

Influencia de los factores climáticos en la producción de maíz en México

Olga Berenice Benítez López

Resumen

La variación en los patrones climáticos tiene repercusiones en diversos aspectos, la cuestión económica y alimentaria no son la excepción, esto incentiva a estudiar estos fenómenos. El propósito principal de este trabajo es proponer una función de producción para determinar si la temperatura y la precipitación tienen influencia en la producción de maíz en México; producto que es de suma importancia ya que es la base de la alimentación. Este estudio se hizo a través de un análisis de datos panel para el período 2003 – 2018. El modelo que resultó ser el más adecuado fue el modelo de efectos fijos, y en el que la variable dependiente fue el rendimiento de maíz y las variables explicativas la temperatura y precipitación promedio anuales y semestrales; se consideró todo el país y las regiones geoeconómicas, para las que solo se consideraron las variables semestrales; además, se incluyeron la superficie cosechada y el porcentaje de área sembrada en modalidad de riego. Los valores obtenidos son congruentes con los resultados de estudios previos y confirman que el clima es un factor que influye en la producción y rendimiento del maíz; y que, dependiendo la región, debido a las características de cada una de ellas, será la magnitud de su impacto.

Abstract

Variation in weather patterns has serious implications on the production of food around the globe. Such a phenomenon motivates this study, which aims to identify the relationship between weather and maize yields in Mexico. Thus, the main purpose of this work is to estimate a production function to determine whether temperature and/or rainfall has/have influence on maize production in Mexico. Such a crop is the dietary base of Mexicans. This

study was done using a municipality-level panel data for the period 2003-2018. The model that turned out to be the most appropriate was the fixed effects model, in which the dependent variable is maize's yield and the explanatory variables are the annual and biannual mean temperatures and rainfall; we considered the entire country and the geoeconomics regions, for which only the biannual variables were considered; in addition, the harvested area and the percentage of sown in irrigation mode were also included. The estimated values are aligned with the results of previous studies and confirm that climate is a factor that influences maize's yields; and depending on the region, due to the characteristics of each one of them, will be the magnitude of its impact.

1. Introducción

El maíz es un cultivo de gran importancia cultural y económica para los mexicanos. En México existen 59 variedades de maíz nativas (O'Leary, 2016). Además, es una materia prima muy versátil por lo que tiene diversas aplicaciones no solo en gastronomía, sino que también es usado para elaborar productos derivados como harina, almidón y jarabes, así como para la obtención de combustibles y figuras de ornato.

Las condiciones para un crecimiento idóneo del maíz son temperaturas entre 18 y 24 °C, precipitación media anual de 700 a 1300 mm y suelos del tipo franco-limosos, franco-arcillosos y los franco-limosos-arcillosos (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2017). Aumentos excesivos en la temperatura, llegando a sequías ocasionan la muerte de la planta y la disminución de la producción; esto debido a que en el período vegetativo el número de hojas se ve reducido y por tanto la luz que capta la planta es menor (Lafitte, 1994).

El efecto invernadero que se da de manera natural en la atmósfera ha sido y está siendo potenciado por la actividad humana, ocasionando graves problemas al ambiente y por consiguiente a la humanidad. El más grave problema es lo que se ha llamado cambio

climático. Si bien es cierto que esto tiene que ver principalmente con modificaciones en los patrones del clima, es innegable que se han observado más consecuencias y daños derivados de dichos cambios.

Las alteraciones en el clima se observan en el aumento en la temperatura de la superficie terrestre, los patrones en la precipitación e incluso en la duración de las estaciones del año. En lo que respecta al incremento en la temperatura, ocasionado por la acumulación de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, se estima que desde 1860 a 2001 ha sido de dos tercios de grado Celsius (Baird, 2001).

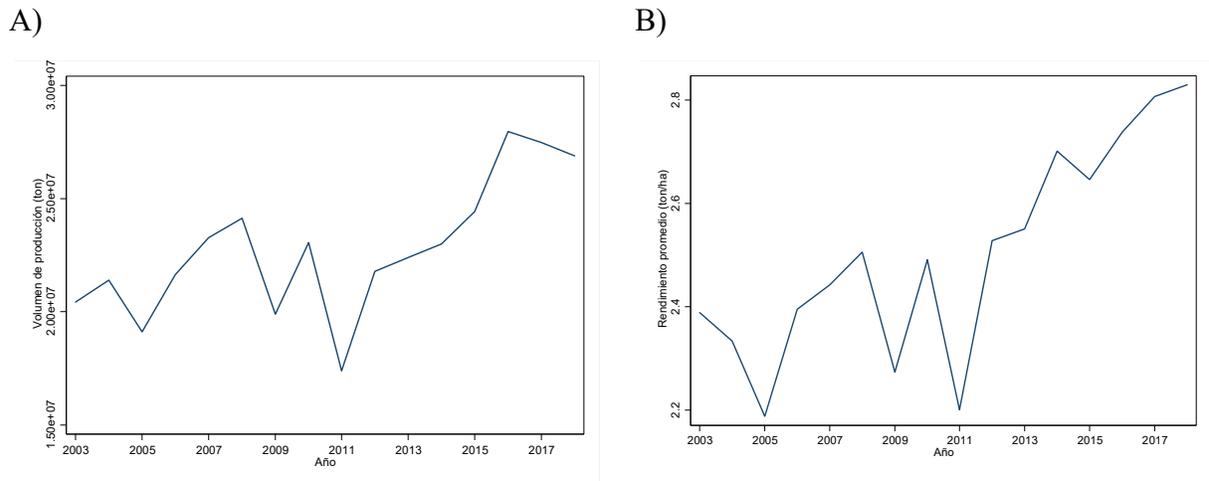
En décadas pasadas era posible distinguir cuando se pasaba de una estación a otra, sin embargo, actualmente esto ya no es tan obvio; hay lugares en los que se llegan a presentar las cuatro estaciones de año en un día, debido a cambios en los patrones climáticos. La variación en el clima ha sido benéfica para algunos lugares mientras que en otros ha sido catastrófica; lo mismo sucede si se compara entre personas de distinto nivel socioeconómico o en diversos aspectos.

Una necesidad fundamental del ser humano que más corre riesgo debido al cambio climático es la alimentación, puesto que dependiendo el lugar aumentos en la temperatura y la precipitación favorecerán el crecimiento de ciertos alimentos; por el contrario, habrá lugares en donde los cultivos se vean dañados a causa de ello. Todo esto también depende del fruto de que se trate, así como del tipo de suelo ya que cada especie vegetal requiere de ciertas condiciones para su óptimo crecimiento.

Como se observa en la figura 1, la producción total de maíz en México ha ido en aumento en los últimos años, así como el rendimiento promedio de maíz. Por lo antes mencionado, es que el objetivo de este trabajo es desarrollar una función de producción que permita establecer la relación que guarda el rendimiento de maíz en México con la temperatura media, la precipitación media, la superficie cosechada y con la superficie de riego

sembrada. Adicionalmente, analizar cómo impacta el cambio climático en la producción de este cultivo.

Figura 1. Producción de maíz en México de 2003 a 2018. A) Volumen de producción total en ton, B) Rendimiento promedio en ton por hectárea (SIAP, s.f.)

