

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL MAÍZ EN EL ESTADO DE JALISCO, MÉXICO

Climate Change Effects on Maize Potential Distribution in Jalisco State, Mexico

Tinoco-Rueda, J. A.^{1‡}, Gómez-Díaz, J. D.¹ y Monterroso-Rivas, A. I.¹

RESUMEN

El cambio climático global es un fenómeno que podría modificar la producción y la distribución de las especies vegetales. En la presente investigación se realizó una zonificación agroecológica para simular la distribución potencial del maíz en el estado de Jalisco en el periodo primavera-verano, para ello se analizó la temperatura atmosférica, la humedad disponible en el suelo, el tipo de suelo y la pendiente del terreno. Se evaluaron tres periodos de tiempo: la línea base (1961-1990) y dos modelos de cambio climático (GFDL-TR-90 y HADLEY-TR-00) para el horizonte de tiempo 2050 que comprende el periodo 2041-2060, y bajo el supuesto socioeconómico A2, que establece un crecimiento poblacional fuerte y un desarrollo económico lento. Los principales resultados muestran un incremento en la superficie no apta para el cultivo del maíz en 63.6% para el modelo GFDL y en 90.8% para el modelo HADLEY. Las zonas centro, norte y este del estado son las que registran los cambios de mayor magnitud. La disponibilidad de humedad en el suelo es el factor que se ubica como el componente limitante para el desarrollo del cultivo.

Palabras clave: calentamiento global, balance de humedad, zonificación agroecológica, uso consuntivo.

SUMMARY

Climate change could modify the plant production and distribution. The present research evaluates the potential distribution of maize in Jalisco state for the period spring-summer, the factors used were temperature, soil water available, soil type and land slope. Three

scenarios were evaluated, baseline (1961-1990) and the general circulation models GFDL-TR-90 and HADLEY-TR-00 for the A2 scenario and the time period 2050. Main results show an increment in no suitable surface for maize in 63.6% with GFDL model and in 90.8% with HADLEY model, the sites with more changes in maize distribution were in center, north and east of Jalisco. The comparisons between the actual and future conditions in the behavior of four environmental factors conclude that the limiting component was the soil moisture storage for maize distribution.

Index words: global warming, land evaluation, water balance, water requirements.

INTRODUCCIÓN

La producción nacional de grano de maíz en México en el año 2008 fue de 24.4×10^6 Mg en 7.9 millones de hectáreas, de las cuales 81% se sembraron bajo temporal. Para este mismo periodo el estado de Jalisco ocupó el segundo lugar a nivel nacional en producción de esta gramínea con 3.2×10^6 Mg que equivalen al 13.1% del total nacional, por su parte la superficie sembrada en la entidad fue de 606 mil ha, situación que ubica a Jalisco en el tercer lugar a nivel nacional (SAGARPA, 2009). Los municipios con mayor potencial productivo para esta especie son Zapopan, Ixtlahuacán del Río, Zapotlanejo, Tlajomulco y Ayutla (INIFAP, 2007).

Las zonas productoras de maíz para grano abierto son vulnerables a la variabilidad climática de la región en donde se encuentren, por lo que los cambios en las condiciones climáticas repercuten directamente en la calidad y cantidad de la cosecha (Velázquez, 2002; Betanzos *et al.*, 2009; Terrazas *et al.*, 2010). La superficie nacional siniestrada para el cultivo de maíz grano reportada en el año 1997 fue de 1.7×10^6 ha, que representan el 18.6% de la superficie total sembrada en el mismo periodo. Cabe resaltar que 1997 ha sido el año en donde se ha registrado la mayor superficie siniestrada para este cultivo desde 1990 a la fecha (SAGARPA,

¹ Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, estado de México.

[‡] Autor responsable (tinoco@correo.chapingo.mx)

2009). En este mismo periodo se presentó el fenómeno llamado ENSO (El Niño Southern Oscillation), el cual modifica las condiciones promedio de la temperatura y precipitación en la región norte del Pacífico oriental ocasionando inviernos más fríos y más húmedos así como veranos más cálidos y más secos en el territorio mexicano; la presencia del ENSO en este año se correlaciona con el incremento en la superficie siniestrada registrada en el mismo periodo (Magaña, 2004; Conde *et al.*, 2004). Además de la variabilidad climática natural, las zonas productoras de maíz en México son vulnerables al cambio climático originado por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera (INE, 2006).

