como sigue: uso de semilla mejorada o criolla, tecnología mecanizada, sanidad, suelo fertilizado y asistencia técnica en volumen de producción (Ton) y las hectáreas cosechadas (ha). Las hectáreas cosechadas son la diferencia entre las sembradas menos las siniestradas. Los *factores* están en unidades de hectáreas sometidas a mejora.

Para construir un buen modelo, se depuraron y ensamblaron las diferentes bases de datos aportando consistencia y congruencia a las relaciones funcionales. Por lo general, se evalúa una región autosustentable comparando las tasas de crecimiento de su población con la de otras variables, en este caso, de  $Y$  y emisiones de  $CO_2$  (*indicadores*) (Prakash, 2011). Otros parámetros son la productividad del agua ( $m$ ) y evaporación media del suelo ( $b$ ) con supuesto estrés hídrico ( $EH$ ), relacionados íntimamente con  $Y$  y la evapotranspiración de la planta ( $ET$ ); esto es, el balance entre agua-calor o  $T-P$  (FAO, 1990; Steduto *et al.*, 2012).

El trabajo está ordenado de la siguiente manera: en la sección 1, *Introducción*, se presenta una visión general de este. En la 2 se hizo la revisión de estudios de otros autores sobre el tema. La metodología con el modelo general y los resultados-discusión aparecen en las secciones 3 y 4, respectivamente. Por último, la 5 es el cierre o conclusiones. En el *Anexo* se hicieron diferentes análisis y cálculos de otros cultivos (cacahuete, camote, cebada y trigo grano), así como el análisis de las  $T$  y  $P$ .

Como ya se mencionó, se escogió al estado de Aguascalientes para la investigación. La entidad se encuentra a una  $Alt$  entre 1 580 y 3 050 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.), entre las  $Lat$  Oeste 101.837235 y 102.878667 y las  $Lon$  Norte 21.625435 y 22.459416; la  $T$  media ( $Tp$ ) es de 17-18 °C y una  $P$  promedio anual ( $Pp^{annual}$ ) de 526 mm; los suelos son apropiados para maíz, nopal, guayule y forrajes de temporal con agricultura mecanizada con limitaciones de: pendientes entre 2-10 %, profundidad 25-50 cm, sin o con pedregosidad (10-20 %) (INEGI, 1981); tiene clima semiseco (86 % de su territorio) y templado subhúmedo (14 %) (INEGI, 2020; García & Lugo, 2003). Los principales cultivos de temporal  $P-V$  son avena forrajera, maíz grano blanco, maíz forrajero, frijol flor de mayo, así como sorgo y triticale forrajeros, los cuales se siembran en la mayoría de los municipios (SAGARPA, 2020a). Respecto al uso de suelo, se ha perdido 42.24 % para la agricultura de temporal entre el 2014 y 2016 (SAGARPA, 2017).

El Foro Global de Soluciones 2020 hizo énfasis en la importancia de generar proyectos que solucionen problemas locales específicos vinculados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), cuyas metodologías sean transferibles y escalables.

## 2. Breve estado del arte

En los distritos de riego de México, el valor máximo de  $m$  fue de 1.6 kg/m<sup>3</sup> de 1994-2008 (CONAGUA, 2010). En el caso del maíz, fue de 4 kg/m<sup>3</sup> (Monte-

mayor *et al.*, 2007 y 2010) dentro del límite inferior al promedio global (ver cuadro 3);  $m$  varía según la región y está directamente influenciada por varios indicadores, como fertilidad y variedad del suelo, fechas de siembra, densidad de población, prácticas culturales, sistema de riego y clima. Este valor se debe incrementar porque el agua es el recurso más limitante en la agricultura (Colaizzi *et al.*, 2004; Afzal *et al.*, 2013). Existen diversas investigaciones al respecto en otros países que muestran la relevancia del tema.

Nepal es un país con marcada dependencia agrícola. Su situación geográfica reveló la importancia de este tipo de estudios para la toma de decisiones preventivas-reactivas. En el caso de esta nación, Prakash aplicó modelos regresivos lineales en primeras diferencias para probar la relación entre las  $vc$  y los  $Y$ , obteniendo resultados estadísticamente significativos. Los modelos fueron aplicados a cultivos de arroz, trigo, maíz, mijo, cebada y papa con datos meteorológicos de 1978 al 2008. Su territorio se encuentra, aproximadamente, entre las  $Lat$  26.1° y 31° N,  $Lon$  80° y 89° E,  $Alt$  100 a 7 000 m s. n. m. con clima desde tropical a frío polar, donde se registraron aumentos de  $T$  de 0.7 °C y  $P$  en verano. Estas condiciones favorecieron la  $ET$  del arroz, ya que requiere de grandes cantidades de agua para mantener el equilibrio  $T-P$ . Aun así, resultó no ser suficiente para alimentar a la futura población, ya que su tasa de crecimiento poblacional es mayor que la de  $Y$  (Prakash, 2011). Hay que hacer notar que el clima en Nepal marca claramente las estaciones en el año.

Desde 1990 se publicaron trabajos que expusieron el efecto devastador de los cambios en los patrones de  $P$ , por ejemplo, la concentración intensiva en un mes, el cambio en frecuencia e intensidad, desfasamiento de temporal, entre otros (Abrol *et al.*, 1996; Adams *et al.*, 1998; McCarl *et al.*, 2001; Kumar *et al.*, 2019); existe un acuerdo general de que el calentamiento global (CG) será mayor en  $Lat$  más altas que en los trópicos —en la región del presente estudio, el incremento de las  $T$  máximas diarias ( $T_{max}$ ) resultó de 0.00008 °C/día,

$T_p$  de -0.000065 °C/día y mínima ( $T_{min}$ ) de -0.00017 °C/día, ver Anexo—; diferentes modelos de circulación global predijeron que los efectos del CG variarán durante el día, estacionalmente y con la  $Alt$ : los bioquímicos del sistema enzimático de las plantas predijeron la tolerancia a las altas  $T$ , 40-45 °C y los de Abrol *et al.* (1996) mostraron que una de las plantas más resistentes es el trigo Sonora en la India.

Otros estudios relacionados con el riesgo de hambre fueron hechos para la República de Malí por Butt *et al.* (2005), donde las medidas de mitigación solo cubrieron 28 de 34 % de la reducción de alimentos después del CC en escenarios a largo plazo. Sus  $Y$  cubrieron únicamente 17 % de lo esperado en sus simulaciones. Este país se encuentra entre las  $Lat$  10° a 25° N,  $Lon$  4° E a 12° O y  $Alt$  250 a 500 m s. n. m. con montañas de hasta 1 000 m s. n. m.; su clima varía de semitropical a árido; la temporada de  $P$  es de junio a septiembre y con  $T_{max}$  entre marzo y mayo. La agricultura es su principal actividad económica seguida de los servicios. Presenta tasas de crecimiento poblacional mayores a las de sus  $Y$ , sobre todo en trigo.

Investigaciones similares hacen especial énfasis en la depuración de datos meteorológicos de las  $P$ . Laghari *et al.* (2014) utilizaron la técnica de la curva de masa doble para verificar la consistencia de la información respecto a otras fuentes. Esto equivaldría a contar con las suficientes estaciones meteorológicas para tener un buen muestreo. En su trabajo se hizo pretratamiento de datos y se calculó la  $ET$  de referencia ( $ET_0$ ) siguiendo la metodología de Penman-Monteith original sin modificaciones. En su caso,  $ET_0$  fue mayor entre abril y septiembre por el incremento de  $T$  teniendo el máximo en mayo. Se calcularon los requerimientos de agua y se compararon con los de riego. Lo importante de sus resultados fue encontrar valores comparativos entre las reacciones de los cultivos. Esta información alimentó la base de datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) para la región euroasiática.

Otro estudio interesante fue el realizado por Kuhn *et al.* (2018) en Ucrania. En ese país se cultiva, principalmente, trigo, maíz, cebada y arroz. Por su orografía se aplicaron modelos de conglomerados. Utilizaron datos anuales de  $Y$  (granos y leguminosas), cuya fuente fueron registros administrativos de 1966-2016. Identificaron cuatro conglomerados relacionados de manera geográfica y conectados espacialmente. Los  $Y$  variaron de 24.3 a 33.4 CWT/ha<sup>1</sup> en el distrito de Dnipropetrovsk, con evidencia de que, en toda la región, las variaciones están en el rango de 9.9 a 27.7 por ciento. Esta nación se encuentra en una zona climática entre mediterránea y continental templada, con  $T$  en verano entre 17 a 25 °C, con registros máximos en julio de 33 °C; las  $P$  oscilan de Este a Oeste de 300 a 1 500 mm anuales y de Norte a Sur de 400 a 1 200 milímetros. Se localiza entre las  $Lat$  43 y 55° N,  $Lon$  entre 22 y 40° E y  $Alt$  entre -1 y 2 061 m s. n. m., donde sobresalen las llamadas zonas agroecológicas, que son únicas y están caracterizadas por su capacidad de producción, y presentan un patrón invariable de respuesta a diversos factores climáticos, ambientales y agroeconómicos. Lo notable de su trabajo fue identificar zonas con condiciones similares de producción en una región fuera de los trópicos (similar a la Comarca Lagunera de México). Los factores de la  $ET$  mostraron el equilibrio  $T-P$  en verano usando tecnologías adecuadas de riego.

En tanto, los resultados de las simulaciones de McCarl *et al.* (2001) sobre los  $Y$  en tierras secas bajo condiciones de CC para el 2030 fueron cuantificados en porcentajes, "... cultivo (% de cambio en los  $Y$ 's respecto a los que habría si no hubiera cambio climático)": maíz (11-19 %), trigo (15-20 %), sorgo (15-17 %) y pasturas (3-22 %). Aspectos que afectaron los  $Y$  fueron la tasa y magnitud del cambio en los atributos climáticos y la capacidad de enfrentarlos. Los agricultores adoptaron para mejorar sus  $Y$  semillas mejoradas, fertilizantes específicos y técnicas innovadoras según el cultivo, pero aun así, para cambios a mediano plazo de los patrones de  $P$  y rangos de temperatura diaria ( $\Delta Td$ ), mostró la necesidad de tomar decisiones más drásticas.

1 Hundredweight, CWT = 20 toneladas.

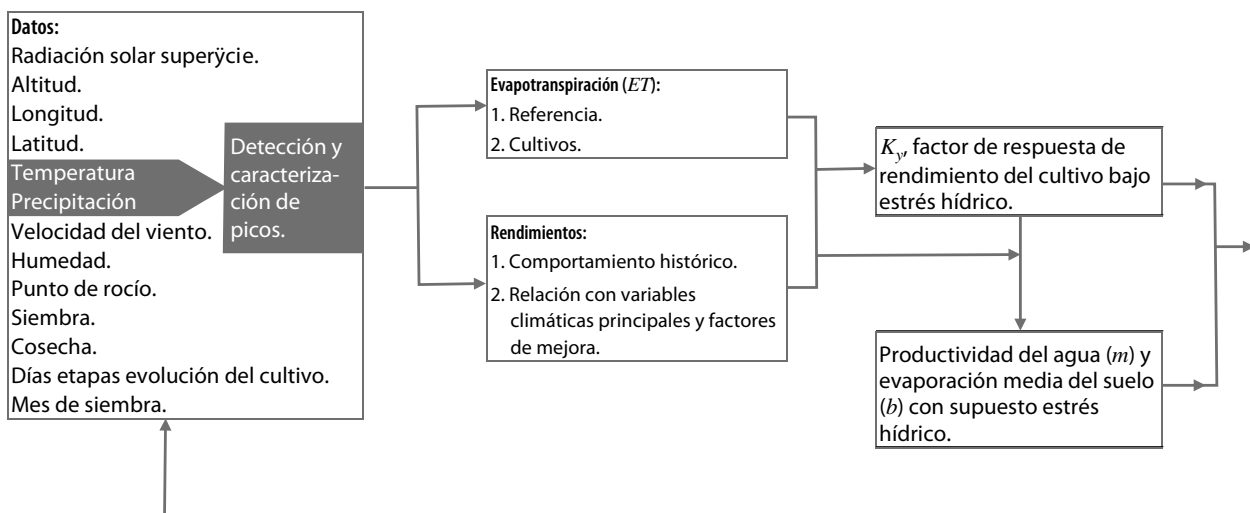
A principios del 2000 se llevó a cabo un estudio exploratorio sobre los recursos naturales en África. Se detectaron cinco problemas prioritarios a enfrentar: sequía, inundaciones, tormentas, reducción de costas y agricultura (Boko *et al.*, 2007; McKinnon *et al.*, 2009), los cuales se encontraron también en Latinoamérica, zona intertropical sobre todo (CEPAL, 2015). En Tanzania, el principal impacto del CC fue en la agricultura y la vida silvestre que dependen fuertemente de las  $P$ . Este país se localiza entre las  $Lat$  1 y 12° S,  $Lon$  29 y 41° E y  $Alt$  0 y 5 892 m s. n. m. (Kilimanjaro) con una gran meseta a 1 000 m s. n. m., con  $P$  entre 1 200 y 1 400 mm de marzo a junio y  $T$  entre 26 y 32 °C; su clima varía de semiárido a templado. Sus cultivos principales son maíz, mandioca, batatas, frijoles, bananos, arroz y mijo. Antes, los importantes eran azúcar, algodón, anacardos, tabaco, café, sisal y té. El sistema de alerta temprana sobre riesgos de hambruna, sequía e inundaciones, llevado a cabo por varias organizaciones no gubernamentales (ONG) y la ONU, generó información inconsistente, inaccesible e inapropiada para los agricultores (Kipkorir *et al.*, 2011), por lo que se mostró la prioridad de generar datos estadísticos confiables. Para enfrentar las necesidades alimentarias a futuro, Kumar *et al.* (2019) y Olowa *et al.* (2011) establecieron los requisitos de respuesta temprana, fomentadas por organismos internacionales: construir un sistema de respuesta a la propagación de riesgos, modificar prácticas tradicionales y actuales, crear especies resistentes al estrés ambiental, fomentar la cooperación entre gobiernos a todos los niveles y financiar proyectos a nivel local que resuelvan problemas específicos. Esto podría ser considerado entre zonas de influencia.

### 3. Metodología

Del Sistema Meteorológico Nacional (SMNM, 2020) y de las agroestaciones del Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos (LNMYSR, 2020) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) se descargaron los datos:  $T$ ,  $P$ , velocidad del viento, humedad re-

Figura 1

## Esquema del modelo general para obtener el factor de respuesta de rendimiento del cultivo ( $K_y$ ), productividad del agua ( $m$ ) y evaporación media del suelo ( $b$ ) esperados



Fuente: elaboración propia.

lativa, punto de rocío, radiación, azimut,<sup>2</sup> *Lat*, *Lon* y *Alt*. Los datos climáticos se encontraron de 1926 al 2018 en 58 estaciones meteorológicas y de 2017 al 2018, en agroestaciones ubicadas estratégicamente para muestrear la región. Para obtener  $Y$ , se consideraron datos de siembra, siniestro, cosecha y volumen de producción de cultivos de  $P$ - $V$  y temporal de 1980 al 2018. Se hicieron varios procedimientos previos (ver apartado 3.1 y *Anexo*).

Primero se analizó el comportamiento de las variables para aplicar la metodología de la FAO a la región. En el caso de  $T$  y  $P$  se ajustaron modelos polinomiales y senoidales para explorar los posibles picos y luego se utilizaron los *softwares* Originlab y Fullprof para identificarlos y caracterizarlos. Así se identificó la frecuencia de  $P$  y su intensidad relacionados con los ciclos de *cal-enf* global. Paralelamente, para los datos históricos de  $Y$ , se ajustaron modelos lineales, potenciales, logarítmicos y

exponenciales ( $Y$  vs. año). Este análisis estableció el inicio de siembras para calcular los  $ET_0$  y  $ET$ .

Como un segundo paso se calculó la radiación solar superficial según ubicación de las estaciones meteorológica y día del año. Esto se incorporó al procedimiento de obtención de  $ET$  junto con otras variables, como punto de rocío, azimut, calendario del cultivo (SAGARPA, 2020c; ver *Anexo*, sección A.3), según el método de Penman-Monteith modificado de la FAO (Steduto, 2012) usando pasto como cultivo de referencia,  $ET_0$  (SIAP, 2019). En el tercero, las  $ET$  se vincularon a los  $Y$  en forma de tasas, ecuación (1), para obtener la pendiente  $K_y$ , factor de respuesta de  $Y$  con características de la región. En el cuarto se modeló el comportamiento de  $Y$  incorporando variables geográficas, climáticas y *factores* principales. En el quinto, con base en los  $Y$  y  $ET$ , se ajustaron modelos regresivos para obtener  $m$  y  $b$ , (FAO, 1990). Finalmente, se procedió a hacer simulaciones bajo escenarios de cambio de las variables. El modelo general se presenta en el diagrama de la figura 1.