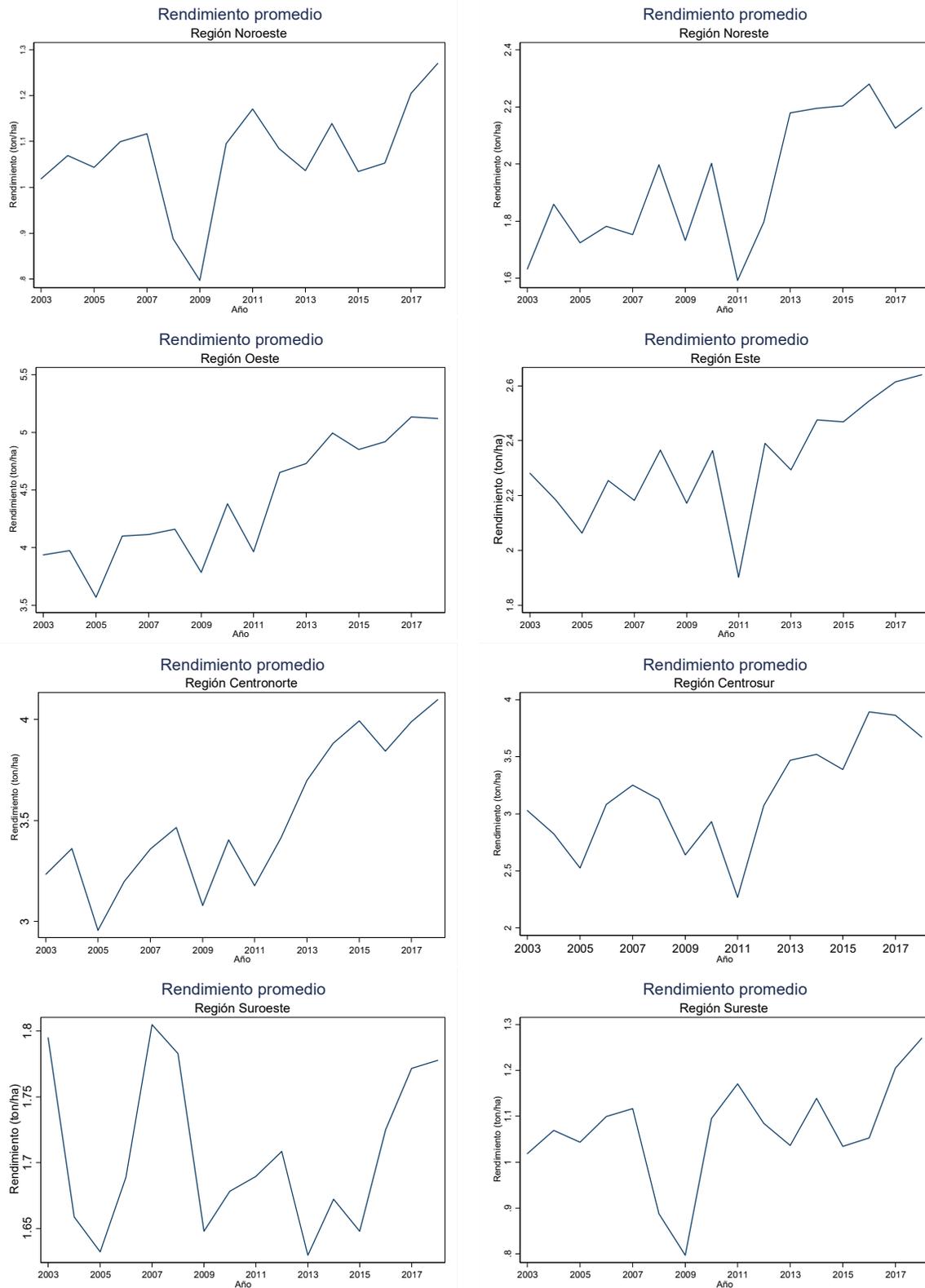


Para un mejor análisis se consideró la división regional del país que, de acuerdo con sus características físicas, naturales, culturales, económicas, etc. las regiones geoeconómicas son las que se indican en la figura 2 (Rodríguez, 2017; Ramírez & Aceves, 2020; CONEVYT, s.f.). Y en la figura 3, se muestra la variación del rendimiento de maíz por región, el cual es distinto en cada una de ellas, de ahí la utilidad del análisis regional.

Figura 2. Regiones geoeconómicas de México (Rodríguez, 2017)



Figura 3. Rendimiento histórico promedio de maíz por región en México, de 2003 a 2018 (SIAP, s.f.)



El trabajo se dividió en cuatro secciones para su mejor comprensión. Primero se presenta la información recopilada de la revisión bibliográfica para tener un panorama general de qué estudios se han hecho para estudiar estos temas. Enseguida, se plantea de manera general el modelo y se especifican las variables que se incluyeron en él. Posteriormente, se analizan los resultados obtenidos para, finalmente, dar una conclusión al respecto.

2. Revisión de literatura

Son diversos los trabajos en los que se investiga la influencia que tienen las variables climáticas en el rendimiento de los cultivos, sin embargo, se ha estudiado bajo diversos enfoques. Uno de ellos es conocer los efectos de dichas variables en el rendimiento, mientras que otro tiene que ver con la toma de decisiones para la mitigación de los efectos del cambio climático.

Bajo el primer enfoque está el trabajo de Rowhani y col. (2011) en el que se desarrolló un modelo para determinar el efecto del clima y su variabilidad en la producción de maíz, sorgo y arroz, en Tanzania. En el segundo, hay una división de los trabajos en los que se intenta determinar cómo los eventos climáticos extremos afectan la productividad y los que tienen por objetivo las consecuencias de la variación en el clima; como lo son los trabajos de Roberts et al. (2012) y Afzal et al. (2016).

En los estudios que intentan explicar las implicaciones económicas que tiene el clima en la producción agrícola, las herramientas matemáticas más usadas con tal propósito son lo que en economía se conoce como función de producción y el método de precios hedónicos (Deschenes & Greenstone, 2007, como se citó en Lee & Durmaz, 2016). Esta última es una manera de expresar matemáticamente la relación existente entre la cantidad de recursos y la cantidad de producto. La forma general de una función de producción es (Kahsay et al., 2016).

$$Q = F(L, K, I) \quad (1)$$

En donde Q representa la producción, que depende de L que es la mano de obra, K el capital e I otros factores que afectan la producción.

De acuerdo con los artículos consultados, la función de producción más empleada para determinar la relación entre el rendimiento o producción de un cultivo y las variables climáticas es la llamada función de Cobb-Douglas, ejemplos de ello son los trabajos de (Kahsay et. al, 2016; Lee & Durmaz, 2016; Kumar et al., 2017). La cual tiene la forma

$$Q = F(L^\alpha, K^\beta, I^\gamma) \quad (2)$$

En la cual I es la parte de la función que captura el efecto del clima, aunque puede incluir otros factores.

Sin embargo, para tener un pronóstico de lo que puede suceder con la producción agrícola y sus afectaciones por el cambio climático diversos autores han usado la función estocástica de Just y Pope; la cual se compone de dos partes, una que contiene a las variables explicativas y otra que tiene que ver con la variabilidad de estas variables (De-Graft & Kweku, 2012).

Para este tipo de funciones, que son regresiones lineales, los métodos que se han empleado mayormente son el análisis panel de efectos fijos (Suchánková & Bedeskovská, 2012; Saei et al., 2019); y por tanto los datos que se requieren son datos panel, que son un conjunto de datos que incluye datos de varios individuos en diferentes períodos de tiempo.

Las variables climáticas que más se han estudiado, por tener datos de éstas disponibles son la precipitación y la temperatura; no obstante, también se consideran otras variables como la temperatura y humedad del suelo y la evapotranspiración (Hollinger & Angel, 2009). Algunos trabajos en los que se ha realizado este tipo de análisis se presentan en la tabla 1.

La inclusión de la temperatura en los modelos de manera explícita ha sido de diversas formas, pero la principal diferencia está en el período, es decir, en si se toma la temperatura promedio anual, mensual, diaria. O como en el caso de Xin et al. (2013) y Kahsay y Hansen (2016) quienes incluyen la temperatura promedio por época del año en sus modelos. Otros casos en los que se toman en cuenta los valores de períodos de las etapas principales del cultivo (siembra, floración y cosecha) como lo son los modelos desarrollados por Afzal et al. (2016) y Kumar et al. (2017).

Otro aspecto en el que hay diferencias tiene que ver con si se introduce solo el término lineal o también el término cuadrático, de la precipitación y la temperatura. En particular la temperatura es la variable que más se asocia con el cambio climático, es por ello que se han desarrollado modelos para determinar cómo afectarán las variaciones de temperatura al desarrollo de los cultivos. La mayoría de estos modelos introducen a las temperatura máxima y mínima como variables explicativas, tanto de manera directa como indirecta; por ejemplo, los trabajos de Saei et al. (2019) y Roberts et al. (2012), respectivamente.

En este último caso, mediante la incorporación de otras variables dependientes de los días de grado de crecimiento (GDD), días de grado de calor extremo (HDD) y el déficit de la presión de vapor (VPD). Como Ajetomobi (2016) que usó diferentes funciones de producción, una de ellas simplemente incluyó la temperatura y la precipitación, pero además otras tres, las cuales incluyeron la temperatura y la precipitación, pero además los GDD, HDD y la VPD y combinaciones de ellas; para diferentes granos. En su estudio el determinó el mejor modelo para cada grano, con base en el error cuadrático medio menor, así como los estadísticos F y t.