Algunos de los efectos directos del cambio climático en el sector agrícola son la modificación del régimen pluviométrico, cambios en la velocidad y ocurrencia de vientos, aumento de horas calor, y aumento de la desertificación (ST-CICC, 2008); sin embargo, una predicción precisa es difícil de obtener ya que los modelos generales de circulación atmosférica desarrollados actualmente difieren en sus estimaciones de los cambios en las variables climáticas a futuro (Nakicenovic y Swart, 2000). La agricultura es vulnerable y promotora del cambio climático, ya que esta actividad libera a la atmósfera aproximadamente el 7.0% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero a nivel nacional, las cuales se encuentran principalmente en la quema de la vegetación nativa para la limpieza y preparación de terrenos agrícolas, la descomposición anaeróbica de materia orgánica en arrozales anegados y el uso de fertilizantes agrícolas, entre otras actividades (CICC, 2007). Otras investigaciones que demuestran la vulnerabilidad del cultivo del maíz ante el calentamiento global son las realizadas por Abraha y Savage, 2006; Walker y Schulze, 2008; Meza y Silva, 2009 y McDonald *et al.*, 2009.

Para el caso de México, Flores *et al.* (2003) estiman una disminución a nivel nacional de 300 000 km² de la superficie apta para el desarrollo del maíz al aplicar los modelos de cambio climático GFDL-R30 y CGCM2. Por su parte INE (2006) establece que se espera una disminución en la aptitud del maíz, en especial en el estado de Sonora, aplicando las salidas del modelo HADLEY al escenario A2 para el horizonte de tiempo 2050, por el contrario el modelo GFDL establece que en gran parte del país no habrá cambios en la aptitud del cultivo y en los estados de la zona noroeste (Baja California, Baja California Sur y Sonora) aumentarán

las condiciones favorables para el maíz. En la última comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (INE, 2010), se reporta una reducción promedio en la duración del ciclo fenológico del maíz de otoño-invierno en el Distrito de Riego río Fuerte del 4, 7 y 13% para los años 2020, 2050 y 2080, con respecto a las condiciones actuales.

Estos resultados demuestran la importancia de conocer los posibles impactos del cambio climático sobre la distribución de cultivos prioritarios como es el maíz; sin embargo, la mayoría de las investigaciones realizadas han sido a nivel nacional lo que genera un problema al momento de tomar decisiones en los niveles estatales o municipales, por lo que se necesita detallar las variables biofísicas para así obtener productos que brinden una mayor confiabilidad al momento de aplicar los modelos de cambio climático. Es por lo anterior que el objetivo principal del presente estudio fue identificar las áreas del estado de Jalisco que podrían presentar modificaciones en la aptitud del maíz al aplicar las tasas de cambio de dos modelos generales de circulación atmosférica al horizonte de tiempo 2050.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Área de Estudio

El estado de Jalisco se localiza en la región oeste de México, entre las coordenadas máximas 22° 45' 36" y 18° 55' 12" N, y 105° 42' 36" y 101° 30' 00" O. Presenta colindancias con los estados de Nayarit, Zacatecas y Aguascalientes al norte, con Guanajuato al este, con los estados de Colima y Michoacán al sur; y con el Océano Pacífico al oeste. La superficie total de la entidad es de 80 137 km² los cuales están divididos en 125 municipios (INEGI, 2009).

Línea Base de Variables Climáticas

La línea base de variables climáticas es el periodo de referencia sobre el cual los modelos de cambio climático son calculados. Como lo establece Nakicenovic y Swart (2000) el periodo de tiempo de los datos meteorológicos utilizados para desarrollar la línea base fue de 1961 a 1990. Para ello se delimitaron áreas de influencia climática mediante el trazo de isoyetas e isothermas conforme la metodología de Gómez *et al.* (2008), para lo cual se utilizaron los registros diarios

de temperatura y precipitación mensual reportados por el sistema CLICOM (CONAGUA, 2006) de 567 estaciones meteorológicas, así como modelos digitales de elevación (INEGI, 2007) e imágenes satelitales en falso color. Se realizó un tratamiento previo a los datos de las estaciones meteorológicas el cual consistió en excluir los registros que tuvieran menos de 15 años de información, o bien, que reportaran menos del 50% de datos en el registro histórico de cada estación meteorológica.