<sup>2</sup> La distancia angular generalmente medida en el sentido de las agujas del reloj desde el punto Norte del horizonte hasta la intersección con el horizonte del círculo vertical que atraviesa un cuerpo celeste. Se usa para calcular la radiación solar neta que llega al suelo.

### 3.1. Comportamiento histórico de temperaturas, precipitaciones y rendimientos

A nivel global,  $T$  se incrementó  $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (WMO, 2011; IPCC, 2013). Para asociar los efectos del CC global a la región, se ordenaron  $T$  y  $P$  respecto al número del día del año (*espectro*). Para la temporada  $P$ - $V$ , hay 184 días, correspondiendo el día 1 al 1 de marzo y el 184 al 31 de agosto con un desfase de  $\pm$  dos semanas. A cada año se ajustaron modelos polinomiales de hasta orden 7 o senoidal orden 5. Sabiendo el número aproximado de picos, se afinó el *espectro* definiendo la línea base o de referencia para detectar un *tren* de  $P$  o  $T$ . En el caso de las  $P$ , la línea base es  $0\text{ mm}$  (*sin P*) y en  $T$ ,  $T_p$  histórica, esto último para  $T_{max}$  y  $T_{min}$ . Se usaron los *softwares* OriginLab versión 8.0 y FullProof para detectar finalmente todos los picos (estos se caracterizaron) o *trenes*. En el caso de  $P$ , por ejemplo, el área del pico corresponde a  $P_{acumulada}$ ,  $Alt$  máxima en el día en que llovió más intensamente, el día en que comenzaron las  $P$ , el rango de días que llovió consecutivamente, etc.; para  $T$  se determinaron los días atípicos (mayor a 2 desviaciones estándar). En el caso de  $Y$  se analizó su historial. Se buscó asociar  $Y$  con los patrones de  $T$  y  $P$  y los semiciclos de *cal-enf* global (ver Anexo).

### 3.2. Estrés hídrico

Se calculó el  $EH$  para cultivos con base en la metodología de la FAO (Steduto, 2012; FAO, 2012). La relación entre las  $ET$  real y esperada (máxima) es:

$$\left(1 - \frac{Y_{cultivo_a}}{Y_{cultivo_x}}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_x}\right) \quad (1)$$

donde  $Y_{cultivo_x}$  y  $Y_{cultivo_a}$  son  $Y$  máximos y reales,  $ET_x$  y  $ET_a$  son  $ET$  máxima y real y  $K_y$  es un factor de respuesta de  $Y$  que representa el efecto de la reducción  $ET$  en pérdidas de  $Y$ . La ecuación (1) es una función de producción de agua y se puede aplicar a todos los cultivos agrícolas.  $K_y$  captura la esencia de los complejos vínculos entre la producción y el uso del agua por parte de un cultivo,

donde intervienen muchos procesos biológicos, físicos y químicos. Los valores de  $K_y$  son específicos del cultivo y varían durante la temporada de crecimiento según la etapa:

- $K_y > 1$ : la respuesta del cultivo es muy sensible al déficit hídrico.
- $K_y < 1$ : el cultivo es más tolerante al déficit hídrico y se recupera parcialmente del estrés.
- $K_y = 1$ : la reducción del rendimiento es directamente proporcional al uso reducido de agua.

Cuando no hay datos para calcular  $K_y$  respecto a la región de estudio se utilizan los valores de la FAO (1990).

### 3.3. Uso del agua y productividad

La pendiente de la curva  $Y_{cultivo}$  vs.  $ET$  se puede considerar como la productividad del agua en términos de  $Y$  y su uso consuntivo. Si la intersección con el eje se interpreta como una medida de la evaporación acumulativa del suelo o  $b$ , entonces la pendiente se puede interpretar como  $m$  en términos de transpiración. Los valores de  $K_y$  varían a medida que se desarrolla la planta, por eso se calcularon los  $ET$  propios de cada cultivo y condiciones climáticas de la región tomando en cuenta el análisis de la subsección 3.1.

### 3.4. Modelos

Se probaron varios, sobresaliendo cuatro. Los que relacionan los cambios anuales de  $Y_{cultivo}$  con las  $vc$ , geográficas,  $CO_2$  y *factores* se expresan en la ecuación (2); las relaciones lineales, en la (3); el tipo Log-log, en la (4); y el lineal-logarítmica, en la (5). A continuación, se presentan las formas funcionales.

Sean:

- $Y_{cultivo}(t)$  es el rendimiento del cultivo.
- $\Delta Y_{cultivo}(t)$ , la diferencia entre periodos del rendimiento del cultivo.

$T_{min}(t)$ , la temperatura mínima.  
 $T_{max}(t)$ , la temperatura máxima.  
 $\Delta T_{min}^d$ , el rango de temperatura mínima diaria.  
 $\Delta T_{max}^d$ , el rango de temperatura máxima diaria.  
 $P_{min}(t)$ , la precipitación mínima.  
 $P_{max}(t)$ , la precipitación máxima.  
 $\bar{P}(t)$ , la precipitación promedio.  
 $CO_2(t)$  son las emisiones de dióxido de carbono.

$Factores(t)$  son mecanismos de apoyo para mejorar el rendimiento del cultivo.

$$\begin{aligned} \Delta Y_{cultivo}(t) = & c_0 + c_1 T_{max}(t) + c_2 T_{min}(t) + c_3 \Delta T_{max}^d(t) \\ & + c_4 \Delta T_{min}^d(t) + c_5 P_{max}(t) + c_6 P_{min}(t) \\ & + c_7 \bar{P}(t) + c_8 Altitud(t) + c_9 Latitud(t) \\ & + c_{10} Factores(t) + c_{11} CO_2(t) \dots \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Y_{cultivo}(t) = & c_1 T_{max}(t) + c_2 T_{min}(t) + c_3 \Delta T_{max}^d(t) \\ & + c_4 \Delta T_{min}^d(t) + c_5 P_{max}(t) + c_6 P_{min}(t) \\ & + c_7 \bar{P}(t) + c_8 Altitud(t) + c_9 Latitud(t) \\ & + c_{10} Factores(t) + c_{11} CO_2(t) \dots \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Ln(Y_{cultivo})(t) = & c_0 + c_1 Ln(T_{max})(t) + c_2 Ln(T_{min})(t) \\ & + c_3 Ln(\Delta T_{max}^d)(t) + c_4 Ln(\Delta T_{min}^d)(t) \\ & + c_5 Ln(P_{max})(t) + c_6 Ln(P_{min})(t) \\ & + c_7 Ln(\bar{P})(t) + c_8 Ln(Altitud)(t) \\ & + c_9 Ln(Latitud)(t) + c_{10} Ln(Factores)(t) \\ & + c_{11} CO_2(t) \dots \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Y_{cultivo}(t) = & c_1 Ln(T_{max})(t) + c_2 Ln(T_{min})(t) \\ & + c_3 Ln(\Delta T_{max}^d)(t) + c_4 Ln(\Delta T_{min}^d)(t) \\ & + c_5 Ln(P_{max})(t) + c_6 Ln(P_{min})(t) \\ & + c_7 Ln(\bar{P})(t) + c_8 Ln(Altitud)(t) \\ & + c_9 Ln(Latitud)(t) + c_{10} Ln(Factores)(t) \\ & + c_{11} CO_2(t) \dots \end{aligned} \quad (5)$$

## 4. Resultados y discusión

Los resultados del comportamiento histórico de  $Y$ ,  $T$  y  $P$  se presentan a continuación. En las subsecciones 4.2 a 4.3 aparecen los resultados del modelo tomando en cuenta los de la 4.1. Análisis y resultados sobre  $T$ ,  $P$  y  $Y$ , así como  $m$ ,  $b$  e indicadores de autosustentabilidad de otros cultivos aparecen en el Anexo, secciones A.2 a A.4.

### 4.1 Rendimientos, temperaturas y precipitaciones

La metodología de detección de picos aporta una medida más precisa de los corrimientos en  $P$  y ciclos de  $T$  que los modelos ANOVA de Kunah *et al.* (2018). La caracterización del *espectro* es completa sin importar la forma funcional de los desfases. La calidad de la información es crucial, por eso se depuraron los registros excluyendo los incompletos y/o nulos. A diferencia del proceso seguido por Laghari *et al.* (2014), no se necesitó validar diferentes fuentes de información. Se construyó un procedimiento general que puede aplicarse a cualquier región aprovechando la idea de conglomerados de Kunah *et al.* (2018).

En la región, el semiciclo de CG 1976-2007 se recortó-reajustó en subciclos 1976-1984, 1984-1994 y 1994-2007. En 1984 y 1994 disminuyeron  $P_{max}$ ,  $T_{max}$  y  $\Delta T_{max}^d$ , mientras que  $T_{min}$  y  $\Delta T_{min}^d$  se incrementaron respecto a los años 2004 y 2008. Esto es, se corrigió naturalmente  $T$ , ocasionando el corrimiento de  $P$  a los primeros días de marzo, ver gráfica 2. Estas condiciones afectaron las  $ET$  ocasionando cosechas inferiores a las esperadas (SAGARPA, 2020a), ver cuadro 1 y gráficas 1.  $T_{max}$  y  $P_{max}$  presentaron tendencia positiva con pendientes de 0.0363 °C/año y 0.5637 mm/año, respectivamente. En el periodo 1976-2007,  $P_{anual}$  presentó caídas notorias en 1979, 1982, 1989, 1996, 1998 y 2005, y repuntes en el 2001 y 2004. Del 2007-a la fecha de estudio, la peor caída histórica se presentó en el 2011. Los cultivos estudiados son tolerantes al incremento de temperatura hasta los 45 °C, pero no



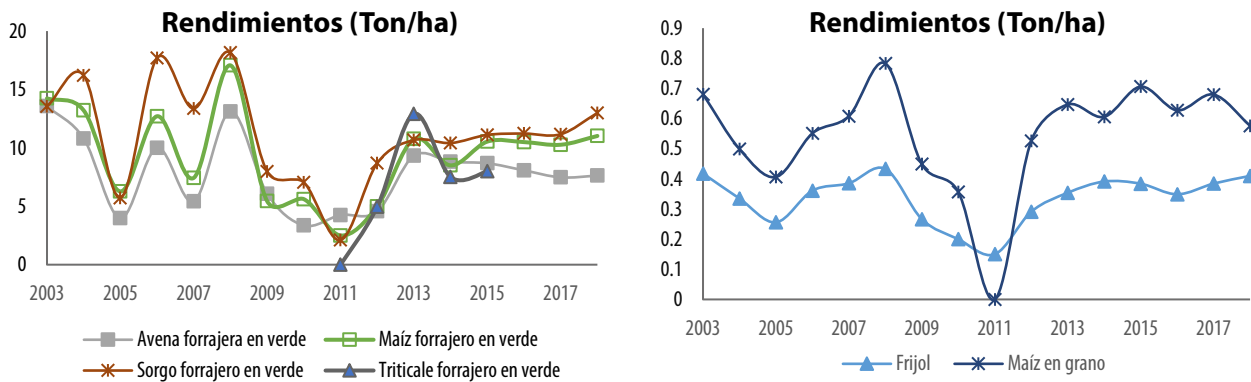
a la falta de agua. Esta región es afortunada por su ubicación geográfica, resguardada por un sistema montañoso que atrapa la humedad proveniente del mar y, por su orografía, las emisiones de CO<sub>2</sub> se dispersan fácilmente, caso similar al de Ucrania (Kunah *et al.*, 2018).

En los países africanos, por su ubicación cercana a cuerpos masivos de agua, los efectos del cambio climático son más drásticos (Kipkorir *et al.*, 2011; Kumar *et al.*, 2019; Olowa *et al.*, 2011). Las grandes masas de agua causan más desequilibrio en los ciclos del carbono y agua debido al CC. Se calcularon  $Y_{cultivo}^{2019}$  y no presentaron diferencias significativas con los valores medidos, por lo que es un indicio de estabilidad a corto plazo.

De las gráficas 1, el triticale forrajero pasó a ser cultivo de riego para aumentar su producción, ya que no hubo siniestro por *EH* (SAGARPA, 2020). En el 2004 y 2008 se presentaron los mayores *Y* en la mayoría de los cultivos (sin *EH*), mientras que en el 2011 fueron los peores. Después de la caída en el 2011, los *Y* volvieron a incrementarse sin llegar a los niveles antes mencionados. En el cuadro 1 se observa que el factor decisivo que afectó a los *Y* fue *P* en el 2011. En el 2004 y 2008 hubo buenas condiciones para el balance *T-P* reflejado en *ET* y de ahí los mejores *Y*. Los años 2008 y 2011 están dentro del periodo de *enf* global, lo cual coincide con los datos del cuadro 1, *T* no afectó los *Y* y permaneció dentro de los límites tolerables de los cultivos, 45 °C (Abrol *et al.*, 1996).

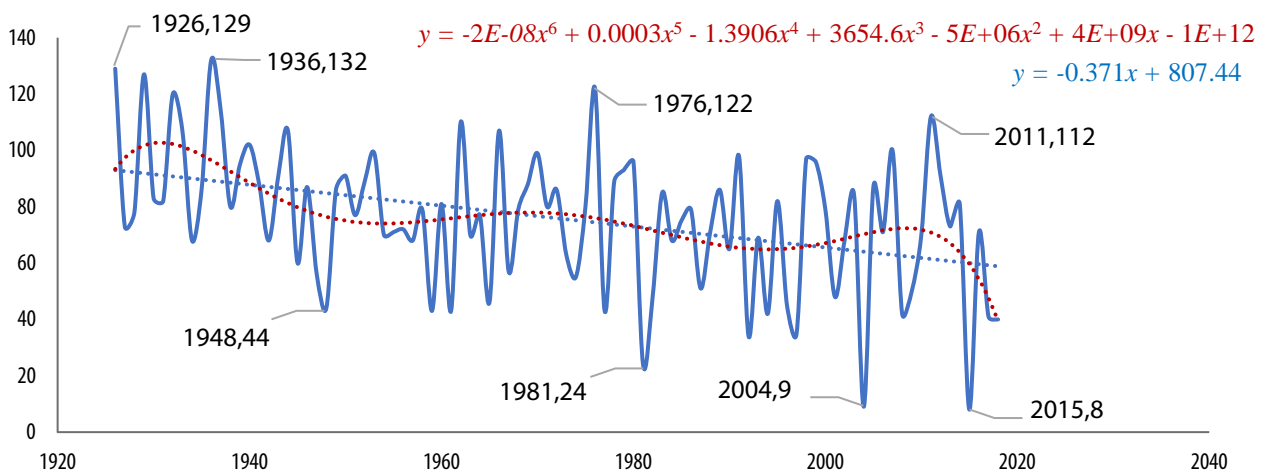
Gráficas 1

**Rendimientos de los principales cultivos en el estado de Aguascalientes, 1980-2018**



Gráfica 2

**Número de día para el inicio de temporada de *P* en primavera-verano (1 de marzo corresponde al día 1 y el 31 de agosto, al 184)**



Cuadro 1

### Comparativo de variables climáticas, estado de Aguascalientes

Año	Precipitación máxima [mm]	Precipitación promedio [mm]	Temperatura máxima [°C]	Temperatura mínima [°C]	Rango temperatura diaria máxima [°C]	Rango temperatura diaria mínima [°C]
1984	12.18	2.07	32.2	4.4	23.8	10.1
1994	11.15	1.62	31.8	5.5	23.2	11.1
2004	16.64	2.61	33.3	3.7	25.9	10.3
2008	17.55	2.98	35.2	4.1	28.3	10.2
2011	7.44	0.80	35.0	3.8	26.7	6.3

Las tasas de crecimiento de los  $Y$  no se recuperaron a partir del 2012 a los niveles que se tuvieron en el 2004 y 2008.