Tabla 1. Resumen de literatura consultada sobre el tema

Autor	Año	Método	Tipo de datos	Función de producción	Variable dependiente	Modelo	Variables climáticas
Rowhani et al.	2011	Modelo lineal mixto	Datos panel		Rendimiento	Modelo 1	P (0.005), T (-0.126), VarP (-0.361)
Xin et al.	2011		Datos panel		Producción de hogares rurales	Modelo 1	Tprim noroeste (726.404), Tprim norte (340.262), Tprim este (1983.896), Tprim sur , Tprim centro (-496.32), Tprim noroeste (-450.374), Tprim suroeste (180.095), Pprim noreste (-27.187), Pprim norte (27.364), Pprim este (-171.068), Pprim su (-111.44), Pprim centro (7.755), Pprim noroeste (-3.078), Pprim suroeste (10.603), Sprim noreste (100.436), Sprim norte (91.37), Sprim este (-92.749), Sprim sur (-113.844), Sprim centro (89.629), Sprim noroeste (112.412), Sprim suroeste (49.293)
Roberts et al.	2012	Modelo de regresión (Mínimos cuadrados ordinarios)			Rendimiento	Modelo 1	P (1.79), GDD (0.028), HDD (-0.624)
						Modelo 2	P (3.2), GDD (-0.016), HDD (-0.496), VPD (86.6), VPDJul-Ago (-38)
						Modelo 3	P (1.57), HDD (-0.528), VPD (80.6), VPDJul-Ago (-29.2), P*HDD (13.1), P2*HDD (-0.123)
Suchánková & Bedeskovská	2012	Efectos fijos	Datos panel	De elasticidad de sustitución constante	Rendimiento del cultivo	Modelo 1	Ln Tjul (-0.81162), Ln Pmar (0.06478), Ln(Tjul/Pmar) (-0.08123)
		Efectos fijos					Ln Tprim (0.871), Ln Tver (-0.55), Ln Tot (-0.568), Ln Pprim (0.11), Ln Pver (0.006), Ln Pot (0.062), VarTprim (0.015), VarTver (-0.004), VarTot (0.007), VarPprim (-0.014), VarPver (-0.009), VarPot (-0.018)
Kahsay & Hansen	2016		Datos panel	Cobb-Douglas	Producción agrícola total	Modelo 1	Ln Tprim (0.782), Ln Tot (-0.857), Ln Pprim (0.113), Ln Pot (0.061), VarPprim (-0.015), VarPot (-0.018)
						Modelo 2	Ln Tanual (-0.002), Ln Panual (0), Ln VarT (-0.015), Ln VarP (0)
						Modelo 3	
						Modelo 4 (Modelo general, usando la especificación de la función de producción estocástica de Just y Pope)	Ln Tprim (0.877), Ln Tver (-0.556), Ln Tot (-0.557), Ln Pprim (0.108), Lnn Pver (0.006), Ln Pot (0.061), VarTprim (0.015), VarTver (-0.005), VarTot (0.007), VarPprim (-0.014), VarPver (-0.009) VarPot(-0.018)
Afzal et al.	2016		Datos panel	Cobb-Douglas	Producción	Modelo 1	Ln T max siembra, Ln T max floración, Ln T max

				(forma doble logaritmo)			cosecha, Ln T min siembra, Ln T min floración, Ln T min cosecha, Ln P siembra, Ln P floración, Ln P cosecha
Lee & Durmaz	2016	Efectos fijos	Datos panel	Cobb-Douglas	Producción	Modelo 1	Ln T (-117.803), Ln P (15.191)
						Modelo 2	PDSI (0.023)
						Modelo 2-A	PDSI (0.0184)
						Modelo 3	CMI (0.111)
						Modelo 3-A	CMI (0.101)
Kumar et al.	2017		Datos panel	Cobb-Douglas	Producción	Modelo 1	Ln T max siembra, Ln T max floración, Ln T max cosecha, Ln T min siembra, Ln T min floración, Ln T min cosecha, Ln P siembra, Ln P floración, Ln P cosecha
Saei et al.	2019	Efectos fijos	Datos panel	Just y Pope	Rendimiento	Modelo 1 (Cobb- Douglas)	T max (-581.49), Tmin (286.47), P (3.42)
						Modelo 2	Tmax (-5869.13), Tmin (3565.5), P (20.02), Tmax2 (11680.4), Tmin2 (11935.31), P2 (-8.83), Tmax*Tmin (-18323.82), Tmax*P (46.8), Tmin*P (393.59)

Cabe señalar que otra variación en los análisis de efectos fijos realizados radica en los cultivos incluidos. Algunos autores obtienen una función de producción para un solo cultivo, mientras que otros lo hacen usando datos de cultivos diferentes simultáneamente. Xin et al. (2011) obtuvo el modelo para cuatro granos con más importancia para China; mientras que Robertson et al. (2013) desarrollaron una función de producción para nueve granos diferentes de la región de las praderas canadienses. Por su parte, Kahsay et al. (2016) realizaron un análisis similar incorporando en un solo modelo datos de nueve granos que se siembran en el este de África. Así mismo, la revisión bibliográfica muestra que los granos mayor interés de estudio son el maíz, el sorgo, el arroz, la soya y el trigo.

3. Metodología

3.1 Modelo de datos panel

Un modelo de datos panel es aquel que emplea datos que incluyen información estructural como temporal; es decir, que los datos corresponden a diferentes agentes de interés en diferentes períodos de tiempo (Mayorga & Muñoz, 2000), este tipo de datos también son llamados datos longitudinales.

La forma general de un modelo de datos panel es la que se muestra en (3); en ella i hace referencia al agente de interés (individuo, país, etc.) y t al período de tiempo (año, mes, etc.), α y β son vectores de interceptos de n y K parámetros, respectivamente; y X_{it} corresponde a la i -ésima observación en el período t para las K variables independientes (Mayorga & Muñoz, 2000), en otras palabras, es el vector de variables independientes.

$$Y_{it} = \alpha_{it} + X_{it}\beta + u_{it} \quad (3)$$

Con $i = 1, \dots, N$; $t = 1, \dots, T$

El último término de (3) desglosado es (4), conocido como el error puede considerarse como una variable aleatoria no observable y es una suma de los efectos no observables (Mátyás & Sevestre, 2008).

$$u_{it} = \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

En donde μ_i representa los efectos no observables que difieren entre los agentes de estudio, pero no en el tiempo, δ_t está asociada con los efectos no cuantificables que varían en el tiempo, pero no entre los agentes de estudio y ε_{it} representa al término de error puramente aleatorio.

De acuerdo con Baltagi (1995) las ventajas de los datos panel respecto a los datos de sección cruzada y los de series de tiempo son:

- a) Que las técnicas que se emplean para su análisis permiten la existencia de variables específicas por agente; tomando en cuenta de esta manera la heterogeneidad de cada uno de ellos
- b) Proporcionan mayor cantidad de información, más variabilidad, menos colinealidad entre variables, más grados de libertad y mayor eficiencia
- c) Debido a que se analizan las observaciones en los agentes de estudios de corte transversal, este tipo de datos es más adecuado para estudiar los cambios
- d) Con estos datos se encuentran y miden los efectos que no se detectan con los otros tipos de datos
- e) Es posible hacer estudios y modelos más complejos
- f) Reducen el sesgo que puede haber en conjuntos grandes de datos.

Mayorga y Muñoz (2000) señalan que las desventajas asociadas a la técnica de datos de panel tienen que ver con los procesos para la obtención y el procesamiento de la información estadística sobre los agentes de estudio. Por lo que, cuando se presume que la variable independiente es explicada por variables que no son observables, y estas a su vez se omiten; el modelo de datos panel permite determinar consistentemente el efecto que tienen las variables explicativas tienen con ellas.