Aplicación de Modelos de Cambio Climático

Se utilizaron las tasas de cambio desarrolladas por Conde *et al.* (2008) para los modelos generales de circulación atmosférica GFDL-TR-90 y HADLEY-TR-00 para el escenario socioeconómico A2 que establece un crecimiento poblacional fuerte y un desarrollo económico lento, y al horizonte de tiempo 2050. Estas tasas de cambio fueron integradas como coberturas geo-referenciadas a un sistema de información geográfica, para posteriormente sobreponerlas a los registros de temperatura y precipitación de la línea base climática y así obtener los valores a futuro de estas variables climáticas. Se seleccionó el horizonte de tiempo 2050 ya que en la Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (INE, 2010) se aplicaron los modelos de cambio climático para este periodo, con lo cual los resultados obtenidos en la presente investigación pueden ser analizados con los estudios realizados a nivel nacional.

Requerimientos Ambientales del Maíz

Se realizó una revisión bibliográfica para obtener los niveles limitantes de cuatro factores ambientales (temperatura, humedad del suelo, características del suelo y pendiente del terreno) que intervienen en el desarrollo del cultivo de maíz. Los datos se clasificaron en cuatro intervalos de aptitud: apto, moderadamente apto, marginalmente apto y no apto.

Uso Consuntivo del Maíz

Se obtuvo la demanda de agua mensual del cultivo de maíz en el periodo primavera-verano tanto para la línea base como para los dos modelos de cambio climático mediante el método de Blaney y Criddle (Aguilera

y Martínez, 1996). Este método requiere como información base a la temperatura media mensual, la latitud del sitio y el coeficiente de crecimiento de la especie. El volumen de demanda de agua total en el periodo expresado en porcentaje se clasificó en cuatro categorías para acoplarlas a los niveles de aptitud (apto $\geq 100\%$; moderadamente apto = 100-85%; marginalmente apto = 85-65% y no apto $\leq 65\%$).

Humedad Almacenada en el Suelo

El contenido de humedad almacenada en el suelo (oferta hídrica) se calculó mediante un balance de humedad conforme el método Thornthwaite modificado versión III (Estrada Berg *et al.*, 2008), para lo cual se requiere información del tipo de vegetación, la textura del suelo, así como la temperatura y precipitación mensual. Como resultado del balance de humedad se encuentra el almacenaje de agua en el suelo, los valores de esta variable fueron comparados con el uso consuntivo de la especie para observar periodos de déficit de agua.

Cartografía de la Distribución Potencial

Para obtener la cartografía potencial del maíz en cada uno de los tres escenarios evaluados (línea base, GFDL-A2-2050 y HADLEY-A2-2050), se elaboró la cartografía de los cuatro factores ambientales (temperatura, humedad del suelo, características del suelo y pendiente del terreno). Con la ayuda del programa ArcGIS 9.3^{MR} se sobrepusieron los mapas generados, resultando con esto el mapa final de aptitud, el cual se clasificó con base en las categorías: apto, moderadamente apto, marginalmente apto y no apto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Línea Base de Variables Climáticas

Las isotermas anuales se presentan en la Figura 1a. La zona con menor temperatura media anual presenta valores entre los 2 y 3 °C, localizándose al sur del estado de Jalisco en la cima del volcán de fuego. Por el contrario las zonas que presentan las mayores temperaturas medias anuales (28 a 29 °C) se ubican al sur en los límites con el estado de Michoacán, ubicadas en parte de los municipios de Jilotlán de los Dolores y Tecalitlán.

El resultado del trazo de las isoyetas, como se observa en la Figura 1b, muestra que existe un amplio

intervalo en la distribución de la lluvia en el estado de Jalisco ya que se presentan valores desde los 400 hasta los 2000 mm de precipitación media anual. Los sistemas de vientos y fenómenos meteorológicos responsables del aporte de lluvia en la entidad son el monzón mexicano y el monzón de norteamérica, las ondas del este, los huracanes y los nortes. Las zonas con mayor lámina de lluvia (1800 a 2000 mm) se localizan en la parte oeste del Estado, debido a que el viento proveniente del Océano Pacífico es forzado a elevarse por efecto de la topografía y por consecuencia a enfriarse y condensarse; por su parte las zonas con menor precipitación (400 a 500 mm) se ubican en el centro y este de la entidad, comprendiendo parte de los municipios de Zacoalco de Torres, Teocuitatlán de Corona, Acatlán de Juárez y Ojuelos de Jalisco.

Al sobreponer los mapas de isoyetas e isotermas, se obtuvieron un total de 662 áreas de influencia climática (AIC), a cada AIC se le asignó su respectiva base de datos de temperaturas y precipitaciones media mensuales.