#### 4.2. Estrés hídrico

Se hicieron los ajustes multirregresivos y de ellos se dedujeron los  $K_y$ , reacción del cultivo, que sirve

para valorar si la planta padeció  $EH$  dadas las condiciones de  $P$  y  $T$  a lo largo de su desarrollo hasta la cosecha. Se simuló estableciendo escenarios de  $T$  y  $P$ . El cuadro 2 muestra los resultados proyectando al 2030. Se consideraron los cambios globales esperados (de 0.3 y 2.6 °C, cota inferior IPCC) que corresponden a 9.73 y 17.84 % de cambios en la región (usando resultados del Anexo, sección A.1). Se simularon dos escenarios para  $T$

Cuadro 2

### $K_y$ factor de respuesta de rendimiento del cultivo bajo estrés hídrico

Año	Avena forrajera en verde	Frijol	Maíz forrajero en verde	Maíz grano	Sorgo forrajero en verde	Triticale forrajero en verde
2003	s/e	0.04	0.07	0.12	s/e	
2004	0.10	0.30	0.15	0.23	s/e	
2005	1.06	0.99	0.33	1.42	0.17	
2006	s/e	0.18	0.13	0.44	s/e	
2007	1.42	1.98	0.73	1.82	0.17	
2008	0.03	0.55	0.04	0.08	0.04	
2009	2.42	2.53	2.13	2.55	1.36	
2010	0.82	1.27	0.58	1.79	0.02	
2011	2.39	2.52	2.71	s/e	2.67	
2012	1.47	1.13	0.68	1.70	0.80	1.73
2013	s/e	0.40	0.11	0.28	s/e	s/e
2014	0.04	0.14	0.09	0.45	0.30	s/e
2015	0.13	0.36	0.05	0.51	s/e	s/e
2016	s/e	0.20	s/e	0.20	s/e	
2017	s/e	s/e	s/e	s/e	s/e	
2018	s/e	s/e	s/e	s/e	s/e	
2019 medido	0.11	0.60	0.35	1.07	0.15	N/A
2019 <sup>†</sup>	0.09 ± 0.03	0.59 ± 0.11	0.21 ± 0.14	0.94 ± 0.16	0.13 ± 0.09	s/e
2030 <sup>†</sup>	0.25	0.70	0.41	0.74	0.15	s/e
	óptimo 2.61 catastrófico	óptimo 2.73 catastrófico	óptimo 3.01 catastrófico	óptimo 2.83 catastrófico	óptimo 1.97 catastrófico	óptimo 2.01 catastrófico

Nota: s/e sin  $EH$ ; el valor 0 indica pérdida total de la siembra; N/A, no aplica;  $y^†$ , modelado.

Cuadro 3

### Productividad del agua ( $m$ ) y evaporación media del suelo ( $b$ ) con supuesto $EH$

Parámetros con $EH$	Avena forrajera en verde	Frijol	Maíz forrajero en verde	Maíz grano	Sorgo forrajero en verde	Triticale forrajero en verde*
$m$ (kg/ha/mm)	2.492	0.528	40.771	0.792	19.444	2.837
$b$ (mm)	3 520.47	4 106.17	3128.95	7 186.54	3 361.49	3 784.51
$Y$ (kg/ha)	7 820.094 (4 418-9 000 <sup>9</sup> )	335.401 (600-2 000 <sup>9</sup> )	9 439.701 (9 000-50 000 <sup>9</sup> )	543.816 (1 000-10 000 <sup>9</sup> )	11 129.6 (11 000-27 000 <sup>9</sup> )	6 672.1 (3 000-10 500 <sup>9</sup> )

\* Comparando con otros lugares no presenta  $EH$ . Se calcula con base en los rendimientos reportados. La <sup>9</sup> denota el valor promedio mundial de la temporada y clima árido-semiárido.

y  $P$  en  $P-V$ :  $\pm 9$  y  $\pm 18$  % en  $T$ ,  $\pm 10$  y  $\pm 20$  % en  $P$ . Pueden establecerse otros escenarios. El resto de las variables permanecen constantes. Se probó un escenario catastrófico tomando como ejemplo lo ocurrido en el 2011.

#### 4.3. Uso del agua y productividad

Se obtuvieron la productividad del agua por cultivo de temporal  $P-V$  de 1980 al 2018 y los rendimientos promedio comparados con los globales (ver cuadro 3).

#### 4.4. Modelos

A continuación, los mejores ajustes que se obtuvieron del comportamiento de  $Y$  respecto a las variables geo-climáticas y *factores* para la región. Las emisiones de  $CO_2$  no fueron estadísticamente significativas. Para variables climáticas, remitirse a la subsección 4.1 y el Anexo. Los modelos son particulares de la región, con  $p$ -valor menores que las obtenidas por Prakash y Kunah *et al.* en sus respectivos modelos.

$$\Delta Y_{avena\ forrajera\ en\ verde}(t) = -2.37T_{min}(t) + 1.14\Delta T_{min}^d(t) \quad (6)$$

(0.0081)      (0.0084) ...

$$Y_{avena\ forrajera\ en\ verde}(t) = -1.38T_{min}(t) + 1.29\Delta T_{min}^d(t) + 0.001Factores(t) \quad (7)$$

(0.0303)      (0.0001)      (0.0806) ...

$$Y_{frijol}(t) = 0.032\Delta T_{max}^d(t) + 0.026P_{max}(t) - 0.039Altitud(t) \dots \quad (8)$$

(0.0000)      (0.0000)      (0.0001)

$$Y_{frijol}(t) = 0.004466T_{max}(t) + 0.018987P_{max}(t) - 0.000032Factores(t) \quad (9)$$

(0.0451)      (0.0003)      (0.0001) ...

$$\ln(Y_{maíz\ forrajera\ en\ verde})(t) = 0.8638\ln(\bar{P})(t) + 0.0749\ln(Latitud)(t) \quad (10)$$

(0.0071)      (0.0000) ...

$$Y_{maíz\ grano}(t) = 0.472\ln(P_{max})(t) + 0.065\ln(Factores)(t) \quad (11)$$

(0.0000)      (0.0069) ...

$$\ln(Y_{maíz\ grano})(t) = 0.618\ln(P_{max})(t) - 0.106\ln(Latitud)(t) \quad (12)$$

(0.0451)      (0.0033) ...

$$\ln(Y_{sorgo\ forrajera\ en\ verde})(t) = 1.0123\ln(\bar{P})(t) + 0.074\ln(Latitud)(t) \quad (13)$$

(0.0013)      (0.0000) ...

$$\begin{aligned}
Y_{\text{triticale forrajera en verde}}(t) = & -0.27\Delta T_{\text{max}}^d(t) + 1.68\bar{P}(t) \\
& (0.0049) \quad (0.0176) \\
& + 0.07\text{Factores}(t) \\
& (0.0039) \dots
\end{aligned}
\tag{14}$$

Del cuadro 3 se encontró *EH* en avena, maíz forrajero y frijol. El triticale, más resistente, pasó a cultivo de riego desde el 2016. De las ecuaciones (6 y 7), la avena dependió directamente del  $\Delta T_{\text{min}}^d$  e inversamente de *Tmin sin factores*. Con *factores*, el impacto de *Tmin* disminuyó 41.77 %, mientras  $\Delta T^d$  aumentó 13.16 por ciento. El frijol, más versátil y adaptable por ser una especie endémica, depende de manera directa de *Tmax* y *Pmax* e inversamente a la altitud. Estas dependencias son aminoradas, en gran medida, por el uso de *factores*, sobre todo en lo referente a la altitud, ecuaciones (8 y 9). El maíz forrajero dependió fuertemente de  $\bar{P}$ . El uso de *factores* y  $\Delta T^d$  no fueron estadísticamente significativas. Además, mostró una ligera relación directa con la latitud, ecuación (10). El maíz grano fue directamente proporcional a *Pmax* e inversa a la latitud. Con el uso de *factores*, la latitud no constituyó un obstáculo para su desarrollo, y disminuyó el efecto de las precipitaciones en 31 %, ecuaciones (11 y 12). Al igual que el maíz forrajero, el sorgo forrajero dependió fuertemente de las precipitaciones y ligeramente de su latitud independientemente del uso de *factores*, ecuación (13). Los cultivos forrajeros mostraron ser más adaptables a climas semiáridos (SIAP, 2019). El triticale resultó ser más resistente y adaptable que la cebada y el trigo (*Anexo*, sección A.4; SIAP, 2019); como todos estos, dependió directamente de *P* y *factores* y mostró una relación inversa con  $\Delta T_{\text{min}}^d$ , ecuación 14.

Los cambios en  $Y_{\text{maíz grano}}$  para el 2030, en el escenario óptimo, resultaron menores a los esperados en países fuera de los trópicos (Kunah *et al.* 2018). Se obtuvieron cambios alrededor de 21 % para el maíz blanco, y la productividad del agua actual resultó baja comparada con el estándar nacional medidos por Montemayor *et al.* (2007 y 2010). De los registros, los cultivos mostraron una presión

histórica de *EH*, con excepción del 2017-2018, caso análogo para los demás cultivos por el aumento de intensidad en *P*.

Históricamente, la productividad del agua ha estado por debajo de los estándares nacionales (ver cuadros 2 y 3). El promedio nacional de maíz grano blanco fue de 9.8 Ton/ha y el máximo, de 9.9 Ton/ha en el 2013 (Aguirre *et al.*, 2016). De las gráficas 1, para el caso de Aguascalientes en el 2013, los rendimientos fueron de 0.65 y 10.49 Ton/ha y, en promedio (del 2003 al 2018), de 0.5 y 9.4, respectivamente.

En San Luis Potosí, para el maíz grano y el forrajero, *Y* promedio ( $\bar{Y}_p$ ) en producción intensiva mejorada de temporal fue de 5.4-6.2 y 10.9-12.2 Ton/ha, respectivamente, arriba de los obtenidos. Como se observa en el cuadro 3, las *m* se encontraron por debajo de los *Y* reportados en esa entidad con condiciones de *Tp* de 21 °C,  $Pp^{\text{anual}}$  de 500 mm y *Alt* de 900 metros sobre el nivel del mar. A nivel global, estaban por debajo del máximo registrado hasta el 2008. Con las variaciones en *Y* obtenidas por Kunah *et al.*, para el escenario pésimo simulado, se encontró que el maíz grano y el frijol son los más sensibles al CC; resultado similar encontraron McCarl *et al.*

El estudio de Montemayor *et al.* (2015) sobre *EH* del triticale forrajero en la Comarca Lagunera de Coahuila de Zaragoza y Durango reportó *m* entre 1.08 y 1.3 g/m<sup>2</sup>/mm; aplicaron entre 520 y 620 mm de agua en cada ciclo y obtuvieron *Y* de 566 y 807 g/m<sup>2</sup>; de los cuadros 2 y 3. En nuestro caso, se calculó 0.4314 g/m<sup>2</sup>/mm, dato que corresponde al 2012 con  $Pp^{\text{anual}}$  de 10 331.1 mm y *Y* de 495 g/m<sup>2</sup>, por debajo de los resultados de Montemayor,<sup>3</sup> por lo que el siniestro no fue causado por *EH*; 100 % de  $Y_{\text{triticale}}$  del 2013 al 2015 con  $Pp^{\text{anual}}$  de 345.5 mm y  $Yp^{\text{triticale}}$  de 947 g/m<sup>2</sup>; el triticale se dejó de producir en el 2016 y pasó a ser un cultivo de riego para optimizar su producción.

3 El experimento de Montemayor se llevó a cabo en una de las regiones con más altos *Y* (SAGARPA 2020a).

El modelo de estudio reflejó condiciones propias de la región en particular importancia de la *Alt* en los  $Y_{\text{frijol}}$  y *Lat* en  $Y_{\text{avena forrajera}}$ ,  $Y_{\text{maíz grano}}$ ,  $Y_{\text{maíz forrajero}}$  y  $Y_{\text{sorgo forrajero}}$  como los cálculos de Kunah *et al.* para una zona geográfica con 10 °C más alta y *Alt* 1 000 m s. n. m. menor.

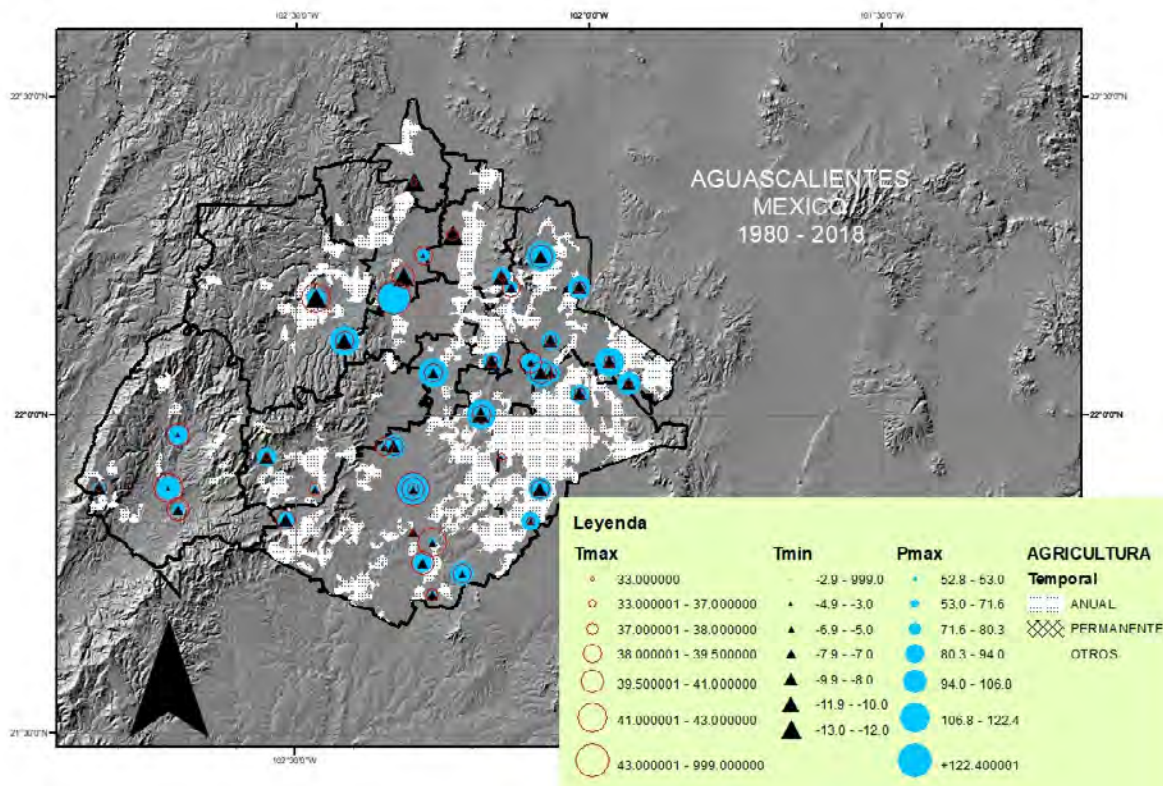
Se calcularon los indicadores de autosustentación: tasa de crecimiento de la población, 2.2 % (INEGI, 2015), y emisiones de CO<sub>2</sub> de la industria manufacturera, 5.5 % (RETC, 2020; Ledesma-Carrión *et al.*, 2020). En la región, estas fueron estadísticamente no significativas en los modelos prototipos. Aunque se integran al sistema mundial contribuyendo al aumento de *T* esperada. Además, tasa de *Y*: avena forrajera (3.6 %), frijol (0.6 %), maíz grano (0.7 %), maíz forrajero (1.8 %), sorgo forrajero (2.3 %) y triticale forrajero (2.4 %), por lo que no contribuyen a la sustentabilidad a largo plazo en la región de estudio los cultivos de temporal *P-V* de frijol, maíz grano, maíz forrajero.

Una representación visual para la región de las áreas de cultivo aparece en el mapa. Los diferentes tamaños de los símbolos están asociados a escalas, ya sean en °C o mm, y son los promedios en el periodo 1980-2018. Se encontró que *Tmax* extremas se presentan en el norte, en los municipios de Calvillo y Aguascalientes. Las *Tmin* altas están en el primero. Al sur del segundo, en el extremo oriental del municipio de El Llano y en el centro del de Asientos se observó mayor equilibrio entre *T* y *P*.

### 5. Conclusiones

El modelo permitió observar los efectos del CC global en la región geográfica de estudio y puede replicarse a otras regiones siempre y cuando se cuente con suficientes datos. Los resultados sobre los rendimientos señalan a los cultivos de maíz grano y frijol como los más sensibles a estos

Mapa



Se muestran las zonas de cultivo (puntos negros sobre blanco) y las posiciones de estaciones meteorológicas principales donde se escalan los promedios de 1980 al 2018 de las siguientes variables: precipitación máxima *Pmax* (círculos rellenos azules), temperaturas máximas *Tmax* (círculos rojos) y temperaturas mínimas *Tmin* (triángulos negros).

cambios, además de la influencia de la altitud en el primero, y que para el 2030 no contribuirán a la autosustentabilidad.

En el 2011, el estrés hídrico afectó a todos los cultivos con rendimientos mínimos históricos. La adaptación de la teoría espectroscópica a datos de temperatura y precipitación permitieron observar el acortamiento-reajuste del semiciclo de calentamiento 1976-2007, el corrimiento del inicio de temporada de *P* y los periodos con mayor intensidad. Las plantaciones son impactadas, principalmente, por la precipitación, siendo tolerantes al aumento de temperaturas. Se localizaron zonas donde, de manera histórica, presentan equilibrio temperatura-precipitación y se refleja en mejores rendimientos de estas.

