

ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD DE LA AGRICULTURA DE MAÍZ DE TEMPORAL MEDIANTE EL MODELO CERES - MAIZE

Cecilia Conde, Rosa Ma. Ferrer* y Diana Liverman**.

Resumen

Existen diferentes modelos agroclimáticos y de simulación del desarrollo de las plantas que pueden utilizarse para evaluar el impacto del cambio climático en la agricultura. En el Estudio de País: México, se empleó el modelo de simulación CERES-Maize.

En la mayoría de los sitios seleccionados en este estudio, los efectos de un cambio climático en los rendimientos de maíz de temporal serían negativos, con acortamientos en la estación de crecimiento del maíz, particularmente en la fase de llenado de grano. Sin embargo, en los sitios con una altura mayor de los 2 000 msnm en el centro de México, los incrementos de temperatura propuestos resultan benéficos, aún en los casos de decrementos en la precipitación.

Al aplicar estudios de sensibilidad, se observó que, en todos los casos, un incremento de precipitación de +20% implicaba una disminución en los rendimientos. Este efecto se debe al lavado de nutrientes del suelo, hecho que se refleja en el aumento en el estrés de nitrógeno durante las diferentes fases de crecimiento de la planta.

En el caso de los sitios ubicados al este del país habría un adelanto de un mes en la sequía intraestival bajo condiciones de cambio climático.

Con el objeto de reducir los impactos del cambio climático, se estudiaron medidas de adaptación como el cambio en la fecha de siembra, el incremento en la aplicación del fertilizante, el cambio en la variedad de las semilla, la aplicación de irrigación y combinaciones de éstas. La más exitosa de estas medidas fue la aplicación de fertilizante, sola o combinada con alguna de las otras propuestas.

A partir del análisis de costos, se determinó la viabilidad de las medidas de adaptación en función de un incremento en los rendimientos, a partir del análisis de costos. Si bien este análisis fue muy simple, se puede observar que en algunos casos dichas medidas implicarían pérdidas económicas para el productor. También se incluye un estudio de costos en el que se considera el retiro del subsidio a los precios del maíz en México, lo que muestra que este cultivo no sería redituable en algunos de los sitios, aún en las condiciones actuales.

Palabras clave: Agricultura de temporal, modelo CERES-Maize, vulnerabilidad, adaptación.

1. Introducción

Los escenarios de cambio climático, generados mediante los Modelos de Circulación General (MCG), suponen una duplicación en la concentración del bióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera. La respuesta de los cultivos a este cambio es variable, pero diferentes experimentos de laboratorio han mostrado un probable efecto fisiológico benéfico ante este incremento del CO_2 (Parry, 1993). En los cultivos de plantas C_3 , por ejemplo el trigo y el arroz que requieren mayores concentraciones de CO_2 para iniciar la síntesis de materia orgánica, se puede esperar una respuesta positiva promedio de 30%. En contraste, en los cultivos de plantas C_4 , como serían el maíz y la caña de azúcar, que son más eficientes en la fijación del CO_2 , se calcula un efecto positivo promedio de 5%. Por otra parte, es importante considerar que las llamadas malezas de las plantas C_4 son del tipo C_3 y viceversa.

Lo anterior, junto con los incrementos de temperatura, mayores conforme aumenta la latitud, podrían propiciar un desplazamiento de las condiciones favorables para la agricultura de cereales hacia las latitudes altas, en un rango de 150 a 200 km, o bien, entre 150 y 200 metros más en altura. No obstante, el desarrollo de los cultivos quedaría aún condicionado por las variaciones ambientales, como las que se

* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

** Latin American Center, University of Arizona

proyectan para la precipitación y la radiación solar. Otras limitantes para el desarrollo de los cultivos son los posibles cambios en las características de los suelos, en la disponibilidad del agua, así como en la distribución de las plagas y enfermedades de las plantas (IPCC, 1995).

La agricultura en México es vulnerable a las variaciones climáticas extremas, como son las sequías, las inundaciones y las heladas, debido a que se desarrolla fundamentalmente bajo condiciones de temporal.

El cultivo de maíz de temporal se realiza prácticamente en todo el país, aún en aquellas zonas con climas, suelos o pendientes no propicios. Contrasta con lo anterior el alto consumo del maíz como alimento básico en la mayor parte de la población (Liverman, 1994), tanto rural como urbana (250 kg por habitante/ año).

2. Modelo empleado

El modelo CERES - Maize (Jones, *et al.*, 1986; Ritchie, *et al.*, 1989) simula los incrementos diarios de crecimiento, desarrollo y producción del cultivo del maíz. Puede utilizarse para la toma de decisiones en el manejo de los cultivos y en el análisis de riesgo

Para simular el crecimiento, el desarrollo y la producción del maíz, el modelo considera los siguientes procesos:

- El desarrollo fenológico, especialmente la forma en que es afectado por las características genéticas y los factores climáticos.
- La extensión del crecimiento de hojas, tallos y raíces.
- La acumulación de biomasa, especialmente la manera en que el desarrollo fenológico afecta el desarrollo de los órganos vegetativos y reproductivos.
- El balance del agua del suelo y el uso del agua por el cultivo.
- Las transformaciones del nitrógeno del suelo y su incorporación por las diferentes partes de la planta.

El modelo está diseñado para simular los efectos del clima y los cambios en el manejo del cultivo.

Para la construcción del *escenario base*, el modelo requiere de bases de datos de clima, de suelo, de manejo de cultivo y de las variedades de maíz empleadas, con el objeto de simular la producción real (fig. 1). El modelo caracteriza a las diferentes variedades de maíz, mediante cinco coeficientes genéticos (P1, P2, P5, G2, G5), dos de ellos se pueden calcular a partir de los parámetros climáticos y los tres restantes se ajustan por medio de pruebas de ensayo y error, hasta obtener la fenología y rendimientos esperados para cada variedad.