Aplicación de Modelos de Cambio Climático

Las condiciones climáticas resultantes al aplicar las tasas de cambio para el año 2050, se caracterizan por un incremento en la temperatura media mensual y por ende en la media anual en el estado de Jalisco. El modelo GFDL establece un incremento en 1.3 °C en promedio anual y por su parte el modelo HADLEY presenta aumento en 1.8 °C para esta misma variable. La precipitación media anual disminuye en 0.6% con el modelo GFDL y en 3.3% con el modelo HADLEY para todo el territorio de la entidad. En la Figura 2 se presenta la gráfica ombrotérmica con los valores promedio para el estado de Jalisco en los tres escenarios evaluados.

Requerimientos Ambientales del Maíz

El maíz es una especie de tipo fotosintético C4, en general está adaptada a crecer en regiones tropicales, subtropicales y templadas (SAGARPA, 2009). Ortíz (1987) establece como 12 °C de temperatura media

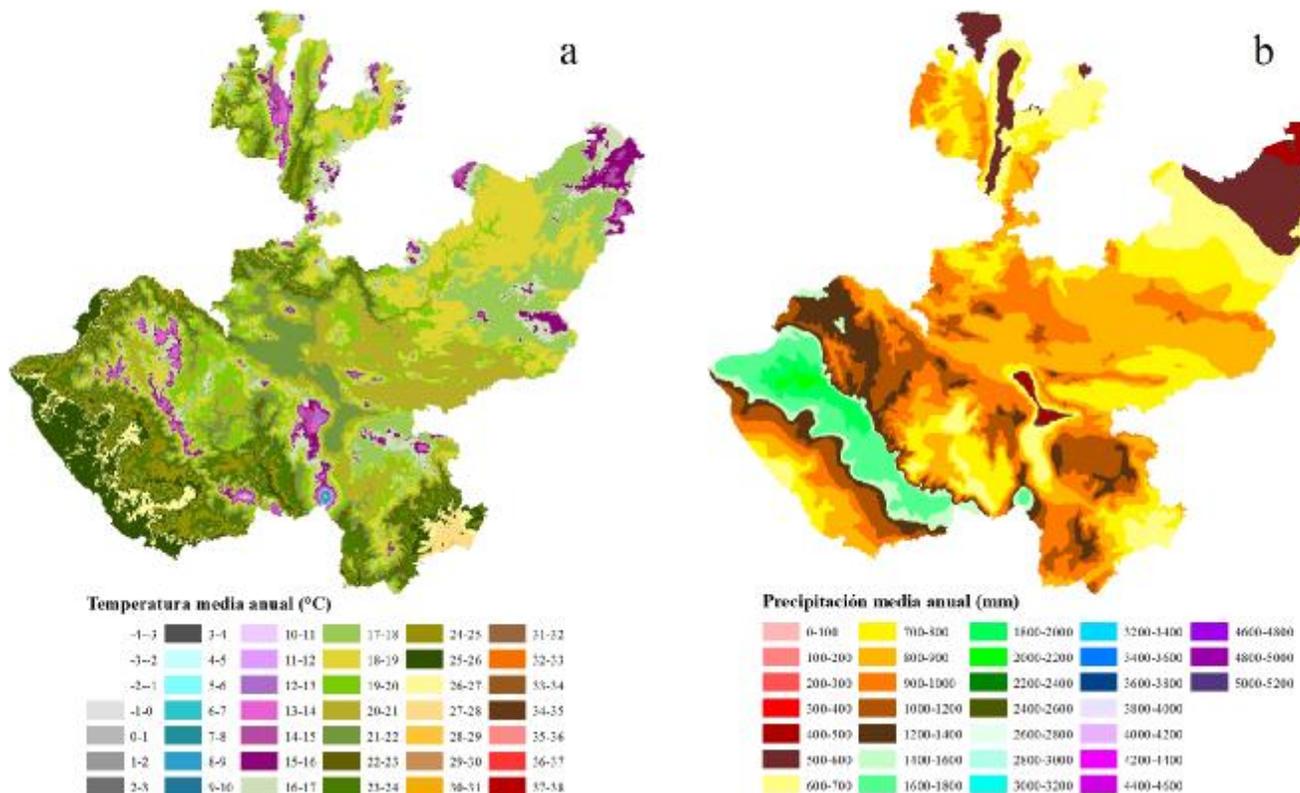


Figura 1. Distribución espacial de la temperatura media anual (a) y la precipitación media anual (b)