## Fuentes

- Abrol, Y. P. & K. T. Ingram. "Effects of higher day and night temperatures on growth and yields of some crop plants", en: Bazzaz, F. y W. Sombroek (Eds.). *Book Global climate change and agricultural production: direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes*. Wiley, West Sussex, 1996, pp. 123-140.
- Adams, R. M., B. H. Hurd, S. Lenhart y N. Leary. "Effects of global climate change on agriculture: an interpretative review", en: *Clim Res.* 11: 1998, pp. 19-30 (DE) <http://www.hpccc.gov.in/PDF/Agriculture/Effects%20of%20Global%20Climate%20Change%20on%20Agriculture.pdf>
- Afzal, M., M. N. Sharif y M. Aslam. "Correlation and regression analysis of morphological traits in *Rumex dentatus*", en: *Bulletin of Biological and Allied Sciences Research Section Plant Sciences*. Vol.1, artículo 2, 002, 2013:1-5 (DE) consultado el 12 de enero de 2021 en: [https://www.researchgate.net/publication/329885325\\_Bulletin\\_of\\_Biological\\_and\\_Allied\\_Sciences\\_Research\\_Section\\_Plant\\_Sciences](https://www.researchgate.net/publication/329885325_Bulletin_of_Biological_and_Allied_Sciences_Research_Section_Plant_Sciences)
- Aguirre-Rivera, J. R., H. Charcas-Salazar y H. M. Durán-García. "Productividad de elote en Rioverde, SLP, México", en: *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Vol.7, Núm.7, 28 de septiembre-11 de noviembre, 2016, pp. 1563-1573.
- Boko, M. e I. Niang. "Africa. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability", en: Parry, M. L., O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. Linden y C. E. Hanson (Eds.). *Contribution of working Group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, Cambridge University Press, 2007, pp. 433-467.
- Butt, T. A., B. A. McCarl, J. Angerer, P. T. Dyke y J. W. Stuth. "The economic and food security implications of climate change in Mali", en: *Climate Change*. Vol. 68. Springer, 2005, pp. 355-378.

- CEPAL. "Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe: Dinámicas, tendencias y variabilidad climática", en: *UN*. 2015 (DE) consultado el 25 de octubre de 2020 en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/3955-efectos-cambio-climatico-la-costa-america-latina-caribe-dinamicas-tendencias>
- CONAGUA. "Estadísticas del agua en México" (ediciones 2010-2017), en: CONAGUA, SEMARNAT. *Distritos y unidades de riego (nacional)*. México, SINA, 2010-2017 (DE) <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?publicaciones=1>
- Colaizzi, P. D., A. D. Schneider, S. R. Evett y T. A. Howell. "Comparison of SDI, LEPA, and spray irrigation performance for grain sorghum", en: U.S. Department of Agriculture: Agricultural Research Service, Lincoln, Nebraska. *Trans. ASAE*. 47(5), 2004, pp. 472-492.
- Conceição-Rezende, F., J. A. Frizzone, R. Ferraz de Oliveira y A. Soares Pereira. "CO<sub>2</sub> and irrigation in relation to yield and water use of the bell pepper crop", en: *Scientia Agrícola*. Vol. 60, Núm. 1, Jan./Mar., 2003, pp.7-12,
- FAO. "Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos", en: *Estudio FAO riego y drenaje*. 56, 1990, ISSN 0254-5293.
- FullProf Suite. *Software libre para análisis espectroscópico*. 2020 (DE) consultado el 3 de marzo de 2020 en: <https://www.ill.eu/sites/fullprof/>
- García-Arizaga, M. T. y J. Lugo-Hubp. *El relieve mexicano en mapas topográficos*. México, Universidad Autónoma de México, Instituto de Geografía. ISBN-UNAM 968-36-7398-8, ISBN 970-32-0512-7.
- Hawkins, E. & R. Sutton. "The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change", en: *Climate Dynamics*. 37, 407, 2011, doi: 10.1007/s00382-010-0810-6.
- Hu, A. *et al.* (2013). "Mitigation of short-lived climate pollutants slows sea-level rise", en: *Nature Climate Change*. 3, 2011, pp. 730-734 (DE) consultado el 8 de mayo de 2020 en: <https://doi.org/10.1038/nclimate1869>
- INEGI. *Síntesis geográfica de Aguascalientes*. 1981 (DE) consultado el 3 de enero de 2020 en: [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825220563/702825220563\\_3.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825220563/702825220563_3.pdf)
- \_\_\_\_\_. *Cuéntame... de México*. 2015 (DE) consultado el 20 de junio del 2020 en: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/ags/poblacion/dinamica.aspx?tema=me&e=01>
- \_\_\_\_\_. *Cuéntame... de México. Territorio*. 2020 (DE) consultado el 20 de junio del 2020 en: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/ags/territorio/clima.aspx?tema=me&e=01>
- IPCC. "Cambio climático, bases físicas. Resumen para responsables de políticas", en: *Informe del Grupo de Trabajo I*. 2013. ISBN 978-92-9169-338-2.
- Jokić, S., B. Nagy, Z. Zeković, S. Vidović, M. Bilić, D. Velić y B. Simándi. "Effects of supercritical CO<sub>2</sub> extraction parameters on soybean oil yield", en: *Food and Bioproducts Processing*. 90, 2012, pp. 693-699.
- Kipkorir-Songok, C., E. Chessum-Kipkorir, E. Musungu-Mugalavai, A. Chepkok-Kwonyike y C. Ng'weno. "Improving the Participation of Agro-

- Pastoralists in Climate Change Adaptation and Disaster Risk Reduction Policy Formulation: A Case Study from Keiyo”, en: *Experiences of Climate Change Adaptation in Africa*. Climate Change Management, Springer. ISSN 1610-2010 e-ISSN 1610-2002 ISBN 978-3-642-22314-3 e-ISSN 978-3-642-22315-0. DOI 10.1007/978-3-642-22315-0.
- Kumar, S., B. Anwesha, A. Arif, K. Gaurav y S. Pardeep. “Agriculture in the Era of Climate Change: Consequences and Effects”, en: Krishna Kumar Choudhary, Ajay Kumar, and Amit Kishore Singh (Eds). *Climate Change and Agricultural Ecosystems*, Woodhead Publishing. 2019, pp. 1-23. ISBN 978-0-12-816483-9 (DE) consultado el 4 de mayo de 2020 en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816483-9.00001-3>
- Kunah, O. M., O.Y. Pakhomov, A. A. Zymaroleva, N. I. Demchuk, R. M. Skupskiy, L. S. Bezuhla & Y. P. Vladyka. “Agroeconomic and agroecological aspects of spatial variation of rye (secale cereale) yields with Polesia and the Forest-steppe zone of Ukraine: The usage of geographically weighted principal components analysis”, en: *Biosystems Diversity*. 26(4), 2018. ISSN 2519-8513 e-ISSN 2520-2529 (DE) consultado el 17 de mayo de 2020 en: <https://doi.org/10.15421/011842>
- Laghari, T.S., A. Khaliq, S.H. Hussain-Shah, S. Aliy H. Shahzad. “Analysis of rainfall data to estimate rain contribution towards crop water requirement using cropwat model”, en: *Russian Journal of Agricultural and Socio-economic Sciences*. 12(36), 2014, pp. 358-388 (DE) consultado el 8 de junio de 2020 en: [https://www.researchgate.net/publication/274076592\\_ANALYSIS\\_OF\\_RAINFALL\\_DATA\\_TO\\_ESTIMATE\\_RAIN\\_CONTRIBUTION\\_TOWARDS\\_CROP\\_WATER\\_REQUIREMENT\\_USING\\_CROPWAT\\_MODEL/link/55150f080cf283ee08398702/download](https://www.researchgate.net/publication/274076592_ANALYSIS_OF_RAINFALL_DATA_TO_ESTIMATE_RAIN_CONTRIBUTION_TOWARDS_CROP_WATER_REQUIREMENT_USING_CROPWAT_MODEL/link/55150f080cf283ee08398702/download)
- Ledesma-Carrión, D. E., A. Pérez-Hernández & L. Hernández-Hernández. “Status of the emission and transfer of pollutants in a medium-sized region”, en: *SN Applied Sciences*. 2:710, 2020 (DE) consultado el 5 de abril de 2020 en: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2437-5>.
- LNMYSR. *Datos de agroestaciones*. 2020 (DE) consultado desde el 1 de marzo de 2019 en: <https://clima.inifap.gob.mx/lnmysr/Estaciones>
- McCarl, B. A., R. M. Adams y B. H. Hurd. *Global climate change and its impact on agricultura*. Work Paper. Texas, Texas A&M University, 2001.
- McKinnon, K. y V. Hickey. “Convenient solutions to an inconvenient truth: ecosystem-based approaches to climate change”, en: *International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank*. 2009, pp. 45-89. ISBN-13 : 978-0821381267 (DE) consultado el 9 de junio de 2020 en: <https://www.amazon.es/Convenient-Solutions-Inconvenient-Truth-Ecosystem-Based/dp/0821381261>
- Montemayor, T. J. A., M. A. Segura-Castruita, J. Munguía-López & J. L. Woo-Reza. “Productividad del agua en el cultivo de triticale (*X. Triticosecale* Wittmack) en la Comarca Lagunera de Coahuila, México”, en: *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Vol. 6 Núm. 7, 28 de septiembre-11 de noviembre, 2015, pp. 1533-1541.
- Montemayor, T. J. A., J. A. Olague, H. M. Fortis, S. R. Bravo, R. J. A. Leos, S. E. Salazar, L. J. Castruita, R. J. C. Rodríguez y G. J. A. Chavaría “Consumo de agua en maíz forrajero con riego subsuperficial”, en: *Terra Latinoam*. 25(2), 2007, pp. 163-168. e-ISSN: 2395-8030.
- Montemayor, T. J. A., H. A. Walter, R. J. Olague, A. Román, G. L. M. Rivera, R. P. Preciado, T. I. R. Montemayor, C. M. A. Segura, V. J. A. Orozco y C. P. Yescas. “Uso del agua en la alfalfa (*Medicago sativa*) con riego por goteo subsuperficial”, en: *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 1(2), 2010, pp. 145-156.
- Olowa, O. W., O. A. Olowa & W. Leal-Filho. “Links Between Capacity and Action in Response to Global Climate Change: A Climate Response Shift at the Local Level”, en: “Book Experiences of Climate Change Adaptation in Africa”, en: *Climate Change Management*. Springer, 2011. ISSN 1610-2010 e-ISSN 1610-2002 ISBN 978-3-642-22314-3 e-ISSN 978-3-642-22315-0. DOI: 10.1007/978-3-642-22315-0.
- OriginLAB. Software ver. 8.0. 2020 (DE) consultado el 4 de abril de 2020 en: <https://my.originlab.com/forum/default.asp> y <https://www.originlab.com/fileExchange/details.aspx?fid=524>
- Prakash Niraj. “Effect of Climate Variables on Yield of Major Food-Crops in Nepal: A Time-Series Analysis”, en: *Journal of Contemporary India Studies: Space and Society*. Vol. 1, 2011, pp. 19-26 (DE) consultado el 9 de febrero de 2020 en: [https://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/en/list/HU\\_journals/hindas/--/1/item/31425](https://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/en/list/HU_journals/hindas/--/1/item/31425)
- RETC. *Registro de emisiones y transferencia de contaminantes*. 2020 (DE) consultado el 20 de junio 2020 en: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/retc/retc/index.php>
- SAGARPA. “Atlas Agropecuario y Pesquero Información del Sector Agroalimentario 2012”; en: *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP)*. 2012 (DE) consultado el 3 de abril de 2020 en: [www.siap.gob.mx](http://www.siap.gob.mx)
- \_\_\_\_\_. *SIAP*. 2017 (DE) consultado el 7 de febrero de 2020 en: <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/informacion-geoespacial-32571>
- \_\_\_\_\_. *SIAP*. 2020a (DE) consultado el 7 de febrero de 2020 en: <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/informacion-geoespacial-32571>
- \_\_\_\_\_. *SIAP/Servicios de información agroalimentaria y pesquera*. 2020b (DE) consultado el 8 de febrero de 2020 en: <https://www.gob.mx/siap/documentos/tecnificacion> y [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/92738/Cuadros\\_tabulares\\_2014.compressed.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/92738/Cuadros_tabulares_2014.compressed.pdf)
- \_\_\_\_\_. *Aptitud agroclimática de México*. Varios meses y años, 2020c (DE) consultado el 10 de febrero de 2020 en: <https://www.gob.mx/siap/prensa/aptitud-agroclimatica-de-mexico?idiom=es>
- SIAP. *Datos cultivos y factores*. 2019 (DE) consultado el 16 de septiembre de 2020 en: <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- Sistema Meteorológico Nacional de México (SMNM). *Datos*. 2020 (DE) consultado el 10 de marzo de 2020 en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>

Steduto, P., T. C. Hsiao, E. Fereres & D. Raes. "Crop yield response to water", en: *Irrigation and drainage paper 66*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012. ISSN 0254-5284. ISBN 978-92-5-107274-5.

Svalgaard, L., E. W. Cliver e Y. Kamide. "Sunspot cycle 24: Smallest cycle in 100 years?", en: *Geophysical Research Letters*. Vol. 32, L01104, 2005 (DE) consultado el 4 de junio de 2020, DOI: 10.1029/2004GL021664.

SWL. *Space Weather Live*. 2020 (DE) consultado el 23 de febrero de 2020 en: <https://www.spaceweatherlive.com/es/actividad-solar>

Valdes-Barrón, M., D. Riveros-Rosasa, C. A. Arancibia-Bulnes y R. Bonifaz. "The solar Resource Assessment in Mexico: State of the Art", en: *Energy*

*Procedia*. 57, 2014, pp. 1299-1308 (DE) consultado el 11 de mayo de 2020 en: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>, DOI: 10.1016/j.egypro.2014.10.120.

Vörösmarty, C. J. & D. Sahagian. "Anthropogenic disturbance of the terrestrial water cycle", en: *BioScience*. Vol. 50 (9), September, 2000, pp. 753-756.

World Meteorological Organization (WMO). "Space and climate change. Use of space-based technologies in the united nations system", en: WMO. *Weather, climate, wáter*. WMO-No. 1081, 2011. ISBN 978-92-63-11081-7.

---

## Anexo

A continuación, se expone el análisis de temperaturas y precipitaciones para relacionar el cambio climático global con cambios en la región.

### A.1 Rendimientos, temperaturas y precipitaciones

Tomando en cuenta que solo hay datos de rendimientos de 1980 al 2018, se estudió este periodo por separado. En la región, los datos diarios de temperatura ( $T$ ) se dividieron en temporadas, la de primavera-verano ( $P-V$ ) corresponde a los meses marzo-agosto y otoño-invierno ( $O-I$ ), a septiembre-febrero. El incremento en las temperaturas máximas diarias ( $T_{max}$ ) fue mayor en otoño-invierno (0.038) que en primavera-verano (0.012). Aquí solo se analizaron los datos de  $P-V$ , ya que reflejaron su impacto sobre los rendimientos ( $Y$ ) de los cultivos de temporal. Para los cultivos de  $O-I$  no hay suficientes datos. Se analizaron las variables climáticas principales para  $P-V$  y sus trimestres marzo-mayo ( $m-m$ ) y junio-agosto ( $j-a$ ). En términos generales, las temperaturas y precipitaciones máximas diarias ( $P_{max}$ ) de 1926 al 2018 presentaron tendencias positivas (ver gráficas A1a, A2a y A3a).

#### A.1.1. Análisis polinomial y senoidal

Enseguida se presentan los resultados del análisis exploratorio de temperatura y precipitación ( $P$ ).