MODELO CERES - Maize

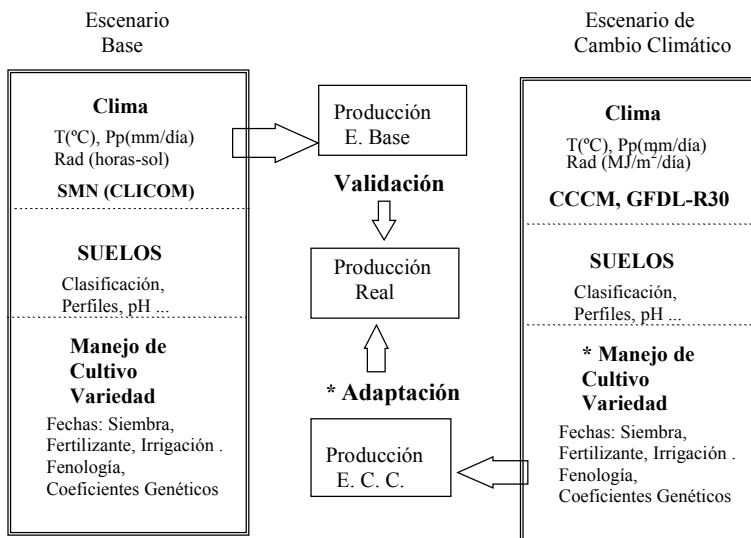


Figura 1. Esquema que describe al modelo CERES-Maize. A la izquierda se ilustran los archivos de entrada para construir el escenario base. A la derecha se muestran los correspondientes para construir escenarios de cambio climático. Al centro, las simulaciones de producción de maíz, que deben ser contrastadas con la producción real.

La comparación entre la producción simulada y la real permite calibrar el modelo antes de introducir las condiciones de cambio climático. O bien, es posible realizar estudios de sensibilidad, proponiendo incrementos tales en temperatura y precipitación que permitan analizar la capacidad de respuesta del cultivo a dichos cambios.

En la figura 1 se observa que la construcción del escenario de cambio climático se basa en la introducción de las modificaciones propuestas por los modelos CCC y GFDL-R30 (Magaña, *et al.*, en este volumen), bajo condiciones de una duplicación de bióxido de carbono. Los otros archivos de entrada (suelos, manejo de cultivos, entre otros) se mantienen sin cambios.

La diferencia observada entre la simulación de la producción real y la obtenida por un cambio climático, representa la medida del impacto que puede tener dicho cambio en la producción agrícola para el sitio seleccionado.

El modelo también permite sugerir medidas de adaptación, al variar las condiciones del manejo de cultivo y/o proponiendo un cambio en la variedad de la semilla empleada.

Para el estudio de los efectos de un cambio climático en la producción de maíz se utilizan dos tipos de escenarios: Uno con incrementos arbitrarios, contruidos mediante el aumento de temperatura de 2 y 4°C, y modificaciones en la precipitación de $\pm 20\%$, así como combinaciones de éstos. El segundo tipo de escenarios corresponde a las salidas generadas por dos modelos de circulación general GFDL-R30 y CCC. En el marco de estos escenarios se puede o no incluir el efecto fisiológico que la duplicación de CO₂ tiene sobre el cultivo.

Los datos diarios de temperaturas máxima y mínima así como de precipitación, se obtuvieron del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que utiliza el sistema CLICOM. Los datos de la radiación solar se calculan a partir de las horas sol, proporcionadas por el mismo SMN. Cuando sólo se tienen datos promedios mensuales, se utiliza el programa WFORM para generar los diarios.

3. Selección de sitios estudiados

En el cuadro 1 y en la figura 2 se muestran los siete sitios estudiados, indicando el estado del país al que corresponden, su latitud, longitud y altitud. También se señala la serie de tiempo disponible en cada caso.

Los estados citados en el cuadro 1 representan los de mayor productividad del país en la producción de maíz, razón por la cual se seleccionaron sitios representativos de su producción. El cuadro 2 muestra el lugar que ocuparon dichos estados en la producción nacional de maíz en el año de 1993, aunque desde hace dos décadas están en los primeros lugares en la producción. Se seleccionaron sólo sitios de maíz de temporal, para el ciclo primavera-verano.

Cabe señalar que en el caso de Puebla se eligieron algunos sitios con bajos rendimientos, con el objeto de analizar el impacto del cambio climático en áreas de cultivo para el autoconsumo.

Cuadro 1. Ubicación, altura y series de tiempo de los sitios seleccionados.

SITIO	ESTADO	LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE	ALTITUD (msnm)	AÑOS
Atacomulco	México	19° 49'	99° 42'	2 520	1961-1974
Izúcar	Puebla	18° 37'	98° 28'	1 285	1974-1989
Ixcamilpa	Puebla	18° 02'	98° 42'	806	1975-1990
Coatepec	Veracruz	19° 32'	96° 55'	1 110	1967-1985
Tuxpan	Veracruz	20° 57'	97° 24'	25	1971-1988
La Huerta	Jalisco	19° 22'	105° 0'	28	1962-1986
Magdalena	Jalisco	20° 55'	103° 58'	1 359	1961-1988

msnm = metros sobre el nivel del mar

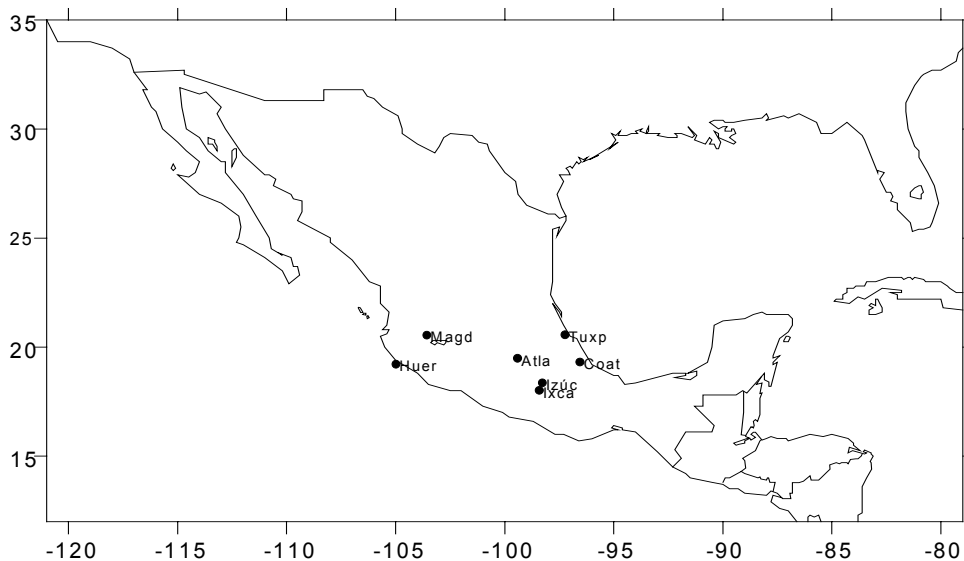


Figura 2. Localización de los sitios de estudio.