3.1.1 Modelo de efectos fijos (EF)

Este modelo se emplea cuando se desea analizar cómo afectan las variables que no son constantes con el tiempo; por consiguiente, las variables que no varían en el tiempo no afectan a la variable dependiente. Además, el modelo considera que existe un término constante para cada individuo, los efectos individuales son independientes entre sí, tiene la forma general

$$Y_{it} = \alpha_i + X_{it}\beta + u_{it} \quad (5)$$

Es así que se determina la relación entre variable dependiente e independientes entre cada agente de interés; pero se tiene que controlar la interacción entre las variables explicativas, por lo que no se acepta que exista correlación entre tales variables y el término de error. En caso de correlación, se tendría que este modelo no es adecuado para modelar lo que se requiere.

3.1.2 Modelo de efectos aleatorios (EA)

Cuando se trata de este modelo se está asumiendo que el coeficiente para cada agente es común en el tiempo y que los efectos individuales se distribuyen aleatoriamente, dado que no son independientes entre sí. Además, se supone que la variación entre cada agente es aleatoria y no hay correlación ni con las variables independientes ni con el predictor. Por la cual se incluye el término de error en el modelo.; quedando éste de la forma (Cameron & Trivedi, 2009)

$$Y_{it} = X_{it}\beta + (\alpha_i + \varepsilon_{it}) \quad (6)$$

Es recomendable usar efectos aleatorios cuando se sospecha que las diferencias entre los individuos repercuten en la variable dependiente.

3.1.3 Prueba de Hausman

Para elegir cual modelo es más apropiado para cada fin se deben tener en cuenta diversas cuestiones como el objetivo de la investigación, la procedencia y número de datos (individuos y períodos). Generalmente, se usan efectos aleatorios cuando se tiene una muestra aleatoria y con interés de obtener inferencias poblacionales; y se usan efectos fijos en el caso de que se desee conocer los parámetros.

Una herramienta estadística para elegir entre efectos fijos y aleatorios es la prueba de Hausman, el estadístico de contraste está dado por

$$Hausman = (\hat{\beta}_{EA} - \hat{\beta}_{EF})' (V_{EF} - V_{EA})^{-1} (\hat{\beta}_{EA} - \hat{\beta}_{EF}) \chi_K^2 \quad (7)$$

La hipótesis nula de esta prueba es que las variables explicativas no están correlacionadas con el efecto a nivel de grupo con el tiempo, por lo que la estimación de efectos aleatorios es consistente y eficiente, mientras que la estimación de efectos fijos es consistente pero ineficiente. La hipótesis alternativa menciona que las variables explicativas están correlacionadas; entonces la estimación con efectos aleatorios es inconsistente y la estimación con efectos fijos no lo es. Por lo cual, a medida que los estimadores difieran (7) se hará mayor y se rechazará la hipótesis nula.

3.2 Datos

Los datos que se emplearon fueron como variable dependiente el rendimiento de maíz, obtenido del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) del período 2003 - 2018; y las variables climáticas que se usaron fueron la temperatura media promedio y la precipitación promedio tanto anual como de los semestres primavera-verano y otoño-invierno, que se consiguieron de la Base de Datos Climatológica Nacional (Sistema CLICOM) para el mismo período. Otras variables, relacionadas con el rendimiento y que se

incluyeron fueron la superficie cosechada y la proporción de área sembrada en modalidad de riego, también del SIAP.

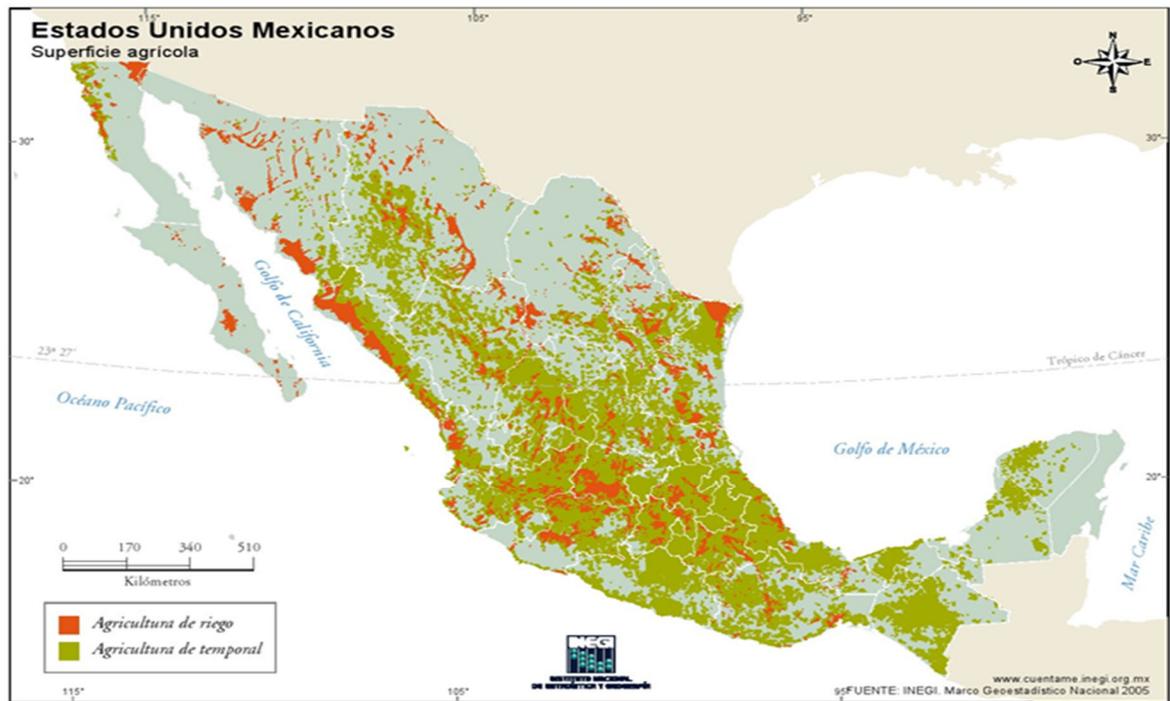
En la tabla 2 se presenta como se representó cada una de las variables y las unidades de éstas en las que se introducen en el modelo, así como los valores representativos para el territorio nacional.

Para el procesamiento de los datos primero se depuró la base de datos del SIAP, con el fin de obtener solo la información de rendimiento de maíz que es cultivo de interés, así como las variables de superficie cosechada y producción por modalidad de cultivo; cabe mencionar que se consideró para el cálculo de rendimiento tanto la modalidad de riego como la de temporal.

Tabla 2. Descripción y estadísticos de las variables del modelo (para el país), tomadas y adaptadas del CLICOM y del SIAP.

Símbolo	Unidad	Definición	Media	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
rendimiento	ton/ha	Volumen de producción por superficie cosechada	2.500	1.665	0	14
Tanual	°C	Temperatura promedio anual	20.18	4.467	0	33.53
Panual	dm	Precipitación promedio anual	0.858	0.641	0	8.832
Tprim_ver	°C	Temperatura promedio periodo primavera-verano	21.80	4.536	5.128	35.07
Tot_inv	°C	Temperatura promedio periodo otoño-invierno	18.54	4.475	3.530	30.86
Pprim_ver	dm	Precipitación promedio periodo primavera-verano	1.087	0.777	0	10.52
Pot_inv	dm	Precipitación promedio periodo otoño-invierno	0.655	0.626	0	10.74
cosechada_k	km ²	Superficie cosechada anual	35.03	63.04	0	1,302
riego_prop	%	Proporción de superficie cultivada en modalidad riego anual	12.49	22.64	0	100

Figura 4. Áreas agrícolas de México por modalidad de siembra, a partir de datos de la carta de uso de suelo del INEGI (INEGI, s.f.)



La información de la temperatura y precipitación se obtuvo en *ArcGIS 10.1*, software en el que primero se obtuvieron las áreas agrícolas por municipio, como se aprecia en la figura 4, es en el norte del país y en la península de Yucatán en donde menos se practica la actividad agrícola.

Posteriormente, se determinó cual estación climatológica era la más cercana por área agrícola, y finalmente, sabiendo esto, se asignaron los valores reportados por estas estaciones. Posteriormente, se combinaron la base de datos con información de maíz y la que tenía los datos de clima, con lo que se obtuvo la base de datos definitiva para correr el modelo, ambas tareas se hicieron en el software estadístico *Stata 14*.

3.3 Formulación del modelo

En el presente trabajo se realizó bajo un enfoque de análisis de datos panel, usando el software *stata 14*. Primero se hizo el modelo de efectos fijos y después el modelo de efectos aleatorios. Finalmente, se realizó la prueba de Hausman para con ella determinar cuál de los dos modelos es más conveniente.