##### A.1.1.1. Temperaturas

De las gráficas A1b y A1c, las pendientes anuales de  $P-V$  de las  $T_{max}$  mostraron que en  $j-a$  fueron negativas en su mayoría de 1926 al 2018, dándose en el 2002 el mayor decremento, mientras que el incremento más alto ocurrió en 1932 (ver gráfica A1c). Históricamente, en  $m-m$ , las pendientes anuales de  $T_{max}$  se han mostrado todas positivas:  $T_{max}$  cambió 0.0088 % ( $m-m$ ), -0.0074 % ( $j-a$ ) y, el total, 0.0078 % ( $P-V$ ). En los últimos 40 años, las pendientes anuales de  $m-m$  están balanceadas alrededor de la tendencia histórica, mientras que en los últimos 10 años ha predominado por abajo de ella. Para  $j-a$ , están claramente por arriba. De 1980 al 2018,  $T_{max}$  cambió 0.00996 % ( $m-m$ ), 0.024 % ( $j-a$ ) y 0.026 % ( $P-V$ ), lo que es un sutil cambio en la tendencia de una de las principales variables del clima, sobre todo en  $j-a$ . De manera análoga, de las gráficas A2a, A2b y A2c, las temperaturas diarias mínimas ( $T_{min}$ ), -0.0306 % ( $m-m$ ), 0.0127 % ( $j-a$ ) y -0.0135 % ( $P-V$ ). De 1980 al 2018, los cambios fueron -0.0386 % ( $m-m$ ), -0.0047 % ( $j-a$ ) y 0.0089 %

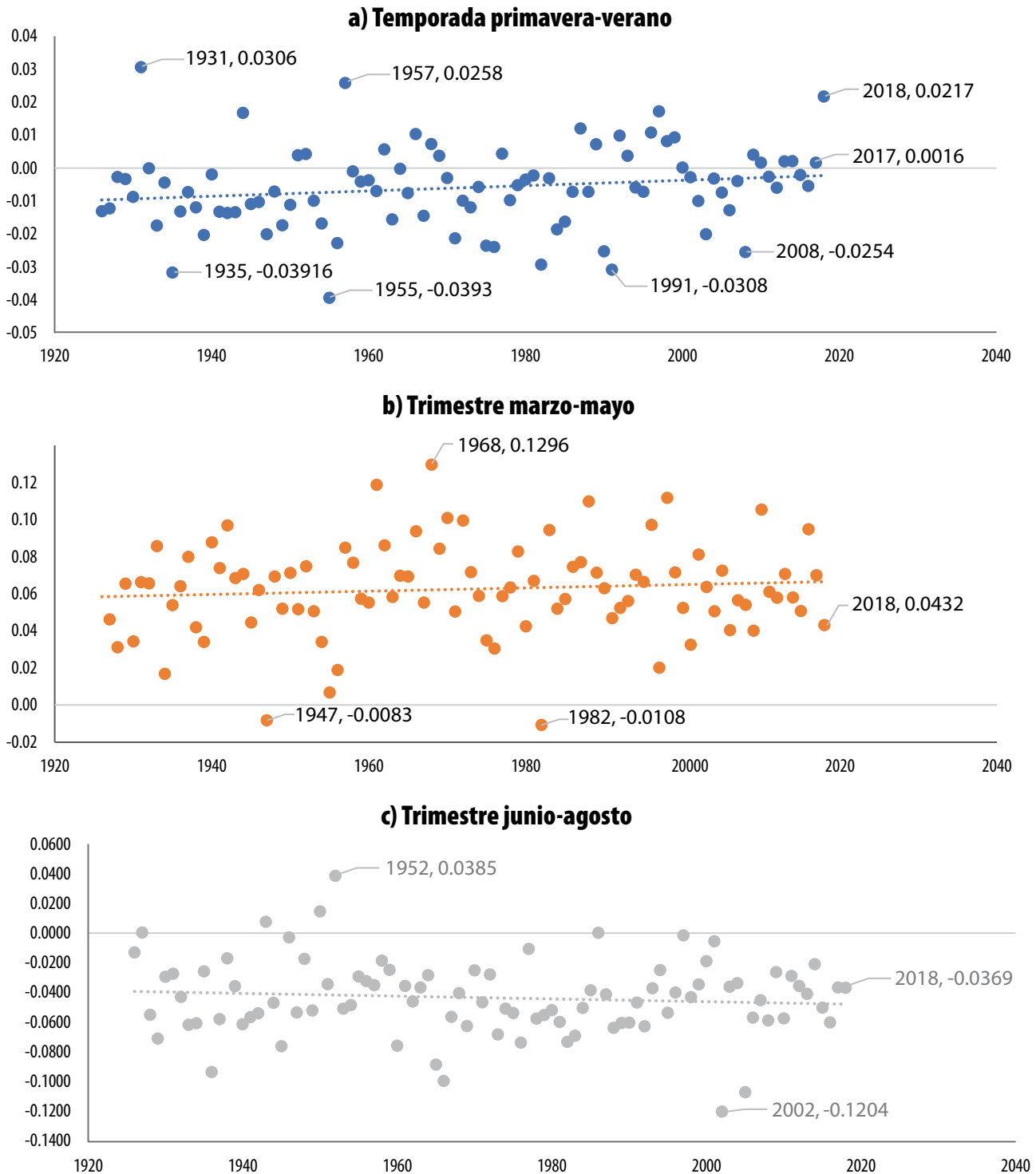


(*P-V*). La *T<sub>max</sub>* promedio histórica en *P-V* fue de 32.81 °C y *O-I* 28.7 °C, mientras que de 1980 al 2018 fueron 33.56 y 29.47 °C, respectivamente, lo que es un incremento de 0.77 °C para ambos se-

mestres, parecido al aumento reportado para Nepal (Prakash, 2011). De forma similar, para *T<sub>min</sub>* promedio históricas, se tienen 6.84, 2.38, 4.79 y 0.77 °C, respectivamente, lo que corresponde

Gráficas A1

### Cambios por año de la temperatura diaria máxima



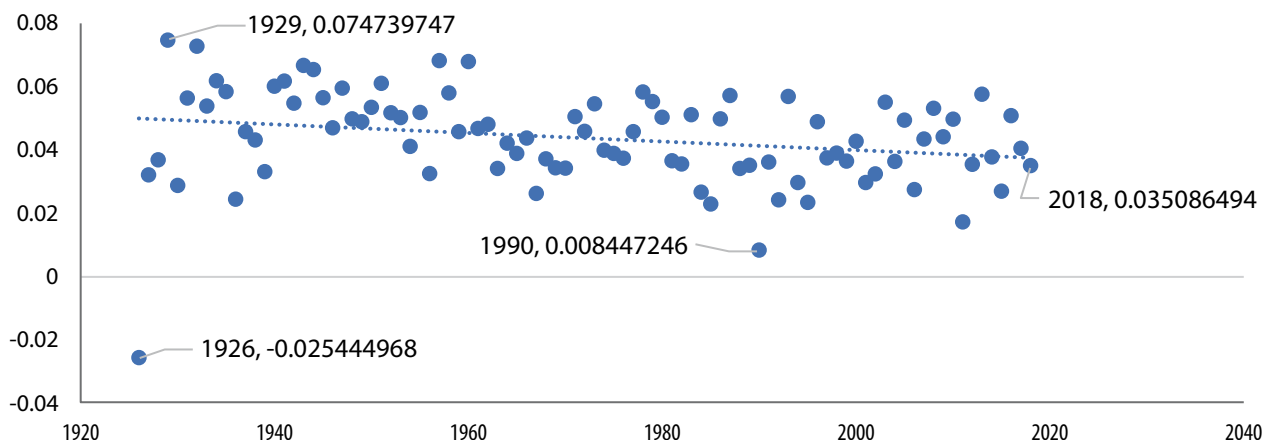
a un decremento de 2.05 °C en *P-V* y 1.61 °C en *O-I*. De las gráficas A3a, A3b y A3c, *Tmin* cambió -0.0306 % (*m-m*), 0.0127 % (*j-a*) y -0.0135 % (*P-V*).

De 1980 al 2018, los cambios fueron -0.0386 % (*m-m*), -0.0047 % (*j-a*) y 0.0089 % (*P-V*).

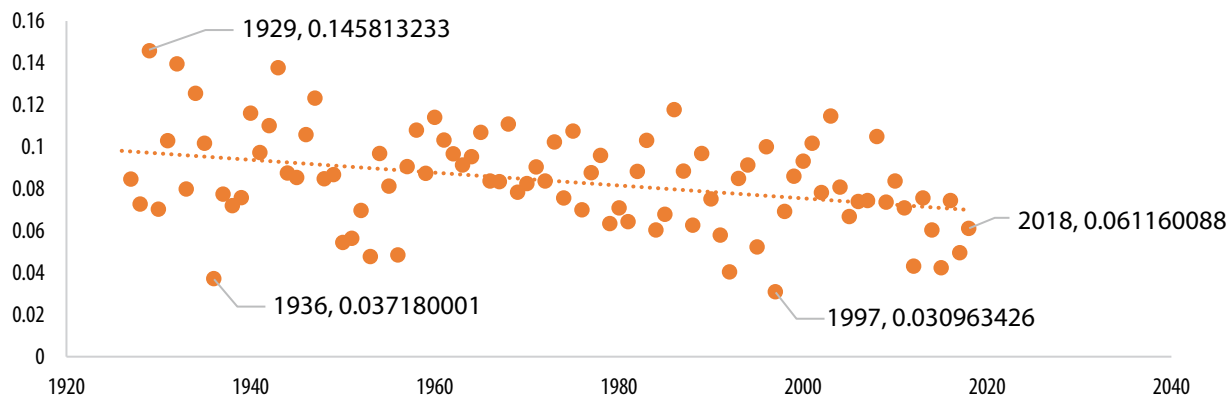
Gráficas A2

**Cambios por año de la temperatura diaria mínima**

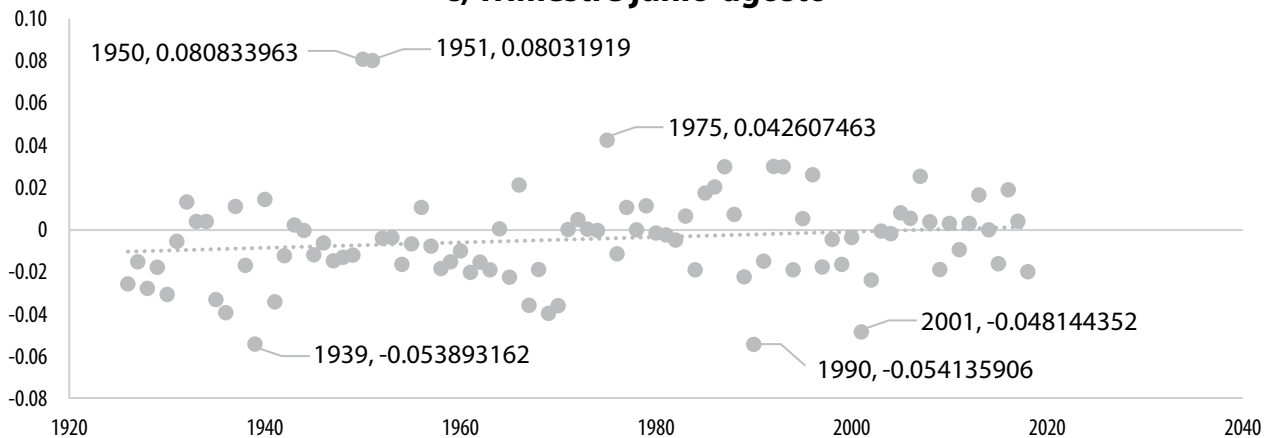
**a) Temporada primavera-verano**



**b) Trimestre marzo-mayo**



**c) Trimestre junio-agosto**



### A.1.1.2. Precipitación

En el caso de la  $P_{max}$ , la tendencia fue claramente positiva en  $P-V$  (ver gráfica A3a). Al hacer el análisis por trimestres (gráficas A3b y A3c), se observó que en  $m-m$  las pendientes anuales son más dispersas alrededor de la tendencia histórica teniendo años extremos en el 2015 (-0.069) y el 2000 (0.265); de 1927 a 1979, estas se concentran por debajo; al irse incrementando la dispersión indica lo volátil que es esta variable climática en la región; se presentaron pocos años con pendientes negativas, mientras que en  $j-a$  fueron más abundantes. Los años con tendencias negativas fueron pocos

en los últimos 40, aunque los que están por abajo de la línea de tendencia histórica son mayoría para todo el rango.

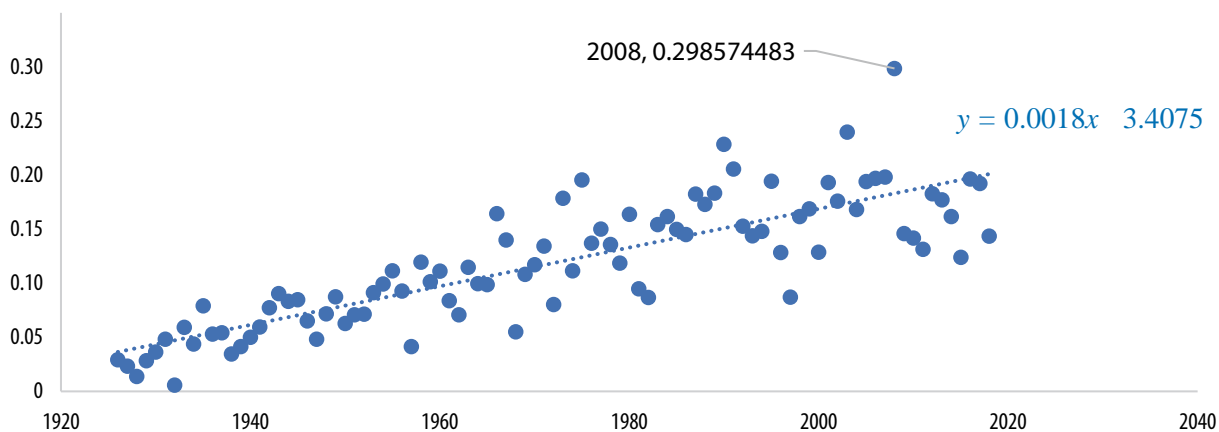
En el caso de  $j-a$ , también aumentó la dispersión, casos extremos ocurrieron en 1986 (-0.26), 2007 (-0.22), 2015 (-0.21), 1980 (0.31), 1989 (0.30), 2005 (0.34), 2006 (0.32) y 2008 (0.33). Se observó que estos se presentaron en los últimos 40 años.  $P_{max}$  cambió 0.0723 % ( $m-m$ ), 0.0697 % ( $j-a$ ) y 0.182 % ( $P-V$ ). De 1980 al 2018, los cambios fueron -0.0067 % ( $m-m$ ), -0.0544 % ( $j-a$ ) y 0.0825 % ( $P-V$ ), lo que es un cambio drástico en la tendencia de la variable