Cuadro 2. Estados del país, lugar en la producción nacional e información del cultivo en el ciclo primavera - verano.

ESTADO	LUGAR EN PRODUCCIÓN NAL. (1993)	RÉGIMEN	SEMBRADA (miles ha)	COSECHADA (miles ha)	PRODUCCIÓN (miles ton)
JALISCO	1	RIEGO	39.7	38.2	152.3
		TEMPORAL	641.8	611.3	2 268.9
MÉXICO	2	RIEGO	107.6	102.4	321.5
		TEMPORAL	480.3	466.6	912.0
PUEBLA	4	RIEGO	41.9	41.9	130.3
		TEMPORAL	560.3	498.1	888.5
VERACRUZ	9	RIEGO	5.1	4.3	14.4
		TEMPORAL	482.0	401.4	765.5

4. Escenarios base y de cambio climático

Con los datos diarios de temperaturas máxima y mínima, precipitación y horas sol (convertidas a MJ/m²/día), se calcularon para todos los sitios los promedios mensuales para las series de tiempo mostradas en el cuadro 1. Esto permitió construir el escenario climático base (fig. 3) para cada sitio.

Para los estados de México, Puebla y Veracruz es notorio el fenómeno de sequía intraestival. A excepción de La Huerta, el valor más alto de la temperatura máxima se presenta antes del periodo de lluvias y alcanza valores cercanos al crítico en el rango que se considera óptimo para el desarrollo de la planta. En los sitios en los que este valor se aproxima a 34°C, un cambio climático como el propuesto por los modelos, difícilmente permitiría la producción de maíz.

Muchas de las semillas empleadas en México están adaptadas tanto a la sequía intraestival como a rangos de temperatura más amplios que las variedades de otras regiones. Lo anterior se debe considerar para las propuestas de cambio en fecha de siembra o cambio en la variedad, como medidas de adaptación.

Se generaron escenarios de cambio climático de dos formas: con incrementos de temperatura de +2 y +4°C y de precipitación de ±20% y combinaciones de éstos. Los efectos de estos cambios se analizan en los estudios de sensibilidad que se muestran en la siguiente sección. La segunda forma fue utilizar las simulaciones de dos modelos de circulación general: GFDL-R30 y CCC (Conde, *et al.*, 1997).

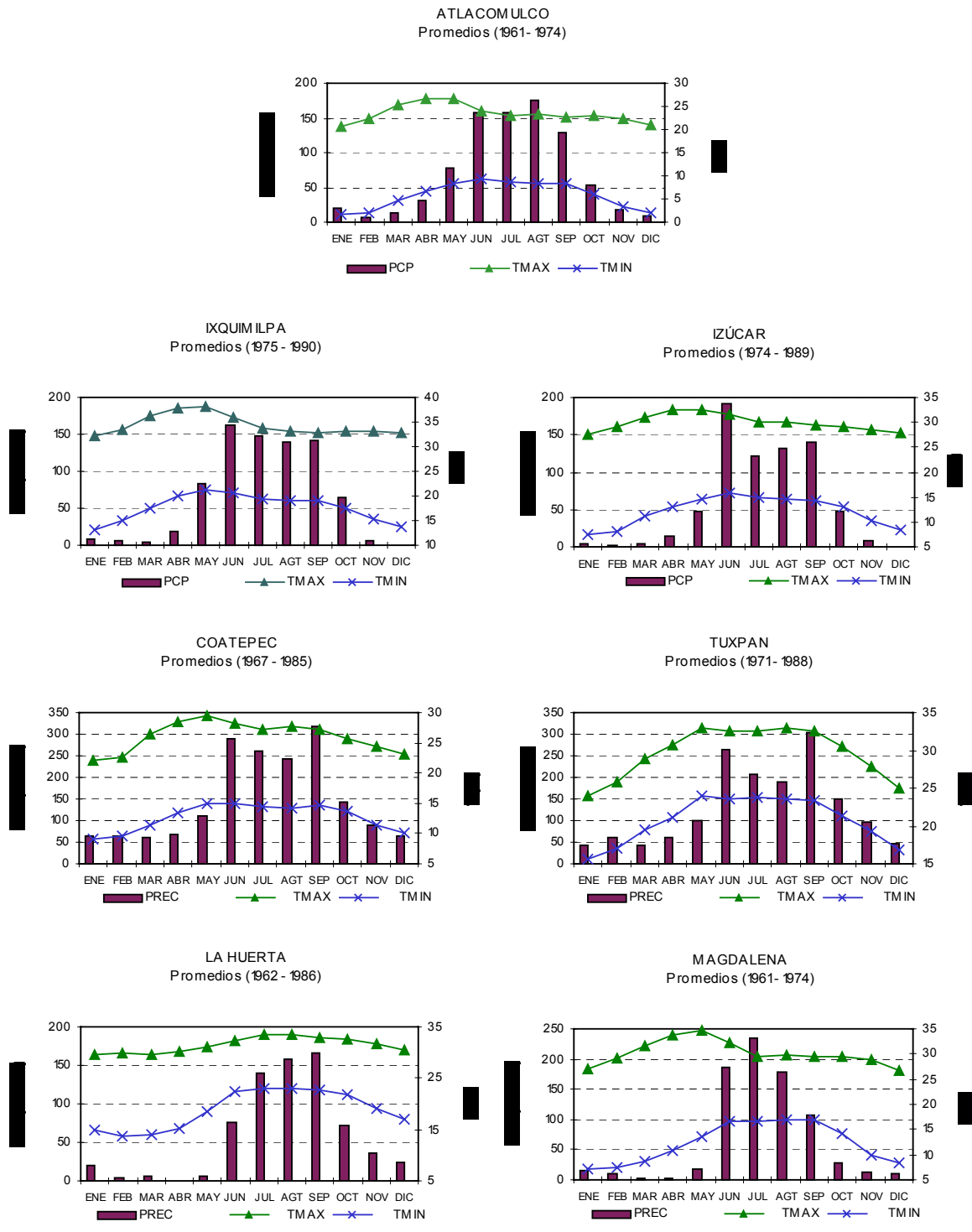


Figura. 3. Climatología de los sitios de estudio.