Se planteó un modelo cuadrático, con la intención de corroborar si las variables llevan a un rendimiento máximo como se menciona en varios trabajos, es decir, que hay un valor umbral que no se debe exceder ya que afectaría negativamente la producción, y por tanto, el rendimiento de maíz. Para tal propósito, la función de producción anual tiene la forma

$$\begin{aligned} \text{rendimiento} = & T_{\text{anual}} + T_{\text{anual}}^2 + P_{\text{anual}} + P_{\text{anual}}^2 + \text{cosechada}_k \\ & + \text{cosechada}_k^2 + \text{riego_prop} \end{aligned} \quad (8)$$

Donde las variables se definieron en la tabla 2, y cuya aplicación fue para todo el territorio nacional.

Por otra parte, la función de producción con datos semestrales es como se muestra en (9), y se aplicó tanto a nivel país como por región geoeconómica; en este caso los valores de las variables se definieron por período semestral de acuerdo con la tabla 2.

$$\begin{aligned} \text{rendimiento} = & T_{\text{prim_ver}} + T_{\text{prim_ver}}^2 + Tot_inv + Tot_{inv}^2 + P_{\text{prim_ver}} \\ & + P_{\text{prim_ver}}^2 + Pot_inv + Pot_{inv}^2 + \text{cosechada}_k \\ & + \text{cosechada}_k^2 + \text{riego_prop} \end{aligned} \quad (9)$$

En primera instancia se formuló un modelo que incluyese las variables climáticas anuales; después se realizó un modelo análogo con variables de los semestres primavera-verano y otoño-invierno, con el objetivo de conocer mejor el efecto del clima en la producción de maíz. Y en una tercera etapa, se corrieron modelos cuadráticos iguales por cada una de las regiones en que se divide México.

4. Resultados y discusión

4.1 Variables climáticas

La temperatura promedio en el período de 2003 a 2018 ha variado, pero no se observa una tendencia clara, ya que tanto anualmente como semestralmente ha tenido incrementos y disminuciones. En la figura 5 se observa que fue en 2010 cuando se presentó la mayor disminución, y a partir de ese año a 2018 hubo un incremento marcado en el periodo otoño-invierno.

Figura 5. Temperatura promedio en México

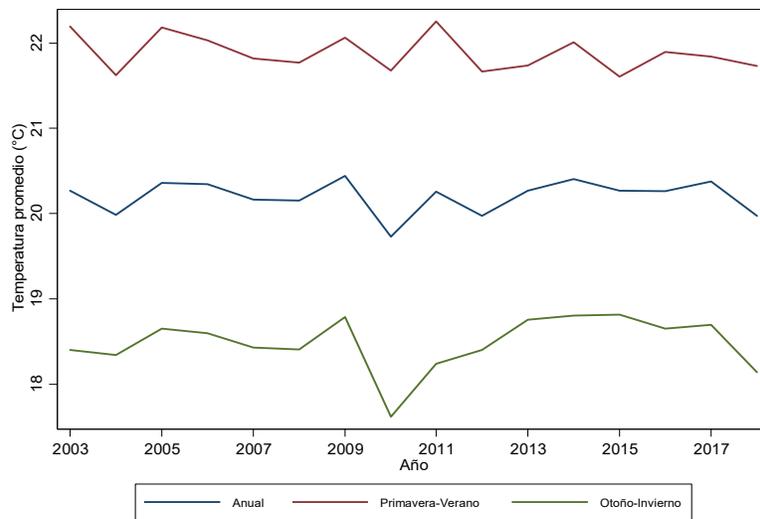
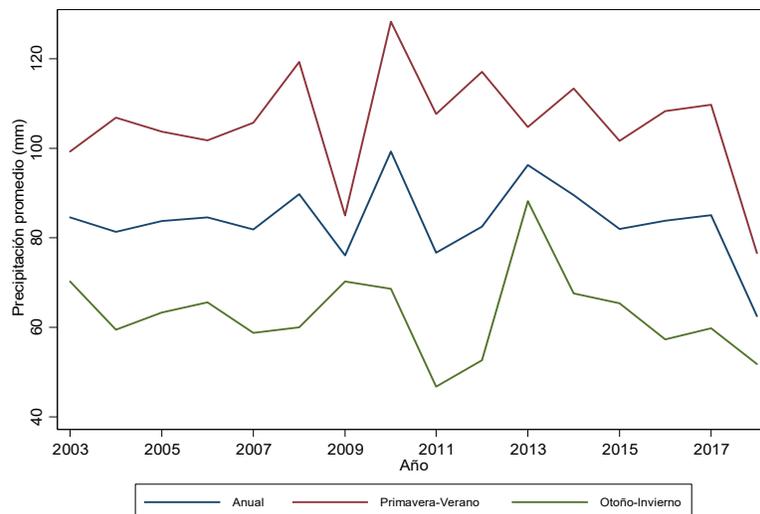


Figura 6. Precipitación promedio en México.



En principio, se podría intuir que T_{prim_ver} , T_{ot_inv} , R_{prim_ver} tengan impacto positivo en el rendimiento, puesto que los valores promedios se encuentran en el intervalo óptimo para el crecimiento del maíz, 18 a 24 grados Celsius y 700 a 1300 mm (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2017).

4.2 Análisis panel

4.2.1 Modelo con variables anuales

Los resultados del modelo de efectos fijos propuesto, con variables anuales de México, se presentan en la tabla 3. Estos indican que, de las variables incluidas, el parámetro de interacción entre la temperatura y la precipitación no afecta el rendimiento puesto que no es significativo. Los signos de los parámetros de la precipitación corroboran que el aumento en ella beneficia positivamente el rendimiento, no obstante, hay un valor a partir del cual el rendimiento disminuye; es decir, existe una relación no lineal entre las variables climáticas, temperatura y precipitación, y el rendimiento.

Tabla 3. Estimación de resultados con variables anuales del país.

VARIABLES	rendimiento
Tanual	-0.0236* (0.0140)
Tanual ²	0.000677* (0.000359)
Panual	0.142** (0.0579)
Panual ²	-0.0283*** (0.00582)
cosechada_k	0.00417*** (0.000321)
cosechada_k ²	-1.62e-06*** (4.06e-07)
Tanual*Panual	0.000228 (0.00261)
riego_prop	0.0136*** (0.000490)
Constant	2.384*** (0.139)
Observaciones	27,163
Número de municipios	2,133
R ²	0.037

Variable dependiente: Rendimiento (ton de maíz por hectárea)

Entre paréntesis, error estándar

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Asumiendo que hubiese un aumento de un decímetro en precipitación anual el rendimiento de maíz aumentaría en 97 kg/ha. El rendimiento también aumentaría en 4 kg/ha y 13 kg/ha si la superficie cosechada se elevara en 1 km² y la proporción de siembra en modalidad de riego creciera en 1%, respectivamente (tabla 4); cambios pequeños en el rendimiento ante grandes cambios en la superficie cosechada y el porcentaje en la siembra de riego.

Tabla 4. Efecto marginal del modelo con variables anuales del país.

VARIABLES	País
Tanual	0.000392 (0.0030) 20.18
Panual	0.09768*** (0.0149) 0.858
cosechada_k	0.0040*** (0.0003) 35.03
riego_prop	0.01357*** (0.0005) 12.49
Observaciones	27,163

Nota: Los efectos marginales se calcularon utilizando el valor medio de las variables independientes.

4.2.2 Modelos con variables semestrales

Se presentan en la tabla 5 los resultados de las estimaciones del modelo de efectos fijos, tanto para el país como para cada una de las ocho regiones en que éste se divide. Cuando se hace el análisis panel de efectos fijos para el país con variables climáticas semestrales, se tiene que el modelo cuadrático es adecuado ya que los parámetros de ellas, excepto de la precipitación otoño-invierno, son estadísticamente significativos; lo cual también es indicio de que la precipitación en este periodo no tiene influencia en el rendimiento del maíz. Lo mismo ocurre con los parámetros de interacción de la temperatura y la precipitación. El efecto marginal que tiene la Tprim_ver en el rendimiento es de una disminución de 23 kilogramos de maíz por hectárea y el de Tot_inv es de 30 kg/ha. Por otra parte, ante un incremento de la precipitación en primavera-verano de 1 dm se tendría un aumento de 87

kilogramos de maíz/ha. Un efecto positivo menor, lo tienen la superficie cosechada que al incrementar en 1 km² el rendimiento aumentaría en 3.9 kg/ha; y si la proporción de riego fuese un 1 % mayor, el aumento en el rendimiento aumentaría 13 kg/ha.