Gráficas A3

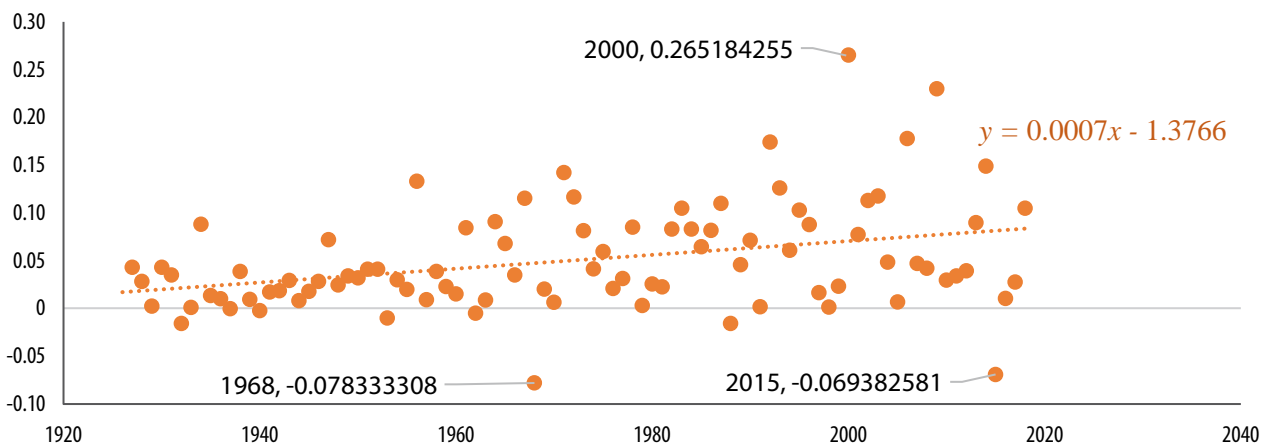
Continúa

## Cambios por año de la precipitación máxima diaria

### a) Temporada primavera-verano

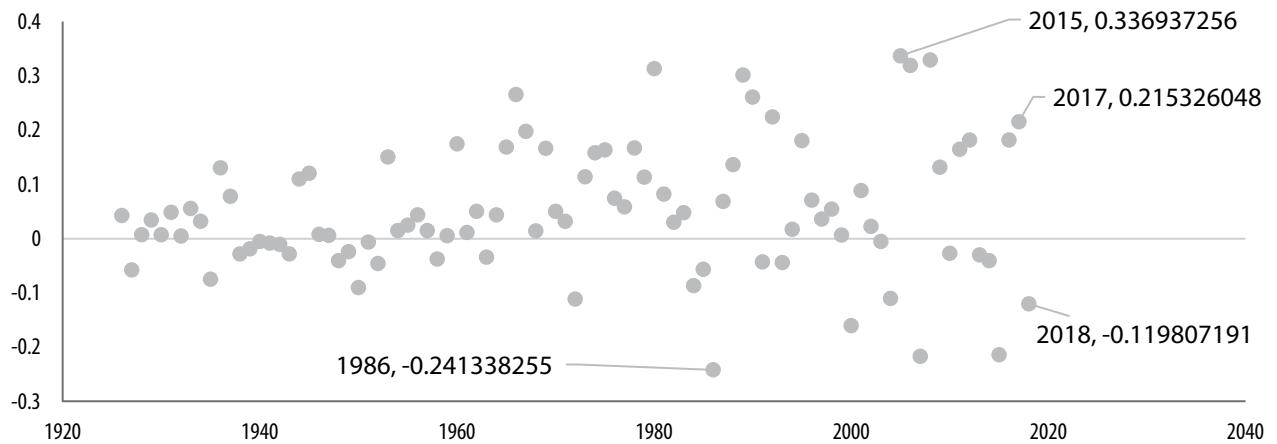


### b) Trimestre marzo-mayo



## Cambios por año de la precipitación máxima diaria

## c) Trimestre junio-agosto



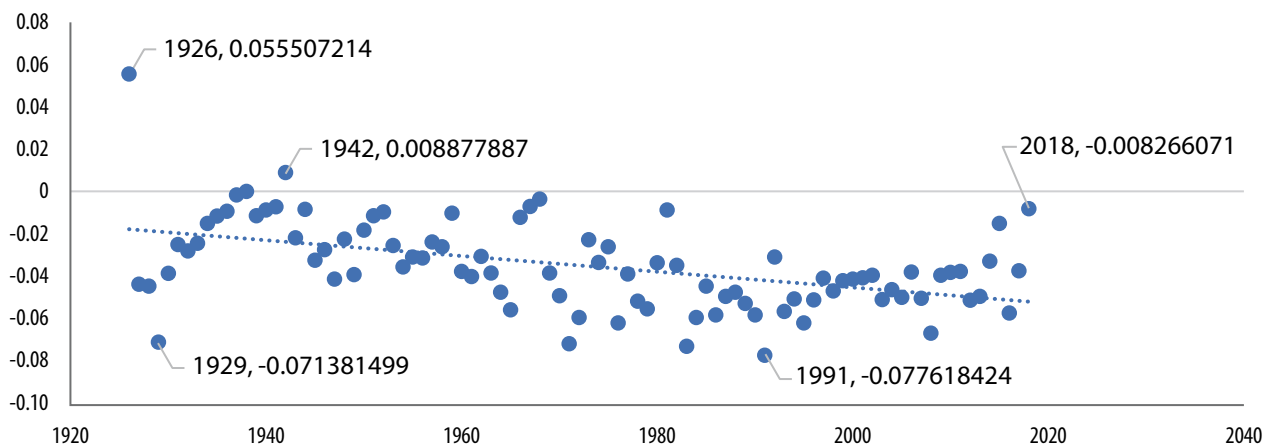
climática en ambos trimestres. Siguiendo las gráficas A4a y A4b, se observó que históricamente ha llovido más veces (80.33 %) y más intenso (24.786 %). De 1980 al 2018, estos porcentajes cambiaron drásticamente, 33.36 y 16.05 %, respectivamente. Esto es un cambio importante en el comportamiento de esta variable climática, pues la percepción de la gente de que ha estado lloviendo menos en la región es cierta.

## A.1.1.3. Rangos diarios de temperatura

Otra de las variables que influyen en los rendimientos de los cultivos es el rango diario de temperatura ( $\Delta T^d$ ). De las gráficas A4, se observó que la tendencia histórica de los rangos máximos ( $\Delta T_{max}^d$ ) fue negativa con pendientes anuales mayormente negativas que oscilan en vez de dispersarse alrededor de esta. De las gráficas A4b y A4c,  $\Delta T_{max}^d$  cambió en 0.031 % (*m-m*), -0.089 % (*j-a*) y -0.037 % (*P-V*),

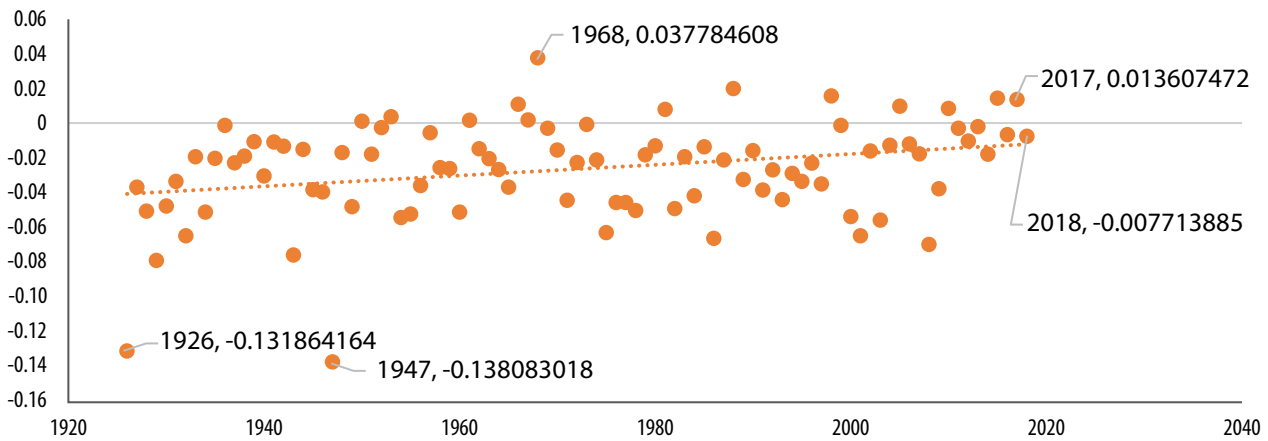
## Cambios por año del rango diario máximo de temperatura

## a) Temporada primavera-verano

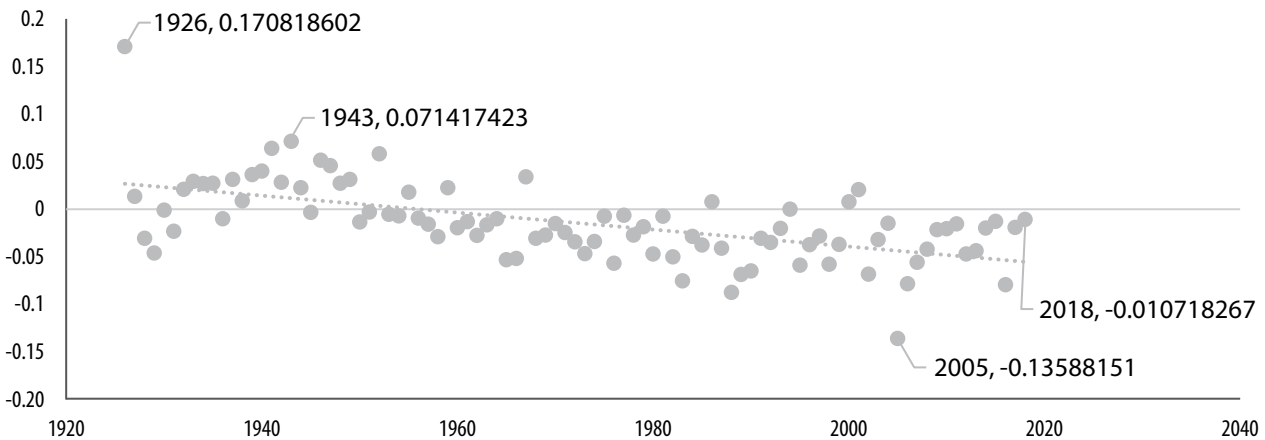


## Cambios por año del rango diario máximo de temperatura

## b) Trimestre marzo-mayo



## c) Trimestre junio-agosto



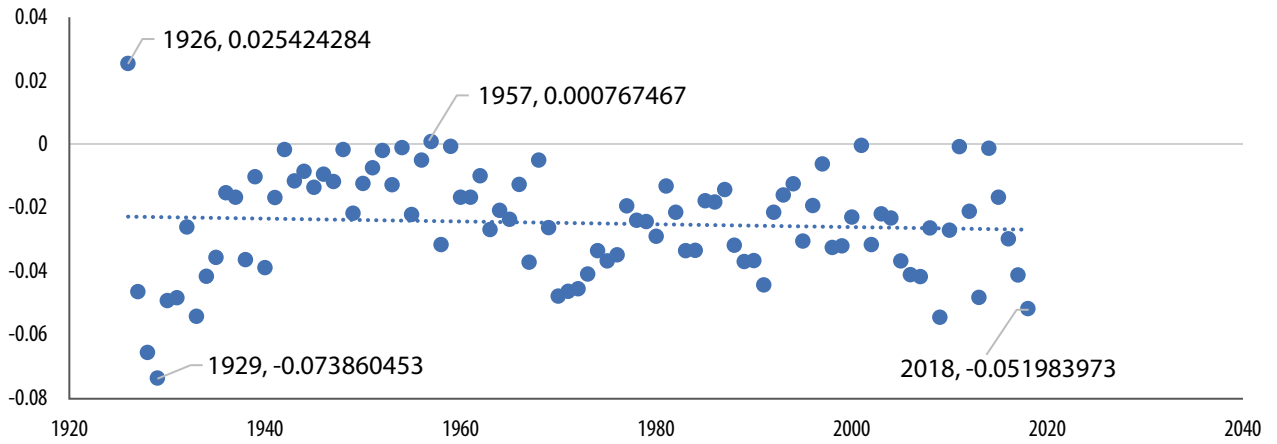
De 1980 al 2018, los  $\Delta T_{max}^d$  fueron 0.056 % (*m-m*), 0.019 % (*j-a*) y 0.031 % (*P-V*), respectivamente. En los últimos 40 años ha habido un cambio de signo en la tendencia de las pendientes correspondientes al segundo trimestre. De manera análoga, para los cambios en los rangos mínimos diarios de temperaturas ( $\Delta T_{min}^d$ ), de la gráfica A5a se encontró un comportamiento oscilatorio alrededor de la tendencia negativa más frecuente en los últimos años. En 1926 y 1929 ocurrieron los cambios más bruscos tanto positivos como negativos, en ese mismo orden: el primero en *j-a* y el segundo en *m-m*. En general, la tendencia en las pendientes anuales por

trimestres es positiva de *m-m* y negativas para *j-a* (ver gráficas A5b y A5c).  $\Delta T_{min}^d$  cambió en 0.034 % (*m-m*), -0.033 % (*j-a*) y -0.0044 % (*P-V*). De 1980 al 2018, fue 0.011 % (*m-m*), 0.042 % (*j-a*) y -0.019 %, respectivamente.

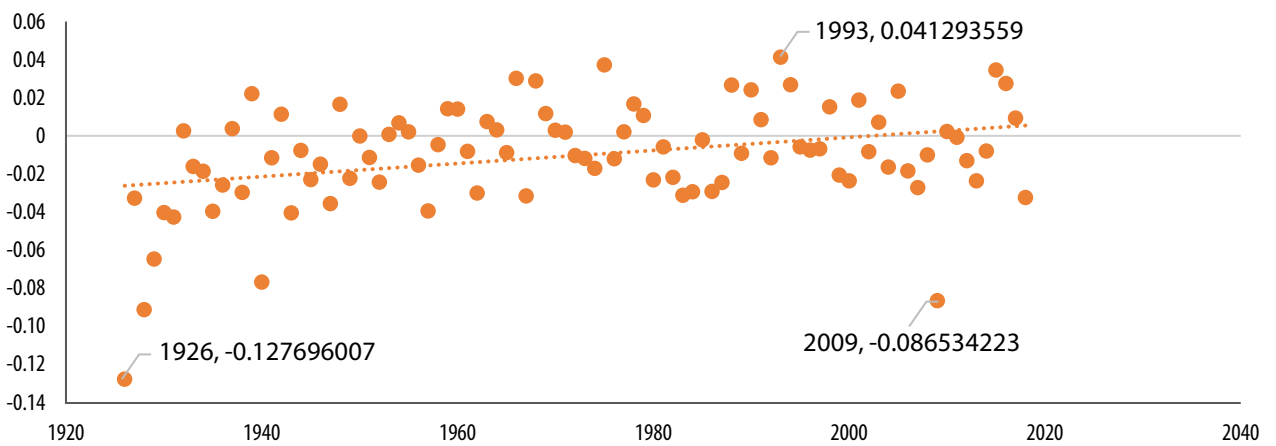
Nótese que en los últimos 40 años ha habido un cambio de signo en la tendencia de las pendientes correspondientes al segundo trimestre y una desaceleración en los cambios de los rangos de la temporada. Por lo tanto, los cambios en los  $\Delta T_{min}^d$  han ido desacelerándose en el segundo trimestre, caso contrario al del primer trimestre.

### Cambios por año del rango diario mínimo de temperatura

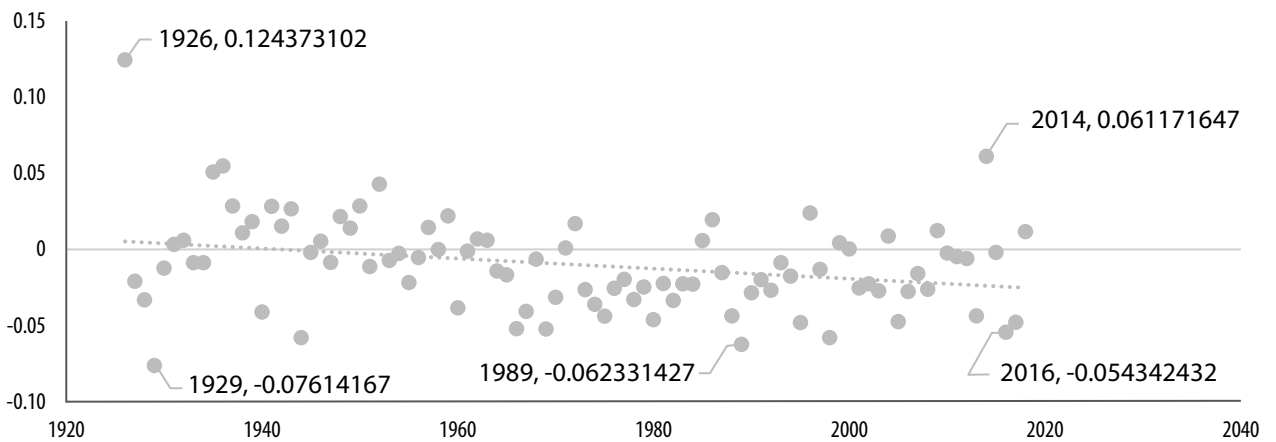
#### a) Temporada primavera-verano



#### b) Trimestre marzo-mayo



#### c) Trimestre junio-agosto



### A.1.2. Análisis espectral

Si se analizan a nivel local las temperaturas promedio diarias y promedios por periodo, se pierde la evidencia al *aplanar* la curva (ver gráfica A6a). Es por esta razón que se estudia el comportamiento de las temperaturas y precipitaciones máximas, mínimas, promedio y rangos diarios ajustando formas polinomiales o senoidales y, posteriormente, analizando los picos, su altura, ancho, frecuencia y periodo.

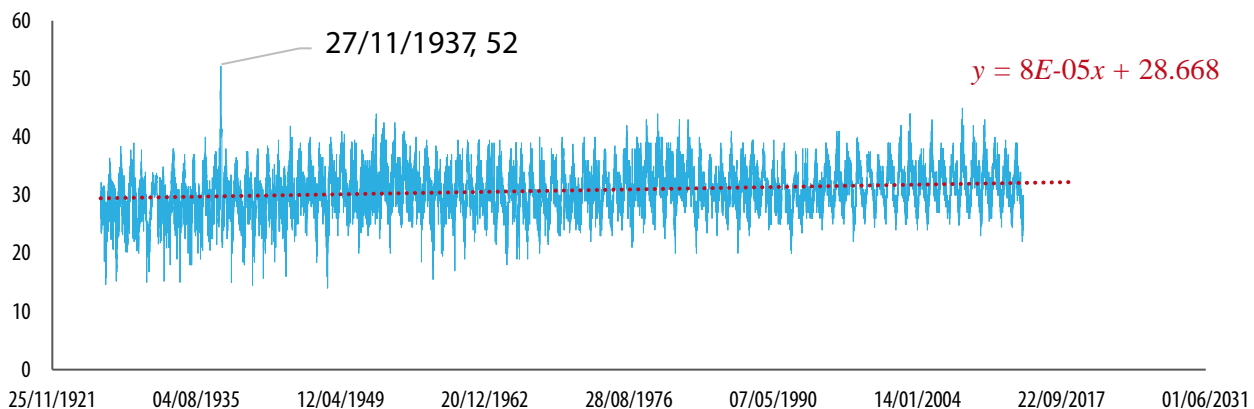
En un primer análisis se detectaron cambios en la  $T_{max}$  en el semiciclo de calentamiento global 1976-2007 con un acortamiento y ajuste 1976-1984-1994-2007 (calentamiento-enfriamiento-calentamiento),

como se puede ver en la gráfica A6b. Este evento parece ser consecuencia del accidente nuclear en Ciudad Juárez, Chih., y las corrientes jet en 1984 (SE, 1985). Esto es similar a lo ocurrido a nivel global en el semiciclo 1945-1976 con el desarrollo de pruebas nucleares y la consecuente liberación en grandes cantidades de  $CO_2$  (Kleiner K., 2008; Langenbrunner, 2020; Whitbread, 2008, entre otros.).