Las variaciones en la temperatura, la precipitación y la radiación solar de los modelos aquí utilizados se muestran en los cuadros 3, 4 y 5.

Cuadro 3. Incrementos en temperatura (°C) para cada sitio, según los Modelos de Circulación General.

	ATLA		IZÚC		IXCA		COAT		TUXP		HUER		MAGD	
	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC
ENE	3.6	1.5	2.4	1.6	2.4	1.6	2.4	1.4	2.2	1.4	3.8	1.9	4.0	1.9
FEB	3.2	1.9	2.9	1.6	2.9	1.6	2.9	1.7	3.0	1.7	3.3	1.9	3.7	1.9
MAR	3.6	2.0	3.0	1.6	3.0	1.6	3.0	1.7	2.9	1.7	3.4	2.0	4.1	2.0
ABR	3.2	2.4	3.0	1.9	3.0	1.9	3.0	2.7	3.0	2.7	2.4	2.1	2.9	2.1
MAY	2.4	2.3	2.1	1.9	2.1	1.9	2.1	2.3	2.4	2.3	2.5	2.1	2.5	2.1
JUN	2.7	1.9	2.7	1.8	2.7	1.8	2.7	1.5	2.7	1.5	2.6	2.0	2.4	2.0
JUL	2.1	2.1	2.5	1.7	2.5	1.7	2.5	1.9	2.9	1.9	2.3	2.2	1.9	2.2
AG	2.3	2.4	2.6	2.0	2.6	2.0	2.6	2.3	3.2	2.3	2.4	2.4	2.1	2.4
SEPT	2.5	2.4	2.7	2.0	2.7	2.0	2.7	2.4	3.2	2.4	2.5	2.3	2.3	2.3
OCT	2.5	2.7	2.6	2.2	2.6	2.2	2.6	2.9	3.0	2.9	2.8	2.1	2.7	2.1
NOV	2.6	2.3	2.6	2.2	2.6	2.2	2.6	2.2	3.3	2.2	2.4	2.1	2.7	2.1
DIC	3.8	1.8	3.2	1.8	3.2	1.8	3.2	1.6	3.3	1.6	3.6	1.9	3.7	1.9

Cuadro 4. Razón de cambio para la precipitación para cada sitio, según los Modelos de Circulación General.

	ATLA		IZÚC		IXCA		COAT		TUXP		HUER		MAGD	
	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC
ENE	1.44	0.70	1.64	1.04	1.64	1.04	1.64	0.83	1.41	0.83	1.01	0.60	1.07	0.60
FEB	0.88	0.97	0.84	0.99	0.84	0.99	0.84	0.77	0.92	0.77	0.72	0.91	0.79	0.91
MAR	1.36	0.72	1.27	1.16	1.27	1.16	1.27	0.78	1.35	0.78	0.76	0.66	1.07	0.66
ABR	1.15	1.12	1.03	1.44	1.03	1.44	1.03	1.39	0.97	1.39	1.13	0.73	1.12	0.73
MAY	1.22	1.37	1.08	0.95	1.08	0.95	1.08	1.13	1.18	1.13	1.45	1.39	1.44	1.39
JUN	1.42	0.85	1.42	0.66	1.42	0.66	1.42	0.76	1.22	0.76	1.42	1.14	1.18	1.14
JUL	1.25	0.60	1.14	0.64	1.14	0.64	1.14	0.71	1.20	0.71	1.43	0.92	1.40	0.92
AG	1.32	1.04	1.35	0.85	1.35	0.85	1.35	1.07	1.38	1.07	1.23	1.08	1.24	1.08
SEPT	1.29	0.73	1.34	0.73	1.34	0.73	1.34	0.64	1.31	0.64	1.23	0.97	1.29	0.97
OCT	1.02	1.28	1.08	1.31	1.08	1.31	1.08	1.13	0.99	1.13	1.10	1.22	0.98	1.22
NOV	1.19	0.76	1.15	1.00	1.15	1.00	1.15	1.00	1.17	1.00	1.36	0.74	1.35	0.74
DIC	0.98	0.93	1.17	0.95	1.17	0.95	1.17	0.80	1.15	0.80	0.67	1.30	0.85	1.30

Cuadro 5. Razón de cambio para la radiación solar para cada sitio según los Modelos de Circulación General.