Los resultados obtenidos para la región noroeste indican que el modelo cuadrático no es adecuado debido a que los términos cuadráticos resultaron no ser significativos. Los parámetros del modelo para la región noroeste sugieren que el rendimiento de maíz en esta región no se ve afectado por la precipitación en el periodo otoño-invierno, corroborándose que el clima es el adecuado para el crecimiento del maíz en esa región, así como la tecnología en los sistemas de riego empleados. Además, la interacción entre la temperatura y la precipitación también tiene influencia en el rendimiento; en el periodo primavera-verano este efecto es negativo, mientras que en el periodo otoño-invierno es positivo. Por lo que, el incremento de un grado Celsius de la temperatura en primavera-verano implicaría una reducción de 57 kg/ha en el rendimiento; mientras que este aumento de temperatura en el periodo otoño-invierno ocasionaría aumento del rendimiento, equivalente a 36 kg/ha. Aumento en el rendimiento, de 240 kg/ha también se presentaría cuando la precipitación promedio en primavera-verano aumentara en 1 dm. Es de suponerse que al aumentar la superficie cosechada también aumente el rendimiento, lo cual, para esta región, si la superficie cosechada se incrementa en 1 km², el rendimiento aumentará en 4.9 kg/ha. Y si incrementara la proporción de superficie sembrada de riego en 1 %, el rendimiento aumentaría en 17 kg/ha.

La estimación para la región Noroeste indica que la única variable que impacta la producción de maíz es la precipitación en el semestre otoño-invierno, con un 90 % de confianza, presentando un comportamiento lineal; de las demás variables consideradas, la superficie cosechada y el porcentaje producido en modalidad de riego también resultaron ser significativas para el modelo. El efecto marginal del aumento en la precipitación en otoño-invierno tiene como consecuencia la disminución del rendimiento en 26.9 kg/ha; en el caso de la superficie cosechada el efecto marginal resulta en 9 kilogramos de maíz más por hectárea y en un aumento de 12 kilogramos de maíz por hectárea cuando la proporción de riego también lo hace en 1 %.

Para la región Oeste se obtuvo que la T_{prim_ver} tiene un comportamiento cuadrático, ya que sus coeficientes resultaron ser estadísticamente significativos; mientras que P_{prim_ver} y cosechada_k tienen un comportamiento lineal, variables también estadísticamente significativas. En lo que concierne a las variables climáticas, la elevación de la T_{prim_ver} en 1 °C significaría que el rendimiento disminuya en 67 kg/ha; pero si la temperatura promedio en otoño-invierno aumentara en esa magnitud se lograría un aumento de 120 kg/ha. Además, también se tendría un rendimiento mayor si la precipitación promedio aumentará en 1 dm, esto implicaría un aumento de 124 kg/ha y de 201 kg/ha en primavera-verano y otoño-invierno, respectivamente. La superficie cosechada, tiene el menor efecto marginal, si aumenta en 1 km² el rendimiento aumenta en 9 kg/ha. Y el rendimiento aumenta en 20 kilogramos por hectárea cuando la proporción de superficie sembrada en modalidad riego en uno por ciento.

En el caso de la región este, las temperaturas semestrales, la precipitación del periodo primavera-verano, y la superficie cosechada son estadísticamente significativas y tienen un comportamiento cuadrático; la proporción de riego también es significativa para el modelo. El aumento en la T_{prim_ver} tiene una implicación negativa para el rendimiento cuyo efecto marginal es de 13 kg de maíz/ha menos; en contraste con el aumento de T_{tot_inv} cuyo efecto marginal provoca un aumento de 14.7 kilogramos más por hectárea. Por otro lado, la elevación de la precipitación promedio en primavera-verano en 1 dm tiene un impacto en el aumento del rendimiento en 45 kg/ha. El efecto de incrementar la superficie cosechada en 1 km² sería de un aumento de aproximadamente 12 kg/ha en el rendimiento, resultado similar a cuando se incrementa en 1 % la superficie de riego, el cual es de 12 kg/ha.

Tabla 5. Resultados modelo efectos fijos con variables semestrales.

VARIABLES	País	Noroeste	Noreste	Oeste	Este	Centronorte	Centrosur	Suroeste	Sureste
Tprim_ver	-0.0744*** (0.0210)	0.0359 (0.0819)	-0.00540 (0.129)	-0.246** (0.105)	-0.155*** (0.0375)	0.0439 (0.176)	-0.0473 (0.113)	0.0319 (0.0234)	-0.123 (0.321)
Tprim_ver ²	0.00125*** (0.000482)	-0.00267 (0.00198)	-0.000614 (0.00262)	0.00440* (0.00241)	0.00336*** (0.000910)	-0.00167 (0.00455)	7.59e-06 (0.00303)	-0.000338 (0.000529)	0.00298 (0.00588)
Tot_inv	0.0868*** (0.0181)	0.121** (0.0557)	-0.115 (0.0887)	0.0455 (0.0911)	0.141*** (0.0350)	0.184 (0.144)	0.241*** (0.0862)	-0.0711*** (0.0235)	-0.111 (0.261)
Tot_inv ²	-0.00160*** (0.000491)	-0.00185 (0.00163)	0.00289 (0.00255)	0.00163 (0.00241)	-0.00377*** (0.000970)	-0.00461 (0.00461)	-0.00420 (0.00279)	0.00167*** (0.000589)	0.00176 (0.00547)
Pprim_ver	0.191*** (0.0530)	-0.856* (0.497)	-0.361 (0.622)	0.308 (0.317)	-0.0222 (0.0884)	0.377 (0.732)	1.134*** (0.261)	0.0406 (0.0434)	0.966 (0.660)
Pprim_ver ²	-0.0172*** (0.00348)	-0.0804 (0.114)	-0.0250 (0.0286)	0.135** (0.0582)	-0.0153* (0.00801)	-0.261** (0.125)	-0.0998** (0.0464)	-0.00387* (0.00222)	-0.0646 (0.0446)
Pot_inv	-0.0651 (0.0548)	1.408*** (0.519)	0.947* (0.494)	-0.183 (0.312)	0.0129 (0.0822)	0.337 (0.693)	-1.390*** (0.263)	-0.00307 (0.0455)	0.480 (0.691)
Pot_inv ²	-0.00808 (0.00536)	-0.161 (0.226)	-0.0636 (0.0667)	-0.0713 (0.0905)	-0.0215** (0.0103)	-0.196 (0.190)	0.129** (0.0525)	0.00467 (0.00339)	-0.0442 (0.0352)
cosechada_k	0.00403*** (0.000336)	0.00508*** (0.00137)	0.0103*** (0.00198)	0.00985*** (0.00217)	0.0144*** (0.00117)	0.00114 (0.00140)	0.0231*** (0.00352)	4.90e-06 (0.000772)	0.00473*** (0.000830)
cosechada_k ²	-1.61e-06*** (4.21e-07)	-1.36e-06 (9.97e-07)	-2.78e-05*** (5.42e-06)	-5.33e-06 (8.81e-06)	-4.19e-05*** (6.26e-06)	-1.57e-06 (4.63e-06)	-3.38e-05*** (1.30e-05)	-4.56e-06*** (1.68e-06)	-5.38e-06*** (1.60e-06)
Tprim_ver*Pprim_ver	-0.00305 (0.00224)	0.0520** (0.0229)	0.0176 (0.0244)	-0.0194 (0.0140)	0.00517 (0.00368)	0.0149 (0.0350)	-0.0348*** (0.0115)	-0.00115 (0.00177)	-0.0259 (0.0237)
Tot_inv**Pot_inv	0.00441 (0.00273)	-0.0698*** (0.0257)	-0.0333 (0.0273)	0.0232 (0.0161)	0.00351 (0.00427)	0.00643 (0.0448)	0.0495*** (0.0151)	-0.000709 (0.00218)	-0.0133 (0.0283)
riego_prop	0.0131*** (0.000509)	0.0175*** (0.00176)	0.0123*** (0.00109)	0.0201*** (0.00191)	0.0123*** (0.00101)	0.0117*** (0.00192)	-0.000497 (0.00267)	0.0104*** (0.00116)	0.00769** (0.00373)
Constant	2.153*** (0.195)	1.584* (0.818)	2.792* (1.510)	5.332*** (0.975)	2.233*** (0.302)	0.875 (1.603)	0.449 (0.857)	1.908*** (0.190)	3.459 (3.287)
Observaciones	25,258	1,698	1,306	3,415	5,839	1,852	1,986	7,078	1,369
R ²	0.038	0.086	0.125	0.069	0.058	0.047	0.103	0.022	0.046
Número de municipios	2,090	178	122	265	494	132	152	578	114

Variable dependiente: Rendimiento (ton de maíz por hectárea)

Entre paréntesis, error estándar

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Tabla 6. Resultados marginales del modelo de efectos fijos con variables semestrales.