$T_{max}$  mostró un comportamiento senoidal (ver gráfica A6a). Como ya se mencionó, se decidió separar la información por temporadas para que coincidieran con los datos de cultivos: siembra, siniestro, cosecha, rendimiento, volumen de producción, etc. (SAGARPA, 2012).

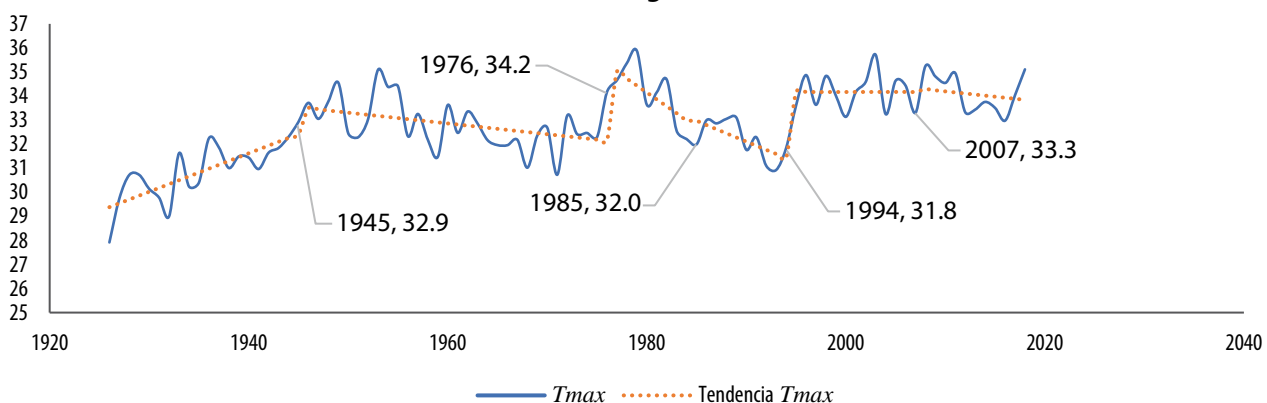
Gráfica A6a

#### Temperaturas máximas diarias (°C) de 1927-2018 del estado de Aguascalientes

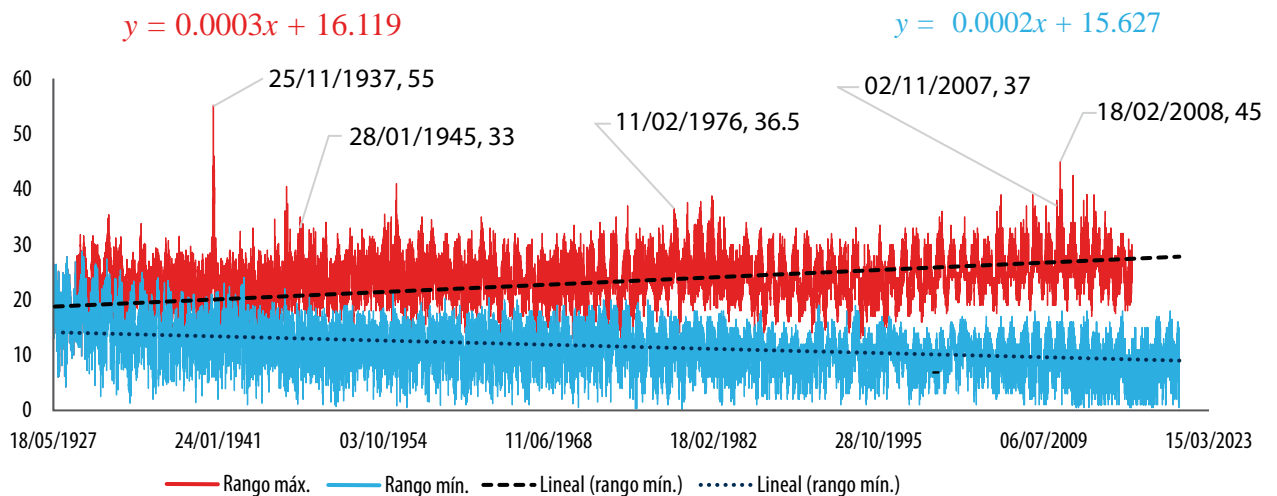


Gráfica A6b

#### Temperaturas máximas diarias (°C) donde en el semiciclo de calentamiento global 1976-2007 con un acortamiento y reajuste 1976-1984-1994-2007 (calentamiento-enfriamiento-calentamiento) en el estado de Aguascalientes



## Rangos diarios de temperatura (°C) de 1927-2018 del estado de Aguascalientes



De las gráficas A7, el  $\Delta T_{max}^d$  presenta una tendencia creciente, mientras que los  $\Delta T_{min}^d$  fueron decrecientes. El máximo rango histórico ocurrió el 25 de noviembre de 1937 registrando una diferencia de temperatura de 55 °C en el municipio de Pabellón de Arteaga, mientras que el mínimo (0.2 °C) ocurrió el 2 de octubre de 1976 en el de Jesús María (SMNM 2020). El  $\Delta T^d$  está directamente relacionado con la evapotranspiración ( $ET$ ) de los cultivos y de ella depende la medida del estrés hídrico ( $EH$ ) de la planta (disponibilidad de agua por debajo de los 1 700 m<sup>3</sup>/hab./año, SEMARNAT, 2003). La productividad del agua ( $m$ ) está relacionada con las  $ET$ . Es un indicador que expresa cómo se obtiene un kilogramo de materia seca aplicando un metro cúbico de agua (Montemayor *et al.*, 2015) o unidades equivalentes (Howell *et al.*, 1998; Margat, 1996).

La gráfica A8 muestra el comportamiento histórico de las precipitaciones máximas. Exhiben una ligera tendencia positiva. Profundizando el análisis de esta variable, se observó un corrimiento hacia inicios de marzo para el comienzo de la temporada de lluvias  $P$ - $V$ , tendencia lineal histórica negativa (línea azul), como se puede observar en la gráfica

A9. Además, los ciclos calentamiento-enfriamiento se detectan en la intensidad de las lluvias (ver gráfica A11). La línea roja marca estos ciclos observando el cambio de pendiente de 2007 al 2018 correspondiente al semiciclo de enfriamiento (ver gráficas A9 y A10). De la A10 se observa la disminución en los últimos años de la intensidad en el semiciclo de enfriamiento. En la A11 se muestra el número de picos detectados de  $P$  por temporada  $P$ - $V$ . Como se observa, la frecuencia cayó en los últimos años. Entre 1976 y el 2007 hubo un incremento mayor del que se presentó en el semiciclo de enfriamiento 1945-1976. La mayor contribución corresponde históricamente a los picos intermedios 6 al 10, y en el subciclo de calentamiento 1976-2007 se incrementaron las  $P$  respecto a los subciclos de enfriamiento (ver gráfica A12).

Respecto al ajuste mencionado del semiciclo 1976-2007, se observó un aumento de picos (frecuencia) de  $P$  entre 1984-1994, retomando la tendencia natural de 1994 a 2007. Este fenómeno se observa también de 1945 a 1967, donde se detonaron bombas nucleares. Además, en el semiciclo de enfriamiento, los efectos son menos notorios que en el de calentamiento (ver gráficas A10, A11

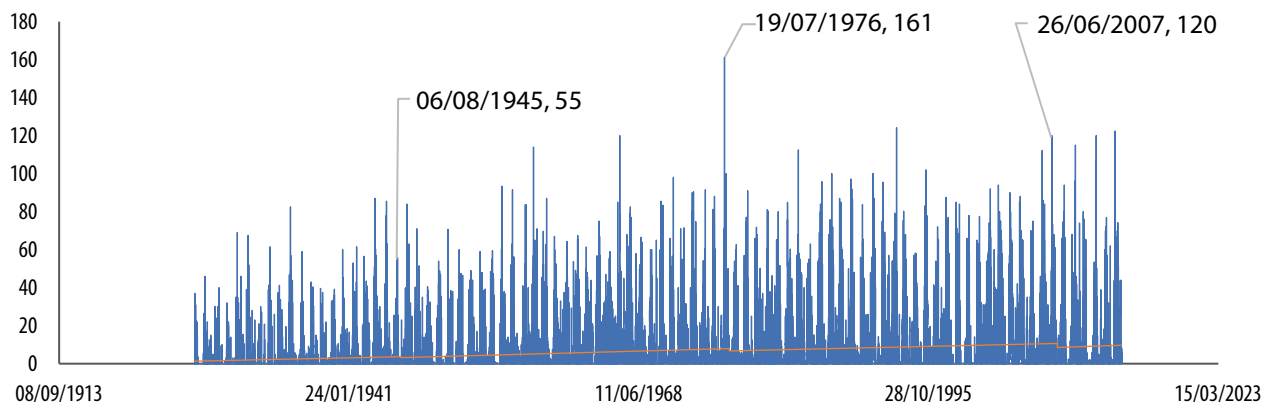


y A12). Por ello, esta intervención nuclear en el ciclo natural de calentamiento-enfriamiento global afecta a nivel regional. Los procesos nucleares causaron cambios tanto en los ciclos térmicos como en los del agua y, por lo tanto, del carbono.

Para esta investigación, se utilizaron los principios de las técnicas de análisis espectroscópico, que pueden ser consultadas en libros de texto del tema y los *softwares* OriginLab y FullProf (OriginLab, 2008; FullProf Suite, 2020).

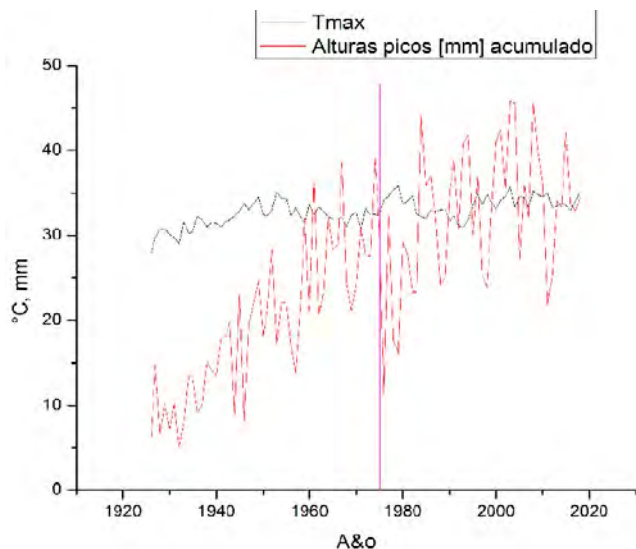
Gráfica A8

### Precipitaciones máximas diarias (mm) de 1927-2018 del estado de Aguascalientes



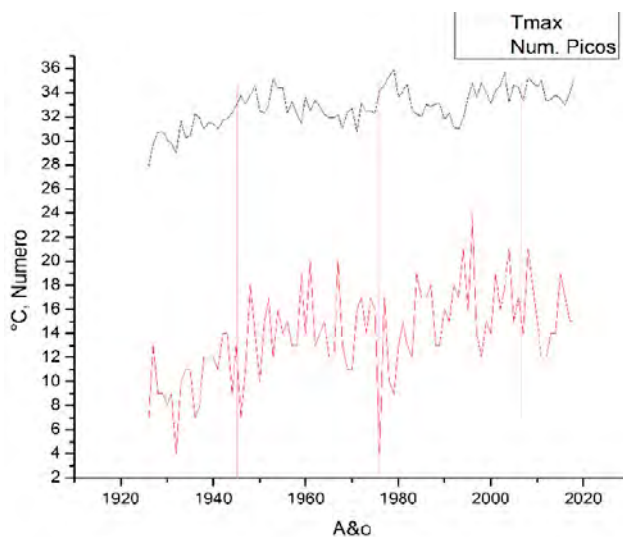
Gráfica A9

### Intensidad de lluvias durante la temporada primavera-verano de 1926-2018



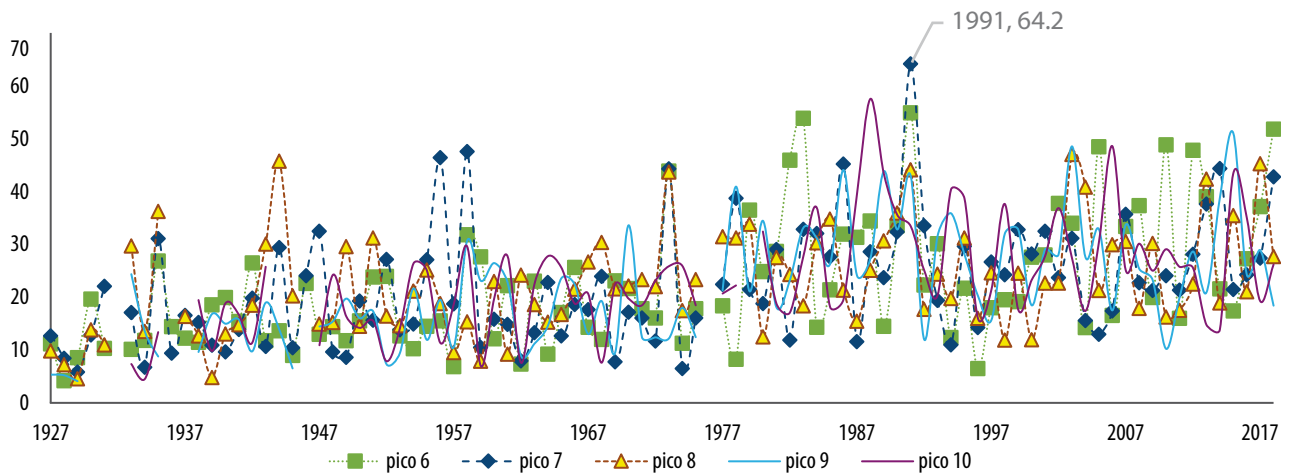
Gráfica A10

### Número de picos detectados de precipitaciones por temporada primavera-verano



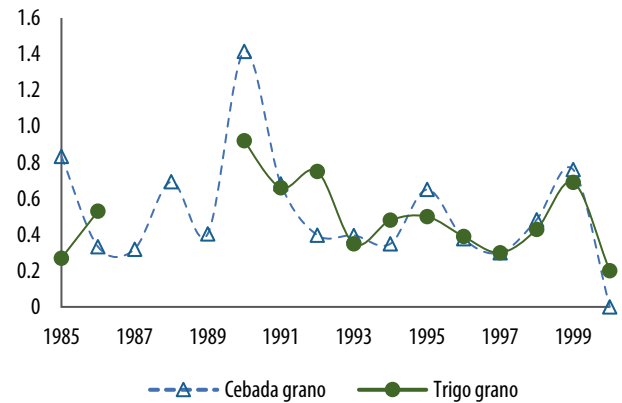
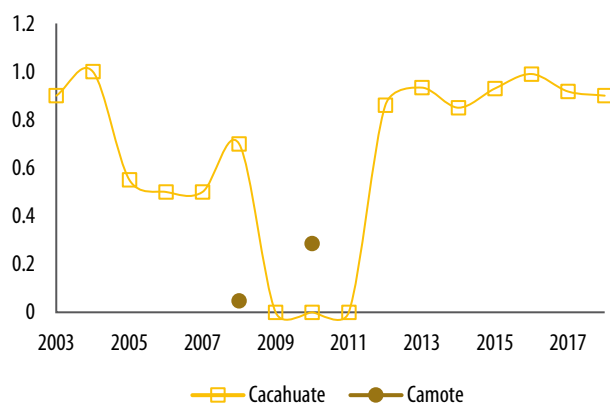
Gráfica A11

### Altura histórica de los picos 6 al 10 de precipitaciones (mm)



Gráficas A12

### Rendimientos de cacahuete, camote, cebada y trigo grano en el estado de Aguascalientes 1980-2018



#### A.2. Estrés hídrico

Recordando:

$K_y > 1$ : la respuesta del cultivo es muy sensible al déficit hídrico.

$K_y < 1$ : el cultivo es más tolerante al déficit hídrico y se recupera parcialmente del estrés.

$K_y = 1$ : la reducción del rendimiento es directamente proporcional al uso reducido de agua (ver cuadro 1A).