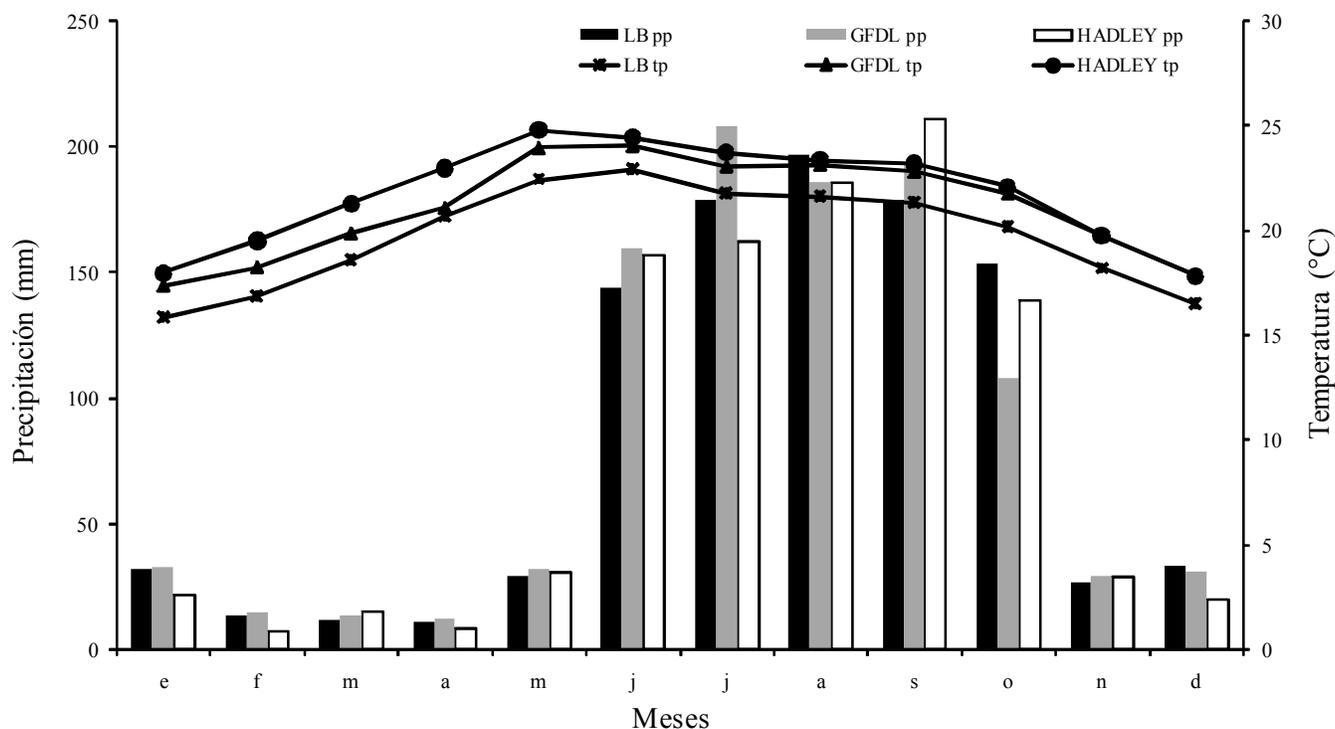


Figura 2. Temperatura (tp) y precipitación (pp) media mensual para el estado de Jalisco en los tres escenarios evaluados: línea base (LB), GFDL-TR-90 (GFDL) y HADLEY-TR-00 (HADLEY)

anual el límite para el óptimo desarrollo de la especie. Los tipos de suelo con mayor potencial para el cultivo del maíz reportados por FAO (1997) son el vertisol, cambisol, feozem, fluvisol, entre otros; por el contrario los tipos xerosol, yermosol, gleysol y solonetz son los que presentan severas características para el desarrollo de la especie. Con respecto a la pendiente, Sys *et al.* (1991) reportan que terrenos con más del 30% de pendiente no son aptos para el cultivo del maíz y el rango de 0 a 8% son los mejores. En el Cuadro 1 se presentan los diferentes intervalos de aptitud para los factores: tipo de suelo, fase física y química del suelo así como la pendiente del terreno.