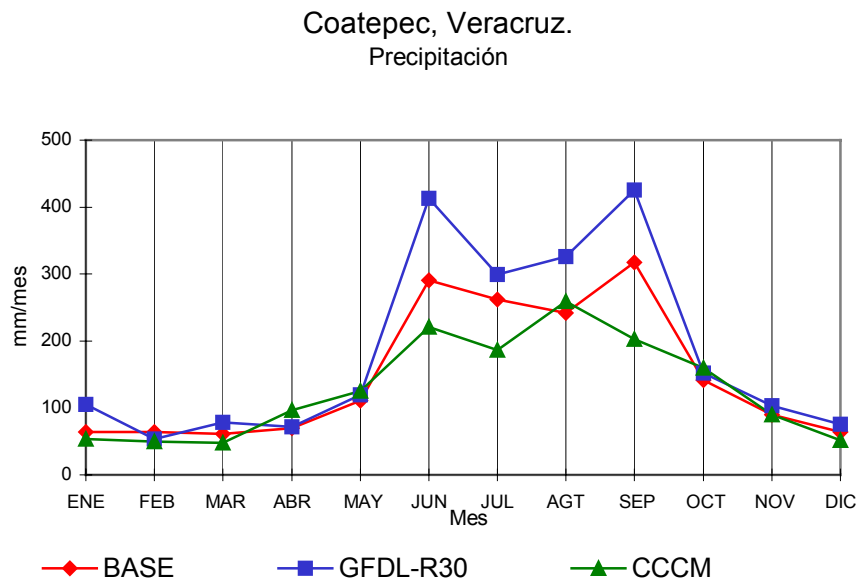
	ATLA		IZÚC		IXCA		COAT		TUXP		HUER		MAGD	
	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC
ENE	1.01	1.02	0.87	1.00	0.87	1.00	0.87	1.12	0.88	1.12	1.05	0.99	1.00	0.99
FEB	1.04	1.00	1.16	0.96	1.16	0.96	1.16	1.04	1.14	1.04	1.04	0.98	1.05	0.98
MAR	0.97	1.03	0.94	1.01	0.94	1.01	0.94	1.10	0.98	1.10	1.01	1.03	1.01	1.03
ABR	1.00	0.95	1.00	0.95	1.00	0.95	1.00	0.94	1.02	0.94	1.01	0.99	1.01	0.99
MAY	1.01	0.93	1.00	0.94	1.00	0.94	1.00	0.93	0.96	0.93	0.99	0.92	0.97	0.92
JUN	0.89	0.99	0.96	0.98	0.96	0.98	0.96	1.05	1.00	1.05	0.94	0.87	0.95	0.87

JUL	0.96	1.10	0.99	1.08	0.99	1.08	0.99	1.05	0.90	1.05	0.98	0.98	0.85	0.98
AG	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.94	0.99	0.94	0.88	0.93	0.94	0.93
SEPT	0.93	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99	0.98	1.05	1.06	1.05	0.96	0.93	0.95	0.93
OCT	0.93	0.90	1.18	0.94	1.18	0.94	1.18	0.96	1.18	0.96	0.99	0.92	1.01	0.92
NOV	1.03	0.96	0.97	0.94	0.97	0.94	0.97	0.99	1.07	0.99	1.02	0.94	1.02	0.94
DIC	1.03	1.00	0.96	1.00	0.96	1.00	0.98	1.09	0.98	1.09	1.08	0.99	1.03	0.99

El modelo GFDL-R30 propone, en general, incrementos positivos para las tres variables climáticas empleadas, mientras que el CCC sugiere a su vez decrementos en la precipitación y la radiación.

Es importante destacar el efecto que tienen los cambios climáticos proyectados por los modelos en la sequía intraestival en los sitios del estado de Veracruz. El mínimo de precipitación tiene un mes de adelanto con respecto al escenario base (figs. 4 y 5).

Figura. 4a. Modificación del comportamiento de la sequía interestival en Coatepec. El mínimo se presentaría en julio en lugar de agosto (escenario base).



Las estimaciones de los modelos para la temperatura máxima indican que Ixcamilpa, en el estado de Puebla, estaría fuera de los rangos óptimos supuestos para el cultivo de maíz. En contraste, sitios como Atlacomulco, en el Estado de México, resultarían beneficiados en términos de la temperatura mínima, ya que ésta alcanzaría valores por encima de la temperatura base.

Tuxpan, Veracruz
Precipitación

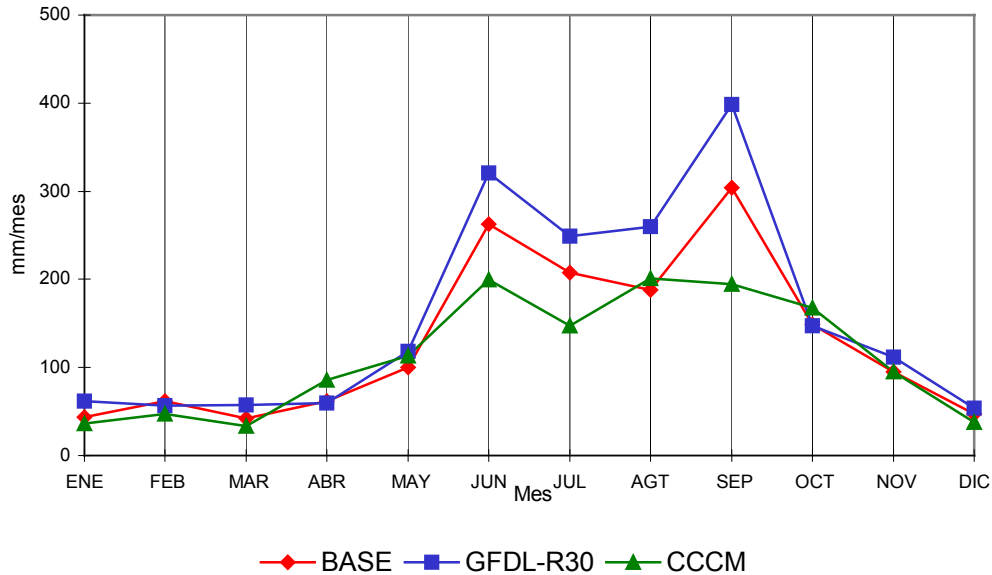


Figura. 4b. Modificación del comportamiento de la sequía interestival en Tuxpan. El mínimo se presentaría en julio en lugar de agosto (escenario base).

5. Resultados

5.1 Vulnerabilidad y adaptación

En México, la producción de maíz de temporal es sumamente vulnerable al cambio climático, en particular, para las condiciones propuestas por el modelo GFDL-R30.

Al Considerar el VII Censo Agrícola-Ganadero (INEGI, 1994), se observa que, si bien en la mayor parte del territorio nacional se siembra maíz, aún en la actualidad en la minoría de esas áreas dedicadas a este cultivo se obtienen rendimientos superiores a dos ton/ha. Se puede afirmar además que esa producción, en buena parte, está dedicada al autoconsumo y que difícilmente habría una relación beneficio costo de 3:1, aún en las zonas más aptas.