VARIABLES	País	Noroeste	Noreste	Oeste	Este	Centronorte	Centrosur	Suroeste	Sureste
Tprim_ver	-0.02325*** (0.0044) 21.80	-0.05759*** (0.0181) 22.70	-0.02592 (0.0171) 25.39	-0.06702** (0.0206) 22.43	-0.01355* (0.0079) 20.11	-0.01239 (0.0212) 19.78	-0.08476*** (0.225) 18.37	0.01522*** (0.0048) 22.26	0.01155 (0.0161) 27.62
Tot_inv	0.03013*** (0.0043) 18.54	0.03637** (0.0159) 17.05	-0.02214 (0.01322) 18.64	0.12062*** (0.0202) 19.55	0.01477* (0.0080) 17.16	0.04146** (0.0212) 15.70	0.13242*** (0.0211) 15.74	-0.00498 (0.0051) 19.95	-0.03668** (0.0159) 24.56
Pprim_ver	0.08750*** (0.0126) 1.08	0.24008* (0.1284) 0.529	0.05641 (0.0758) 0.606	0.12466** (0.0565) 0.931	0.04588** (0.0223) 1.172	0.32845*** (0.0831) 0.660	0.27732*** (0.0529) 1.084	0.00379 (0.0096) 1.452	0.10296*** (0.0392) 1.147
Pot_inv	0.00609 (0.0153) 0.6568	0.11597 (0.1732) 0.314	0.26950*** (0.09426) 0.4445	0.20114** (0.0806) 0.4873	0.03877 (0.0260) 0.800	0.30223** (0.1174) 0.345	-0.48513*** (0.0722) 0.485	-0.00942 (0.0111) 0.833	0.07375* (0.0438) 0.8959
cosechada_k	0.00392*** (0.0003) 34.06	0.00492*** (0.00126) 60.41	0.00922*** (0.00181) 18.63	0.00941*** (0.0016) 41.75	0.01198*** (0.0009) 28.59	0.00097 (0.0010) 50.61	0.02054*** (0.0027) 37.15	-0.00023 (0.0007) 26.50	0.00434*** (0.0007) 35.79
riego_prop	0.01314*** (0.0005) 12.47	0.01754*** (0.00175) 38.55	0.01227*** (0.0011) 37.46	0.02006*** (0.0019) 11.68	0.01228*** (0.0010) 11.12	0.01173*** (0.0019) 17.68	-0.00049 (0.0026) 13.36	0.01036*** (0.0011) 4.35	0.00768** (0.00373) 1.04
Observaciones	25,258	1,698	1,306	3,415	5,839	1,852	1,986	7,078	1,369

Variable dependiente: Rendimiento (ton de maíz por hectárea)

Entre paréntesis, error estándar

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Los resultados del análisis de datos panel para la región centronorte arrojó que el cuadrado de la precipitación del periodo primavera verano es estadísticamente significativo, y la superficie de riego también. No obstante, las variables que tienen influencia en el rendimiento son la Tot_inv y la precipitación en ambos semestres del año, así como la proporción de riego sembrada; variables que tienen un efecto marginal positivo de 41, 328, 302 y 11 kilogramos por hectárea, respectivamente.

Por otra parte, todas las variables climáticas semestrales incluidas en el modelo para la región centrosur tiene afectan el rendimiento, así como la superficie cosechada. Los valores obtenidos indican que el aumento en un grado en la Tprim_ver causarían que el rendimiento disminuya en 84 kg/ha. El efecto marginal de la Tot_inv es de 132 kg/ha más, mientras que este efecto es de 277 kg/ha para el caso de la Pprim_ver. De manera contraria, el incremento de la Pot_inv en 1 dm reduce el rendimiento en 485 kg/ha, esta variable es la que tendría el mayor impacto negativo si aumentase la lluvia. La proporción de siembra de riego afecta positivamente el rendimiento, este aumenta en 20 kg/ha al incrementarse esta variable en 1 %.

En la región suroeste se obtuvo que el rendimiento solo se ve afectado por la temperatura en primavera-verano y la proporción de siembra en modalidad de riego. La primera variable tiene un efecto marginal positivo de 15 kilogramos por hectárea y la segunda, de 10 kilogramos por hectárea en el rendimiento. Finalmente, solo la Tprim_ver no tiene significancia para el modelo de la región sureste; y la Tot_inv tiene como consecuencia una reducción de 36 kg/ha en el rendimiento. Para esta región, elevación de la precipitación en ambos periodos representa incrementos en el rendimiento de 102 y 73 kilogramos por hectárea, respectivamente. En lo que concierne a la superficie cosechada y la proporción de riego, estas variables tienen un impacto menor que las otras variables, su efecto marginal en el rendimiento es de 4 y 7.6 kilogramos de maíz más por hectárea.

En la región suroeste se obtuvo que el rendimiento solo se ve afectado por la temperatura en primavera-verano y la proporción de siembra en modalidad de riego. La primera variable tiene un efecto marginal positivo de 15 kilogramos por hectárea y la segunda, de 10

kilogramos por hectárea en el rendimiento. Finalmente, solo la *Tprim_ver* no tiene significancia para el modelo de la región sureste; y la *Tot_inv* tiene como consecuencia una reducción de 36 kg/ha en el rendimiento. Para esta región, elevación de la precipitación en ambos periodos representa incrementos en el rendimiento de 102 y 73 kilogramos por hectárea, respectivamente. En lo que concierne a la superficie cosechada y la proporción de riego, estas variables tienen un impacto menor que las otras variables, su efecto marginal en el rendimiento es de 4 y 76 kilogramos de maíz más por hectárea.

Como se observa en la tabla 5, no para todas las áreas analizadas las variables climatológicas incluidas en el modelo general propuesto son significativas ni son las mismas. Solo para la región suroeste la *Tprim_ver* tiene una relación directa con el rendimiento, caso contrario para la *Tot_inv* solo tiene una relación inversa para la región sureste. Por lo tanto, el cambio climático afectaría negativamente el rendimiento de maíz si la temperatura en primavera-verano aumentara en un grado en alguna de las regiones consideradas en este trabajo.

La *Pprim_ver* en todos los casos en que resultó ser significativa tiene un efecto directo en el rendimiento; y la *Pot_inv* influencia positivamente el rendimiento, a excepción de la región centrosur. En la mayoría de las regiones, la variable explicativa que menor impacto tiene en la función de producción general propuesta es la superficie cosechada. Solo para la región centrosur, la proporción de área sembrada en modalidad de riego no influencia el rendimiento. La variación climática tiene implicaciones distintas y de diferente magnitud para cada zona o región, ya que también están relacionados otros factores en la producción de maíz.

Los resultados corroboran ciertos hechos que están relacionados con las características regionales de México: 1) En la región noroeste, que es en donde el rendimiento de maíz es mínimo, debido al clima seco que predomina en la región, el que llueva más beneficiaría a la producción de este grano, 2) En la región suroeste, en la cual se tienen clima lluvioso y propicio para la siembra de maíz, también el rendimiento es bajo puesto que se tienen pequeñas áreas aptas para esta actividad y que la infraestructura para riego, que más

influencia tiene en la producción de maíz, no es suficiente (CONEVYT, s.f.), como para tener un aumento considerable para un desarrollo considerable de esta actividad.