Uso Consuntivo del Maíz

En los tres escenarios, el uso consuntivo del maíz se encuentra entre el rango de 300 y 900 mm de agua total para el periodo primavera-verano. Para la línea base el rango de 600 a 700 mm es el que predomina ya que se distribuye en el 59.7% del estado. La zona en donde se presenta la menor demanda de agua por parte del cultivo es la cima del volcán de fuego de colima con un rango de 300 a 400 mm, por el contrario la región que se encuentra entre la línea costera y las laderas de

las elevaciones montañosas al oeste, es en donde se encuentran los valores máximos de uso consuntivo (800 a 900 mm).

Para el modelo GFDL-TR-90 la demanda de agua del maíz se incrementa en todo el territorio de la entidad en comparación con la línea base, el rango de 700 a 800 mm es ahora el que predomina con el 45.9% del territorio total, los incrementos más significativos se presentan en la parte centro y al norte del lago de Chapala. Para el caso del modelo HADLEY-TR-00 el incremento de la demanda de agua del cultivo es aun mayor. Al igual que en el modelo GFDL, en este escenario el rango de 700 a 800 mm sigue siendo el que ocupa la mayor superficie con el 47.6% del área total, las zonas en donde se perciben los mayores incrementos en la demanda de agua en comparación con la línea base son la centro y noreste de Jalisco.

Humedad Almacenada en el Suelo

En el Cuadro 2 se presentan algunas de las variables del balance de humedad. Se observa un incremento en la evapotranspiración actual (ETA) al aplicar los modelos de cambio climático debido principalmente al incremento de la temperatura mensual en todo el estado, para

Cuadro 1. Requerimientos ambientales para la distribución del maíz (*Zea mays* L.).

Variable	Nivel de aptitud [†]			
	Apto	Moderadamente apto	Marginalmente apto	No apto
Tipo de suelos	vertisol, cambisol, chernozem, feozem, fluvisol, castañozem, luvisol, regosol, planosol, andosol, rendzina	acrisol	arenosol	xerosol, yermosol, gleysol, solonetz, litosol, solonchak
Fase física		dúrica profunda, lítica profunda, petrocálcica profunda, petrogypsica profunda	dúrica, concrecionaria, gravosa, lítica, petrocálcica, petrogypsica, pedregosa	
Fase química			sódica, salina	fuertemente sódica, fuertemente salina
Pendiente (%)	0 - 8	8 - 16	16 - 30	> 30

[†] Adaptado por los autores a partir de: Ortíz (1987), FAO (1997) y Sys *et al.* (1991).

el modelo GFDL se presenta un aumento en la ETA del 4% y para el modelo HADLEY del 3.5% con respecto a la línea base.

El escurrimiento medio anual por el contrario disminuye en 17.8 y 26.8% en los modelos GFDL y HADLEY respectivamente. Similar al escurrimiento, la humedad almacenada en el suelo también presenta decrementos al aplicar ambos modelos de cambio climático, con el GFDL disminuye 10.7% con respecto a lo registrado en la línea base y con el modelo HADLEY 18%, los cambios en la lámina de agua, tanto en el escurrimiento como en el almacenaje, se deben al incremento en la demanda evapotranspirativa y a la disminución de la precipitación.

Cartografía de la Distribución Potencial

En la distribución potencial del maíz para la línea base predomina la categoría moderadamente apta la cual

ocupa una superficie de 32 699.2 km² que corresponde al 41.9% del territorio, por el contrario la categoría no apta es la que menor superficie ocupa con 11 585.0 km² que equivalen al 14.9% de la entidad, las categorías apta y marginalmente apta se distribuyen en el 24.6 y 18.6% del estado respectivamente. Para los modelos de cambio climático las categorías apto, moderadamente apto y marginalmente apto disminuyen y por el contrario la categoría no apta aumenta su superficie. Para el modelo GFDL-TR-90 la categoría apta disminuye en un 13.6% con respecto a la línea base, la categoría moderadamente apta pasa de un 24.6 a un 21.3% y el nivel marginalmente apto presenta un decremento del 21.2%. Por su parte con el modelo HADLEY-TR-00 se presenta una merma del 21.6% para la categoría apta, y una disminución del 11.6 y 17.8% para los niveles moderadamente apto y marginalmente apto respectivamente. La superficie no apta se incrementa en 63.6% para el modelo GFDL y en 90.8% bajo el modelo HADLEY.

Cuadro 2. Variables del balance de humedad en el estado de Jalisco para la línea base y bajo modelos de cambio climático al año 2050.