De lo anterior podemos concluir que un cambio climático impactaría con dureza a las regiones más pobres del país, en las cuales prácticamente no se invierte en dicho cultivo y se depende plenamente de las condiciones climáticas. En los estudios realizados en este trabajo, el simple cambio en la fecha de siembra (que no tendría costo alguno) no fue como una medida viable para los sitios seleccionados.

5.2. Estudios de sensibilidad

Cuando el escenario base permite reproducir los rendimientos esperados en los sitios de análisis, pueden realizarse estudios de sensibilidad del cultivo simulado a los cambios en los parámetros climatológicos. Así, los escenarios de cambio climático generados con incrementos en la temperatura y/o incrementos o decrementos en la precipitación permiten investigar la vulnerabilidad del cultivo de maíz, cuantificable en términos de los rendimientos obtenidos bajo esas condiciones (fig. 5).

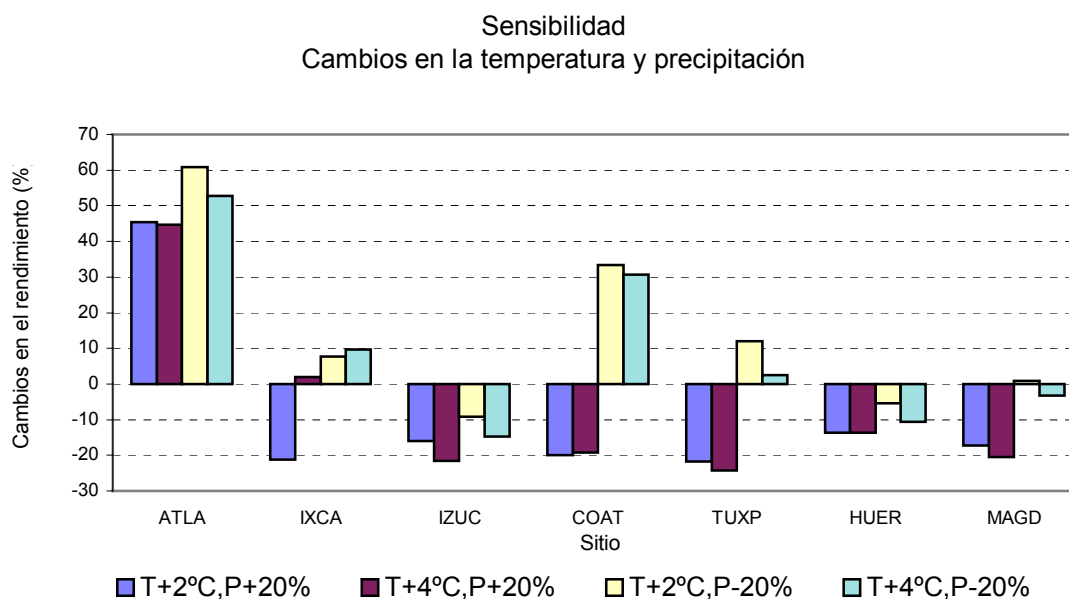


Figura. 5. Cambio porcentual en los rendimientos bajo incrementos arbitrarios en la temperatura y precipitación.

En la figura 5 destacan los resultados para Atacomulco, en donde el aumento en la temperatura es determinante, ya que esto significaría la posible disminución de las heladas que impactan fuertemente a la producción agrícola en el centro del país, particularmente en las zonas altas. En estos sitios, inclusive los cambios en la precipitación (sin importar su signo) no producen decrementos significativos en la producción.

Es interesante destacar que el aumento de 20% en la precipitación no necesariamente produce un efecto positivo en el cultivo. Más lluvia puede impedir la asimilación óptima del nitrógeno del suelo, lo que, aunado al aumento en la temperatura máxima, provoca disminuciones sensibles en los rendimientos.

5.3 Escenarios de cambio climático

Para aplicar el modelo CERES-Maize en los sitios señalados en el cuadro 1, se generaron los escenarios de cambio climático, empleando los modelos GFDL-R30 y CCC, donde se consideraron también los efectos fisiológicos de 555 ppm de CO₂ en el maíz.

Los resultados de los experimentos sin adaptación se destacan en los cuadros 6 a 9, así como en la figura 6, en la que se muestran los rendimientos observados, el del escenario base y los de cambio climático. En la columna 3 de los cuadros citados, se observa la diferencia (en porcentaje) entre los rendimientos de los escenarios de cambio climático con respecto al base. Asimismo, se presentan la duración, la precipitación total y la evapotranspiración de la estación de crecimiento (EC) para cada escenario.

Cuadro 6 Resultados de las simulaciones para escenarios base, de cambio climático y adaptaciones, en el Estado de México.

Sitio Atlacomulco

ESCENARIO	RENDIMIENTO (ton/ha)	DIF (%)	ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (días)	PRECIPITACIÓN ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (mm)	EVAPOTRANSPIRACIÓN (mm)
OBSERVADO	1.8				
BASE	2.06		171.29	735.36	512.79
GFDL SIN EF. CO ₂	2.82	36.77	143.36	900.71	433.42
GFDL CON EF. CO ₂	2.77	34.59	143.36	900.71	353.79
CCC SIN EF. CO ₂	3.22	56.12	144.79	601.50	461.79
CCC CON EF. CO ₂	3.29	59.47	144.79	601.50	377.71

Las proyecciones propuestas por el modelo GFDL-R30, a excepción de Atlacomulco, resultan en la disminución de los rendimientos del cultivo, debido, fundamentalmente, a que los incrementos en la precipitación, generados por este modelo, son muy altos, lo que provoca condiciones semejantes a las descritas en el estudio de sensibilidad.

En el modelo CCC, las variaciones en el rendimiento pueden ser positivas o negativas, debido a que sus cambios en el clima son más moderados. En algunos casos, sobresale el hecho de que el escenario de cambio climático generado por este modelo sería favorable a la producción de maíz.

Cuadro 7 Resultados de las simulaciones para escenarios base, de cambio climático y adaptaciones, en el Estado de Puebla.