De la sección A.3:

- *Trigo grano*: no se cultivó de 1992-1998. Muestra gran sensibilidad a la disposición de agua de 1998-1999. Se dejó de producir en el 2001.
- *Cebada grano*: a partir del 2001 ya no se cultivó de temporal P-V. En el 2000 se siniestró 100 por ciento. Del 2002 al 2004 se probó con cebada forrajera. Se dejó de sembrar a partir del 2005. De julio-agosto del 2009 al 2011 se presentó precipitación escasa comparada con los otros años, esto significa desequilibrio en la ET.

Cuadro 1A

 **$K_y$  factor de respuesta de rendimiento del cultivo bajo estrés hídrico**

Año	Cacahuate	Camote	Año	Trigo grano	Cebada grano
2003	s/e		1985		1.08
2004	s/e		1986	1.73	1.21
2005	s/e		1987		2.21
2006	s/e		1988		0.02
2007	s/e		1989		0.33
2008	s/e	s/e	1990	0.20	0.23
2009	0		1991	0.88	0.31
2010	0	s/e	1992		s/e
2011	0		1993		s/e
2012	s/e		1994		s/e
2013	s/e		1995		s/e
2014	s/e		1996		s/e
2015	s/e		1997		0.12
2016	s/e		1998	1.21	s/e
2017	s/e		1999	2.33	1.90
2018	s/e		2000		0
2019 medido	s/e	N/A	2001	0.04	
2019 <sup>†</sup> modelado	s/e	s/e	2019 <sup>†</sup> modelado	0.96 ± 0.13	s/e
2030 <sup>†</sup>	s/e óptimo 0 catastrófico	s/e óptimo 0 catastrófico	2030 <sup>†</sup>	1.45 óptimo 2.16 catastrófico	0.61 óptimo 2.67 catastrófico

<sup>†</sup> Aplicando modelo con ecuaciones de la sección A.4.

**Nota:** s/e sin estrés hídrico y N/A no aplica.

**A.3. Uso del agua y productividad**

Se calcularon  $m$  y  $b$  para otros cultivos (ver cuadro 2A). El camote es de temporada otoño-invierno,

por eso se dejó de cultivar. La cebada grano se produce en mejores condiciones en temporada otoño-invierno con riego, al igual que el trigo grano.

Cuadro 2A

**Productividad del agua ( $m$ ) y evaporación media del suelo ( $b$ ) con supuesto estrés hídrico**

Parámetros con EH	Cacahuate*	Camote*	Cebada grano	Trigo grano
$m$ (kg/ha/mm)	6.748	9.706	3.924	9.822 (10-22 <sup>9</sup> )
$b$ (mm)	4 865.36	7 546.65	3 300.13	3 480.27 (200-500 <sup>9</sup> )
$Y$ (kg/ha)	658.155 (500-1 500 <sup>9</sup> )	166.667 (8 000-17 500 <sup>9</sup> )	524.643 (1 000-2 400 <sup>9</sup> )	491.875 (1 000-3 000 <sup>9</sup> )

\* Comparando con otros lugares no presenta EH. Se calcula con base en los rendimientos reportados.

La <sup>9</sup> denota el valor promedio mundial de la temporada y clima árido-semiárido.

#### A.4. Modelos complementarios para cuatro cultivos

Sean:

$Y_{cultivo}(t)$  es el rendimiento del cultivo.

$\Delta Y_{cultivo}(t)$ , la diferencia entre periodos del rendimiento del cultivo.

$T_{min}(t)$ , la temperatura mínima.

$T_{max}(t)$ , la temperatura máxima.

$\Delta T_{min}^d$ , el rango de temperatura mínima diaria.

$\Delta T_{max}^d$ , el rango de temperatura máxima diaria.

$P_{min}(t)$ , la precipitación mínima.

$P_{max}(t)$ , la precipitación máxima.

$\bar{P}(t)$ , la precipitación promedio.

$CO_2(t)$  son las emisiones de dióxido de carbono.

$Factores(t)$  son mecanismos de apoyo para mejorar el rendimiento del cultivo.

$$Y_{cacahuete}(t) = 0.320\bar{P}(t) - 0.006Altitud(t) + 0.53Latitud(t) \quad (A1)$$

(0.0668)      (0.0041)      (0.0033) ...

$$Y_{cacahuete}(t) = 0.0217P_{max}(t) + 0.0923Factores(t) \quad (A2)$$

(0.0069)      (0.0025) ...

$$\Delta Y_{camote}(t) = -1.11\Delta T_{min}^d(t) + 2.75\bar{P}(t) - 0.009Altitud(t) + 1.89Factores(t) \quad (A3)$$

(0.0077)      (0.0298)      (0.0003)      (0.0003) ...

$$Y_{camote}(t) = 3.99\Delta T_{max}^d(t) + P_{max}(t) - 0.06Altitud(t) \quad (A4)$$

(0.0118)      (0.0190)      (0.0094) ...

$$\Delta Y_{cebada\ grano}(t) = -0.3877T_{max}(t) + 0.7288\bar{P}(t) \quad (A5)$$

(0.0525)      (0.0359) ...

$$Y_{cebada\ grano}(t) = -0.064\Delta T_{min}^d(t) + 0.077P_{max}(t) + 0.003Factores(t) \quad (A6)$$

(0.0393)      (0.0137)      (0.0135) ...

$$Y_{trigo\ grano}(t) = -0.09T_{max}(t) + 0.14Latitud(t) + 0.01Factores(t) \quad (A7)$$

(0.0016)      (0.0012)      (0.0000) ...

En el caso del cacahuete, su óptimo crecimiento depende de su ubicación. De manera directa con la latitud e inversa con la altitud, ecuación (A1). Al utilizar factores de apoyo, solo dependería de la disponibilidad de agua, ecuación (A2).

De manera similar, el cultivo del camote depende inversamente de la altitud donde se encuentre la parcela y de manera directa de la disponibilidad de agua y del rango de temperatura sometida a la planta al día. Al introducir factores de apoyo, disminuye de forma drástica el efecto de dichas variables, aunque la dependencia con el agua aumenta más del doble. Por eso, este cultivo pasó a ser de riego (Lardizábal, 2003), ecuaciones (A3) y (A4).

De (A5) y (A6), la cebada grano también depende, sobre todo, del suministro de agua y de la variación diaria de temperatura establecida por la temperatura máxima. El impacto de estas dos condiciones es disminuido drásticamente con el uso de los *factores* de apoyo en un orden de magnitud. La temperatura tiene un efecto inverso sobre la planta, mientras que la precipitación siempre es directa y positiva.

De la ecuación (A7), el trigo grano dependió de la latitud y de los *factores* de manera directa e inversamente de  $T_{max}$ . El trigo tipo Sonora es una

especie fuerte y adaptable a diversos climas (Abrol *et al.*, 1996). Caso contrario es el trigo de sudamérica, donde depende de las precipitaciones de la temporada (Natali *et al.*, 2007). El triticale se introdujo en la Comarca Lagunera en vez de la cebada y el trigo forrajeros porque es más resistente y adaptable (SIAP, 2019). Como todos, dependieron directamente de  $P$  y *factores*. El cacahuate no presentó siniestro por *EH*.

## Casos de éxito y fracaso

La *ET* acumulada ( $ET^{ac}$ ) total de los cultivos de trigo generalmente varía de 200 a 500 mm, aunque puede ser menor en áreas semiáridas no irrigadas y alcanzar 600-800 mm bajo riego intenso.

En el caso de Aguascalientes, la última siembra de trigo grano fue en el 2001 con un valor de *ET* de 114.73 mm con una  $K_y$  de 1.54 que está por arriba de los valores de la FAO (1.15) y de la IAEA (1.32); para el periodo 1980-2001, la productividad del agua en términos de transpiración fue de 0.1018 kg/ha/mm (0.01018 kg/m<sup>3</sup>) con  $K_y$  promedio de 1.101923914, por lo que el *EH* iba en aumento; la FAO (1990) reportó la eficiencia máxima del trigo grano en ~2.2 kg/m<sup>3</sup>; esta puede ser la razón por la que se dejó de sembrar en la entidad. En contraste, del 2003 al 2018, el cacahuate fue el único que no presentó *EH* con  $ET^{ac}$  entre 181 y 445 mm, y productividad de 6.748 kg/ha/mm; la evaporación acumulativa del suelo es de 1.48 milímetros.

El cacahuate, para mejorar su rendimiento, cambió a la modalidad de riego y de lugar de siembra (SAGARPA, 2020a). De campesinos experimentados se averiguó que la planta depende de la inclinación del suelo, 0-5° a más de 1 000 m s. n. m., y suministro de agua constante, ya que crece bajo la tierra y requiere de humedad todo el tiempo (SAGARPA, 2020b).

En el caso del trigo grano, el rendimiento es muy bajo en comparación al mundial (ver cuadro 2A), por lo que el clima no es el idóneo para su cultivo (Butt *et al.*, 2005); el más apropiado para cultivar-

lo es templado con lluvias entre los 500-800 mm anuales (Steduto 2012).

Se calcularon los indicadores de autosustentación: tasa de crecimiento de la población, 2.2 % (INEGI, 2015) y emisiones de CO<sub>2</sub> de la industria manufacturera, 5.5 % (RETC, 2020; Ledesma-Carrión *et al.*, 2020). En la región, estas últimas fueron estadísticamente no significativas en los modelos prototipos, aunque se integran al sistema mundial contribuyendo al aumento de *T* esperada. Además, tasa de *Y*: cacahuate (3.2 %), camote (0.53 %), cebada grano (0.03 %) y trigo grano (0.01 %). Estas son tasas para cultivos de temporal primavera-verano, por lo que solo el cacahuate contribuiría a las sustentabilidad de la región mientras se sigan dispersando las emisiones de CO<sub>2</sub> fácilmente.

## Fuentes

- Abrol, Y. P. & K. T. Ingram. "Effects of higher day and night temperatures on growth and yields of some crop plants", en: Bazzaz F. y W. Sombroek (Eds.). *Book Global climate change and agricultural production: direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes*. Wiley, West Sussex, 1996, pp.123-140.
- Butt, T. A., B. A. McCarl, J. Angerer, P. T. Dyke y J. W. Stuth. "The economic and food security implications of climate change in Mali", en: *Climate Change*. Vol. 68. Springer, 2005, pp. 355-378.
- FAO. "Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos"; en: *Estudio FAO riego y drenaje*. 56, 1990, ISSN 0254-5293.
- FullProf Suite. Software libre para análisis espectroscópico y Manual del usuario. 2020 (DE) consultado el 3 de marzo de 2020 en: <https://www.ill.eu/sites/fullprof/>
- García, E. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México, D. F., Instituto de Geografía, UNAM, 1973, p. 217 (DE) consultado el 5 enero de 2020 en: <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/83>
- INEGI. *Cuéntame... de México. Territorio*. 2020 (DE) consultado el 20 de junio del 2020 en: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/ags/territorio/clima.aspx?tema=me&e=01>
- Kleiner, K. "Nuclear energy: assessing the emissions", en: *Nature Reports*. Vol. 2, October, 2008, pp. 130-131.
- Langenbrunner, B. "The pattern effect and climate sensitivity", en: *Nat. Clim. Chang.* 10, 2020, p. 977 (DE) consultado el 30 de octubre de 2020 en: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00946-y>

- Lardizábal, R. *Manual de producción de camote*. Honduras, Centro de Desarrollo de Agronegocios, Fintrac CDA., 2003. Revisiones 2007, 2015 y 2019 (DE) consultado el 12 de junio de 2020 en: <https://es.scribd.com/document/420473271/Manual-de-Produccion-de-Camote>.
- Ledesma-Carrión, D. E., A. Pérez-Hernández & L. Hernández-Hernández. "Status of the emission and transfer of pollutants in a medium-sized region", en: *SN Applied Sciences*. 2:710, 2020 (DE) consultado el 5 de abril de 2020 en: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2437-5>.
- Montemayor, T. J. A., M. A. Segura-Castruita, J. Munguía-López & J. L. Woo-Reza. "Productividad del agua en el cultivo de triticale (*X. Triticosecale* Wittmack) en la Comarca Lagunera de Coahuila, México", en: *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Vol. 6 Núm. 7, 28 de septiembre-11 de noviembre, 2015, pp. 1533-1541.
- Margat, J. "Les ressources en eau: conception, évaluation, cartographie, compatibilité", en: *Manuels & Méthodes*. N° 28. FAO/BRGM. Orleans, France, Editions BRGM, 1996.
- Natali, C. N., F. Pacín y F. Gutiérrez-Boem. "Factores que afectan el rendimiento de trigo en el centro sur de Santa Fé", en: International Plant Nutrition Institute (IPNI). *Informaciones agronómicas del cono sur*, No. 34, 2007, pp 20- 24 (DE) consultado el 6 de julio de 2020 en: <http://mca.ipni.net/>
- OriginLAB. *Software ver. 8.0*. 2020 (DE) consultado el 4 de abril de 2020 en: <https://my.originlab.com/forum/default.asp> y <https://www.originlab.com/fileExchange/details.aspx?fid=524>
- Prakash Niraj. "Effect of Climate Variables on Yield of Major Food-Crops in Nepal: A Time-Series Analysis", en: *Journal of Contemporary India Studies: Space and Society*. Vol. 1, 2011, pp. 19-26 (DE) consultado el 9 de febrero de 2020 en: [https://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/en/list/HU\\_journals/hindas/--/1/item/31425](https://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/en/list/HU_journals/hindas/--/1/item/31425)
- RETC. *Registro de emisiones y transferencia de contaminantes*. 2020 (DE) consultado el 20 de junio 2020 en: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/retc/retc/index.php>
- SAGARPA. "Atlas Agropecuario y Pesquero Información del Sector Agroalimentario 2012"; en: *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP)*. 2012 (DE) consultado el 3 de abril de 2020 en: [www.siap.gob.mx](http://www.siap.gob.mx)
- \_\_\_\_\_. *SIAP*. 2020a (DE) consultado el 7 de febrero de 2020 en: <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/informacion-geoespacial-32571>
- \_\_\_\_\_. *SIAP/Servicios de información agroalimentaria y pesquera*. 2020b (DE) consultado el 8 de febrero de 2020 en: <https://www.gob.mx/siap/documentos/tecnificacion> y [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/92738/Cuadros\\_tabulares\\_2014.compressed.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/92738/Cuadros_tabulares_2014.compressed.pdf)
- Secretaría de Energía (SE). *Accidente por contaminación con cobalto-60 México1984*. Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas, Gobierno de México, 1985 (DE) consultado el 4 de septiembre de 2020 en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/516624/Accidente\\_Co60\\_1984.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/516624/Accidente_Co60_1984.pdf)
- SEMARNAT. *Informe de la situación del medio ambiente en México*. 2003 (DE) consultado el 7 de julio de 2020 en: [http://www.paot.org.mx/centro/insemarnat/informe02/estadisticas\\_2000/informe\\_2000/04\\_Agua/4.4\\_Disponibilidad/index.htm#:~:text=Una%20disponibilidad%20por%20debajo%20de,es%20el%20caso%20de%20M%C3%A9xico](http://www.paot.org.mx/centro/insemarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/04_Agua/4.4_Disponibilidad/index.htm#:~:text=Una%20disponibilidad%20por%20debajo%20de,es%20el%20caso%20de%20M%C3%A9xico)
- SIAP. *Datos cultivos y factores*. 2019 (DE) consultado el 16 de septiembre de 2020 en: <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- Sistema Meteorológico Nacional de México (SMNM). *Datos*. 2020 (DE) consultado el 10 de marzo de 2020 en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Steduto, P., T. C. Hsiao, E. Fereres & D. Raes. "Crop yield response to water", en: *Irrigation and drainage paper 66*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012. ISSN 0254-5284. ISBN 978-92-5-107274-5.
- Whitbread, A. and J., Hancock. "Estimating grain yield with the French and Schultz approaches Vs simulating attainable yield with APSIM on the Eyre Peninsula", en: Unkovich M. J. (ed.). *Global Issues Paddock Action. Proceedings of the 14th Australian Agronomy Conference*. September. Adelaide South Australia, Australian Society of Agronomy ([www.agronomy.org.au](http://www.agronomy.org.au)), 2008 (DE) consultado el 26 de octubre de 2020 en: [https://www.researchgate.net/publication/242249403\\_Estimating\\_grain\\_yield\\_with\\_the\\_French\\_and\\_Schultz\\_approaches\\_Vs\\_simulating\\_attainable\\_yield\\_with\\_APSIM\\_on\\_the\\_Eyre\\_Peninsula/link/55c0353f08aed621de13a861/download](https://www.researchgate.net/publication/242249403_Estimating_grain_yield_with_the_French_and_Schultz_approaches_Vs_simulating_attainable_yield_with_APSIM_on_the_Eyre_Peninsula/link/55c0353f08aed621de13a861/download)