Escenario	Precipitación	Evapotranspiración actual	Escurrimiento	Almacenaje de humedad en el suelo
	----- mm año ⁻¹ -----			
Línea base	1 007.2	783.4	222.6	2 085.9
GFDL-TR-90 (A2) año 2050	1 000.8	814.9	182.9	1 861.2
HADLEY-TR-00 (A2) año 2050	974.1	811	162.9	1 709.3

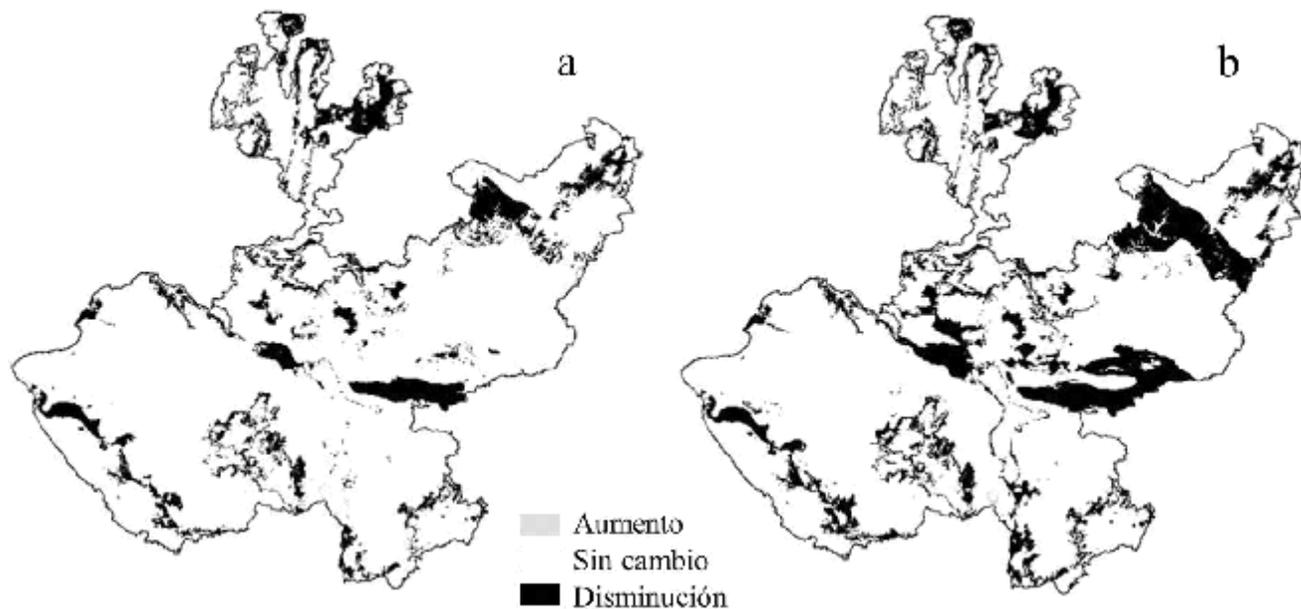


Figura 3. Cambios en la aptitud potencial de maíz con respecto a la línea base bajo los modelos de cambio climático GFDL-TR-90 (a) y HADLEY-TR-00 (b).

La comparación de los cambios en la aptitud potencial del maíz de la línea base contra los dos escenarios con cambio climático se presenta en la Figura 3. Se observa que en el modelo GFDL las zonas que presentan disminuciones en la aptitud para el cultivo ocupan una superficie de 10 586.9 km² que corresponden al 13.6% de la superficie del estado de Jalisco ubicándose principalmente en las regiones centro y norte de la entidad. Por su parte el modelo HADLEY establece una superficie de 15 940.1 km² (20.4%) con mermas en la aptitud del maíz, estos cambios se observan con mayor intensidad en las regiones centro, norte y este del Estado.

CONCLUSIONES

- Los modelos de cambio climático evaluados establecen tasas de cambio diferentes para el periodo de tiempo 2050, lo que refleja la incertidumbre que se obtiene con las salidas de los diferentes modelos generales de circulación atmosférica. El modelo HADLEY es el que estima un panorama más severo ya que establece una disminución del 3.3% en la precipitación media anual.
- Los resultados de las simulaciones en ambos modelos de cambio climático establecen un incremento en la superficie no apta para el desarrollo del maíz, y se identificó a la disponibilidad de humedad en el suelo como

el factor limitante para el desarrollo del cultivo. Por esta razón es necesario modificar el sistema de producción tradicional con prácticas que conserven la humedad en el perfil del suelo.