Sitio Ixcamilpa

ESCENARIO	RENDIMIENTO (ton/ha)	DIF (%)	ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (días)	PRECIPITACIÓN ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (mm)	EVAPOTRANSPIRACIÓN (mm)
OBSERVADO	0.49				
BASE	0.52		136.13	445.81	456.81
GFDLR-30 SIN EF. CO ₂	0.36	-30.22	124.38	558.56	459.94
GFDLR-30 CON EF CO ₂	0.26	-50.10	124.38	558.56	370.81
CCC SIN EF CO ₂	0.66	26.46	122.81	366.31	439.00
CCC CON EF CO ₂	0.53	0.99	125.69	368.13	359.94
AD1					
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	3.48	568.89	120.40	568.87	561.31
GFDLR-30 CON EF CO ₂	3.50	571.90	122.53	569.07	496.50
CCC SIN EF CO ₂	3.63	597.80	121.33	375.87	509.25
CCC CON EF CO ₂	3.75	620.16	123.80	376.00	445.19

Sitio Izúcar

ESCENARIO	RENDIMIENTO (ton/ha)	DIF (%)	ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (días)	PRECIPITACIÓN ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (mm)	EVAPOTRANSPIRACIÓN (mm)
OBSERVADO	0.80				
BASE	0.88		110.06	369.61	392.00
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	0.71	-19.17	94.11	470.78	364.44
GFDLR-30 CON EF CO ₂	0.63	-27.98	94.39	472.33	293.83
CCC SIN EF CO ₂	0.80	-8.93	97.39	296.83	352.22
CCC CON EF CO ₂	0.79	-10.30	98.11	298.94	284.55
AD1					

GFDLR-30 SIN EF CO ₂	1.71	95.47	94.19	481.69	394.50
GFDLR-30 CON EF CO ₂	1.73	96.80	94.19	481.69	333.83
CCC SIN EF CO ₂	1.75	99.67	97.88	305.81	377.17
CCC CON EF CO ₂	1.76	100.76	97.88	305.81	321.39

Cuadro 8 Resultados de las simulaciones para escenarios base, de cambio climático y adaptaciones, en el Estado de Veracruz.

Sitio Coatepec

ESCENARIO	RENDIMIENTO (ton/ha)	DIF (%)	ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (días)	PRECIPITACIÓN ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (mm)	EVAPOTRANSPIRACIÓN (mm)
OBSERVADO	1.71				
BASE	1.56		134.63	1070.68	476.00
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	1.14	-26.86	112.32	1258.84	429.26
GFDLR-30 CON EF CO ₂	1.08	-30.68	112.32	1258.84	353.16
CCC SIN EF CO ₂	2.05	31.52	114.53	800.00	428.11
CCC CON EF CO ₂	2.01	28.89	114.53	800.00	356.58
AD1					
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	2.47	58.36	112.32	1258.84	427.47
GFDLR-30 CON EF CO ₂	2.60	66.24	112.32	1258.84	355.42
CCC SIN EF CO ₂	2.79	78.27	114.53	800.00	427.00
CCC CON EF CO ₂	2.92	86.76	114.53	800.00	358.05

Sitio Tuxpan

ESCENARIO	RENDIMIENTO (ton/ha)	DIF (%)	ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (días)	PRECIPITACIÓN ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (mm)	EVAPOTRANSPIRACIÓN (mm)
OBSERVADO	1.21				
BASE	1.24		117.72	924.33	492.17
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	0.92	-25.50	110.44	1070.28	489.67
GFDLR-30 CON EF CO ₂	0.91	-26.41	110.44	1070.28	409.72
CCC SIN EF CO ₂	1.33	7.09	111.11	668.50	499.55
CCC CON EF CO ₂	1.33	7.28	111.11	668.50	414.28
AD1					
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	2.78	124.45	110.44	1070.28	512.67
GFDLR-30 CON EF CO ₂	2.88	133.04	110.44	1070.28	471.67
CCC SIN EF CO ₂	2.84	129.24	111.11	668.50	528.78
CCC CON EF CO ₂	2.96	130.34	111.11	668.50	463.05

Cuadro 9 Resultados de las simulaciones para escenarios base, de cambio climático y adaptaciones, en el Estado de Jalisco.

Sitio La Huerta

ESCENARIO	RENDIMIENTO (ton/ha)	DIF (%)	ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (días)	PRECIPITACIÓN ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (mm)	EVAPOTRANSPIRACIÓN (mm)
OBSERVADO	1.34				
BASE	1.31		121.84	527.08	359.08

GFDLR-30 SIN EF CO ₂	1.00	-23.07	113.88	652.56	355.60
GFDLR-30 CON EF CO ₂	0.96	-26.17	113.88	652.56	291.20
CCC SIN EF CO ₂	1.04	-19.93	114.32	526.08	341.56
CCC CON EF CO ₂	1.00	-23.58	114.32	526.08	278.88
AD1					
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	2.54	94.99	113.16	652.56	378.16
GFDLR-30 CON EF CO ₂	2.68	105.63	113.88	652.56	324.52
CCC SIN EF CO ₂	2.60	99.23	113.80	526.08	366.20
CCC CON EF CO ₂	2.76	111.48	114.32	526.08	315.00

Sitio Magdalena

ESCENARIO	RENDIMIENTO (ton/ha)	DIF (%)	ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (días)	PRECIPITACIÓN ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (mm)	EVAPOTRANSPIRACIÓN (mm)
OBSERVADO	2.50				
BASE	2.50		145.39	648.68	469.50
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	1.76	-29.54	126.00	831.50	409.07
GFDLR-30 CON EF CO ₂	1.71	-31.43	126.00	831.50	338.43
CCC SIN EF CO ₂	2.13	-14.95	125.93	655.25	410.64
CCC CON EF CO ₂	2.09	-16.47	125.93	655.25	340.96
AD1					
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	2.82	12.68	125.86	844.36	410.64
GFDLR-30 CON EF CO ₂	2.96	18.20	125.86	844.36	353.86
CCC SIN EF CO ₂	2.87	14.96	125.71	668.25	409.71
CCC CON EF CO ₂	3.02	20.92	125.71	668.25	347.18