Con base en los valores que se obtuvieron de los modelos, varios de ellos corroboran lo que dice la teoría, que hay un valor de precipitación óptimo que lleva al máximo rendimiento (Hollinger & Angel, 2009); matemáticamente, esto implica que el término lineal tenga un valor positivo y el término que representa el cuadrado de la variable tenga un valor negativo; por ejemplo, el modelo con datos para todo el país.

Los modelos más parecidos al desarrollado en este trabajo es el de Kahsay y Hasen (2016) porque incorpora a la temperatura y precipitación de cada época del año, quien obtuvo que tanto la temperatura en primavera como en otoño son significativas como la precipitación para estas mismas épocas. La variable que resultó con valor negativo fue la temperatura de otoño. Así como el modelo de Xin et al. (2013) el cual involucra variables climáticas por región. Sin embargo, no se es posible comparar con rigor los valores aquí obtenidos con los reportados en otros trabajos, puestos que difieren en el tipo de modelo empleado y las variables que incluyen en él.

5. Conclusiones

Existe evidencia de que la temperatura y la precipitación afectan el clima, lo cual está demostrado por estudios experimentales, mediciones directas y modelos matemáticos. El modelo de efectos fijos es el más apropiado para analizar la influencia de las variables climáticas en la función de producción de maíz propuesta en este trabajo.

Se encontró mediante el análisis de datos panel para el caso de México, usando datos de 2003 a 2018, que el rendimiento de maíz se ve afectado positivamente por incremento en la precipitación; asumiendo que la precipitación aumentará en 1 dm el rendimiento de maíz promedio anual tendría un aumento de 97 kg/ha. No obstante, el aumento en esta última variable tiene un valor umbral, a partir del cual, de seguir incrementando afectaría

negativamente la producción de maíz; lo mismo sucedería si se incrementara la superficie cosechada. Lo anterior, resultaría en afectaciones económicas, principalmente para los agricultores. En contraste, el mayor efecto negativo por el cambio climático sería por aumento de la temperatura media en el primavera-verano, en el orden de 23.25 kg/ha por cada aumento de 1 celsius en la temperatura promedio en este período.

Solo para la región sureste el incremento en la precipitación media otoño-invierno resultó tener efecto negativo en el rendimiento de maíz; el aumento de esta variable en 1 dm provocaría una disminución de 485 kg/ha. De manera análoga sucede con la temperatura otoño-invierno y la región sureste, para la cual si la temperatura de este semestre se elevara en 1 °C el rendimiento disminuiría en 36 kg/ha; una medida que podría considerarse para compensar los efectos negativos sería aumentar la producción en la modalidad de riego, que tiene influencia positiva y directa en el rendimiento; no obstante, habría que analizar otros factores para determinar su viabilidad, como, por ejemplo, el costo y la disponibilidad del agua a usar.

Generalizando, la influencia del clima tiene impacto en la producción de cualquier cultivo, pero el impacto dependerá del producto a sembrar, la modalidad de cultivo, el tipo de suelo, la tecnología empleada, entre otros. Por lo que los gobiernos deberían tomar medidas para apoyar al campo ante las variaciones del clima que se están presentando debido al cambio climático; y conforme a las características de cada región. Un claro ejemplo de ello es la región suroeste en la cual el clima no tiene gran impacto en el rendimiento, ya que solo la temperatura en primavera-verano y la superficie sembrada en modalidad riego resultaron ser significativas; de acuerdo con los resultados, aumentaría en 15 y 10 kg/ha la temperatura en este semestre aumenta en 1 °C y la producción en modalidad de riego aumenta en 1 %.

Bibliografía

Afzal, M., Ahmed, T., & Ahmed, G. (2016). *MPRA*. Recuperado el 25 de Agosto de 2020, de Empirical Assessment of Climate Change: https://mpra.ub.uni-muenchen.de/70958/1/MPRA_paper_70958.pdf

- Baird, C. (2001). *Química Ambiental*. Barcelona, España: Reverté.
- Baltagi, B. (1995). *Econometric Analysis of Panel Data*. John Wiley & Sons.
- Cameron, A., & Trivedi, P. (2009). *Microeconometrics Using Stata*. Texas: Stata Press.
- CONEVYT. (s.f.). Recuperado el 5 de Abril de 2021, de https://www.conevyt.org.mx/colaboracion/colabora/objetivos/libros_pdf/sso1_u3lec2.pdf
- De-Graft, H., & Kweku, C. (2012). THE EFFECTS OF CLIMATIC VARIABLES AND CROP AREA. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 10(10), 10-13.
- DIDACTALIA. (s.f.). *DIDACTALIA: Mapas interactivos*. Recuperado el 5 de Abril de 2021, de <https://content.gnoss.ws/imagenes/Documentos/ImagenesSemanticas/c0da2ffd-3299-406f-90ca-f5994726afdf/1ef981be-4d56-4b44-b350-8381646901a1.jpg>
- Hollinger, S. E., & Angel, J. R. (2009). Weather and Crops. En *Illinois Agronomic Handbook* (24 ed., págs. 1-12). Nafziger.
- Kahsay, G., & Hasen, L. (2016). The effect of climate change and adaptation policy on agricultural. *Ecological Economics*, 121, 54-64.
- Kumar, A., Narayanan, K., & Sharma, P. (2017). Effect of climatic factors on cash crop farming in. *Int. J. Agricultural Resources, Governance and Ecology*, 13(2), 175-210.
- Lafitte, H. R. (1994). *Identificación de problemas en la producción de maíz tropical*. CIMMYT.
- Lee, J., & Durmaz, N. (2016). IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON CORN PRODUCTION IN THE U.S.:. *Applied Econometrics and International Development*, 16(1), 93-104.
- Mátyás, L., & Sevestre, P. (2008). *The Econometrics of Panel Data. Fundamentals and Recent Developments in Theory and Practice* (Tercera ed., Vol. 46). (L. Mátyás, & P. Sevestre, Edits.) Springer.
- Mayorga, M., & Muñoz, E. (Septiembre de 2000). *La técnica de datos panel una guía para su uso e interpretación*. Obtenido de Banco Central de Costa Rica: https://activos.bccr.fi.cr/sitios/bccr/investigacioneseconomicas/DocMetodosCuantitativos/Tecnica_datos_panel_una_guia_para_su_uso_e_interpretacion.pdf

- O'Leary, M. (20 de Mayo de 2016). *CIMMYT*. Recuperado el 5 de Noviembre de 2020, de <https://www.cimmyt.org/es/uncategorized/maiz-de-mexico-para-el-mundo/>
- Ramírez, A., & Aceves, O. (Junio de 2020). *Regiones de México*. Hidalgo, México. Recuperado el 28 de Marzo de 2021, de <https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/handle/123456789/19628/geografia-patrimonio-cultural-y-natural-de-mexico.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Roberts, M., Schlenker, W., & Eyer, J. (2012). AGRONOMICWEATHER MEASURES IN ECONOMETRIC. *Amer. J. Agr. Econ.*, 95(2), 236-243.
- Rodríguez, P. (2017). *Archivos Digitales Sustentables. Conservación y acceso a las colecciones sonoras y audiovisuales para las sociedades del futuro*. doi:10.22201/iibi.9786070295423e.2017
- Rowhani, P., Lobell, D. B., Linderman, M., & Ramankutty, N. (2011). Climate variability and crop production in Tanzania. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 449-460.
- Saei, M., Mohammadi, H., Ziaee, S., & Barkhordari, S. (2019). The Impact of Climate Change on Grain Yield and Yield Variability in Iran. *Iran. Econ. Rev.*, 23(2), 509-531.
- Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. (14 de Septiembre de 2017). *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. Parte II*. Recuperado el 7 de Noviembre de 2020, de https://www.inforural.com.mx/wp-content/uploads/2017/12/Planeaci_n_Agr_ola_Nacional_2017-2030-_parte_dos.pdf
- SIAP. (s.f.). *Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera*. Recuperado el Mayo de 2020, de <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>
- Suchánková, T., & Bezděkovská, R. (2012). Crop production function - study. *Proceedings of 30th International Conference Mathematical Methods in Economics*, (págs. 842-847).
- Xin, X., Lin, T., Liu, X., Wan, G., & Zhang, Y. (2013). The impacts of climate change. *Asian Development Bank*, 434-458.