- Las áreas de cultivo de maíz en el estado de Jalisco más vulnerables al cambio climático son las zonas centro y norte. Estas regiones deben de estar sujetas a protección y conservación especial para evitar la degradación de los terrenos y la disminución de la producción.

LITERATURA CITADA

- Abraha, M. G. and M. J. Savage. 2006. Potential impacts of climate change on the grain yield of maize for the midlands of KwaZulu-Natal, South Africa. *Agric. Ecosyst. Environ.* 115: 150-160.
- Aguilera, M. y R. Martínez. 1996. Relaciones agua-suelo-planta-atmósfera. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Betanzos, E., A. Ramírez, B. Coutiño, N. Espinosa, M. Sierra, A. Zambada y M. Grajales. 2009. Híbridos de maíz resistentes a la pudrición de mazorca en Chiapas y Veracruz, México. *Agricultura Técnica en México* 35: 389-398
- CICC (Comisión Intersecretarial de Cambio Climático). 2007. Estrategia nacional de cambio climático. México, D. F.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2006. Sistema de información climática CLICOM. México, D. F.
- Conde, C., C. Gay y O. Sánchez. 2008. Escenarios de cambio climático para México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.

- Conde, C., R. M. Ferrer, C. Gay y R. Araujo. 2004. Impactos del cambio climático en la agricultura en México. pp. 225-236. *In*: J. Martínez y A. Fernández. (eds.). Cambio climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F.
- Estrada-Berg, J. B., J. D. Gómez, J. W. Estrada-Berg, A. I. Monterroso y J. A. Tinoco. 2008. El cambio climático en la República Mexicana. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1997. Zonificación agro-ecológica. Guía general. Boletín de suelos de la FAO. Roma, Italia.
- Flores, M., R. Araujo y E. Betancourt. 2003. Vulnerabilidad de las zonas potencialmente aptas para maíz de temporal en México ante el cambio climático. pp. 200-213. *In*: C. Gay (ed.). México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México y US Country Studies Program. México, D. F.
- Gómez, J. D., J. D. Etchevers, A. I. Monterroso, C. Gay, J. Campo, and M. Martínez. 2008. Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera* 21: 35-56.
- INE (Instituto Nacional de Ecología). 2006. Tercera comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F.
- INE (Instituto Nacional de Ecología). 2010. Cuarta comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2007. Continuo de elevaciones Mexicano (CEM). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México, D. F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2009. Marco geoestadístico municipal 2000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México, D. F.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). 2007. Mapa del potencial productivo de maíz y frijol en el estado de Jalisco. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México.
- Magaña R., V. 2004. Los impactos de El Niño en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación. México, D. F.
- McDonald, A., S. Riha, A. DiTommaso, and A. DeGaetano. 2009. Climate change and the geography of weed damage: Analysis of U.S. maize systems suggests the potential for significant range transformations. *Agric. Ecosyst. Environ.* 130: 131-140.
- Meza, F. J. and D. Silva. 2009. Dynamic adaptation of maize and wheat production to climate change. *Clim. Change* 94: 143-156.
- Nakicenovic, N. and R. Swart. 2000. Emissions scenarios. Intergovernmental panel on climate change special report. Cambridge University. UK.
- Ortiz S., C. A. 1987. Elementos de agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la República Mexicana. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2009. Sistema de información agrícola y pecuaria SIAP. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D. F.
- ST-CICC (Sistema Técnico de la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático). 2008. Programa especial de cambio climático. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. México, D. F.
- Sys, C., E. Van Ranst, and J. Debaveye. 1991. Land evaluation. Part 1: Principles in land evaluation and crop production calculations. *Agricultural Publications no. 7*. Brussels, Belgium.
- Terrazas, L., I. Nikolskii, S. S. Herrera, M. Castillo y A. A. Exebio. 2010. Alteración de la fertilidad del suelo y vulnerabilidad de maíz y trigo bajo riego debido al cambio climático. *Tecnol. Cs. Agua* 1: 135-150.
- Velázquez, J. 2002. Agrofenoclimatología. Universidad Autónoma del Estado de México. México, D. F.
- Walker, N. J. and R. E. Schulze. 2008. Climate change impacts on agro-ecosystem sustainability across three climate regions in the maize belt of South Africa. *Agric. Ecosyst. Environ.* 124: 114-124.