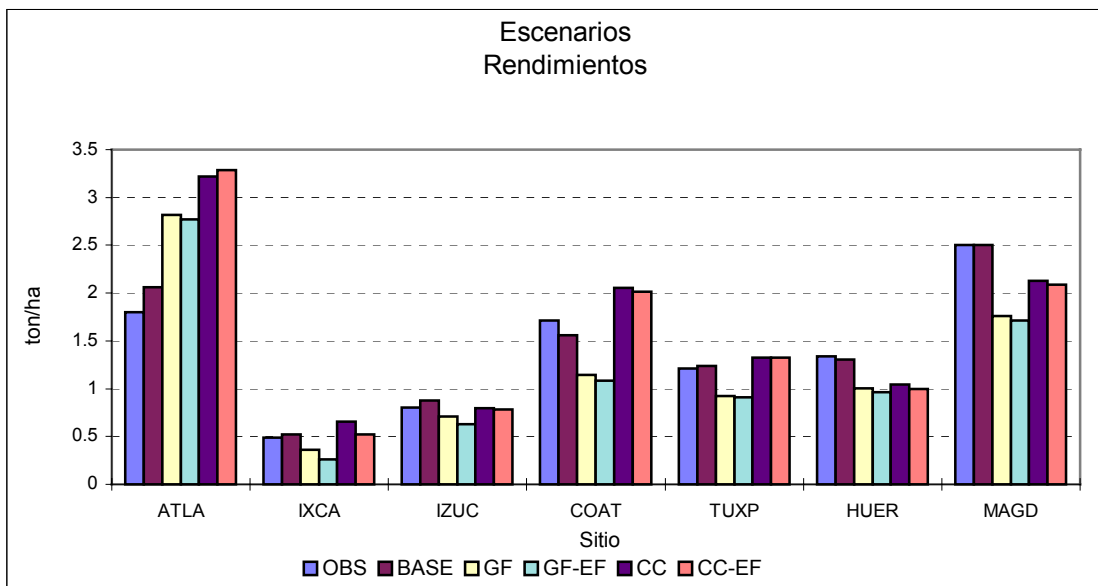


Figura 6. Comparación entre el rendimiento observado y los rendimientos simulados en los diferentes escenarios: GFDL-R30 y CCC sin efectos asociados a la duplicación de CO₂ (GF) y CC con efectos fisiológicos (GF-EF y CC-EF):

5.4 Adaptaciones

Se simularon diversas medidas de adaptación, se seleccionaron únicamente las que proporcionaron rendimientos significativos y se ordenaron en función del costo requerido para su aplicación. La medida de adaptación que resultó eficiente en todos los sitios fue la aplicación de fertilizante (urea), simulando o no los efectos fisiológicos asociados a la duplicación de CO₂. Los resultados de este último caso se muestran en los cuadros 6 a 9, con las siglas AD1, y en la figura 7.

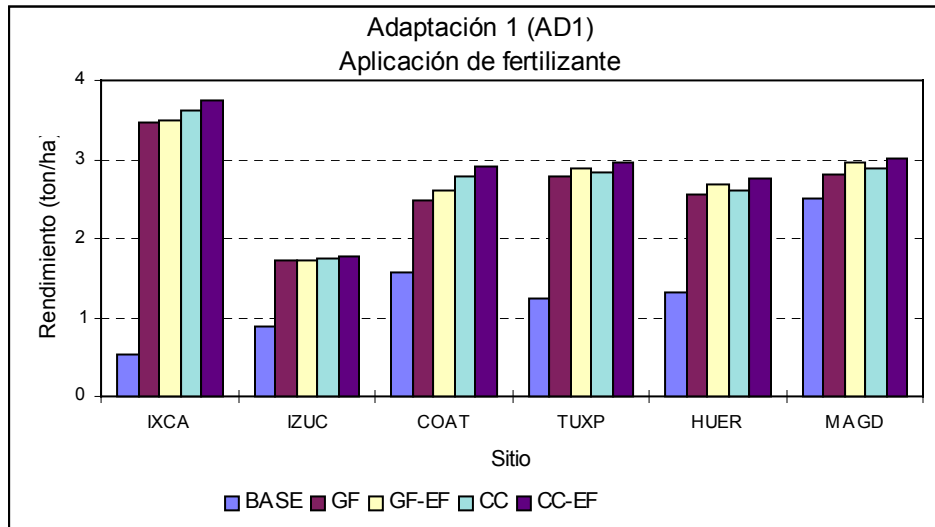


Figura 7. Rendimientos simulados al aplicar fertilizante como medida de adaptación en todos los sitios estudiados.

También se probaron otras medidas de adaptación combinadas con la anterior, como cambio de fecha de siembra o cambio en la variedad de la semilla. En el último caso, los rendimientos obtenidos fueron notablemente altos con respecto a la producción actual. Sin embargo, no en todos los sitios sería posible aplicar dicha medida, si como se describe en el análisis de costos, se toma en cuenta su costo y la situación económica de los productores.

En todos los escenarios de cambio climático y en todos los sitios, hubo una disminución en la longitud de la estación de crecimiento (15 días, en promedio). La mayor de ellas en Atlacomulco (28 días) y la menor en Izúcar (6 días), como se ilustra en la columna 4 de los cuadros 6 a 9.

5.5 Análisis de costos

Se realizó un análisis de costos sumamente simple, que no supone variaciones con el tiempo ni los efectos inflacionarios. El objetivo básico de este análisis fue tener un marco económico mínimo que permitiera decidir la viabilidad económica de las medidas de adaptación propuestas.

Una vez seleccionadas las medidas de adaptación que mitigarían el impacto del cambio climático, se analizó el efecto del incremento en los costos de producción, asociados a las medidas propuestas. Se utilizaron básicamente los costos reportados en la Agenda Técnica (Fernández-Marroquín, 1995) elaborada para mejorar la producción en los casos de sitios con rendimientos de 0.5, 1.5 y 2.0 ton/ha. Los precios de los insumos requeridos corresponden al año de 1994. Se dio por supuesto que dichos precios permanecerán constantes a futuro. Se analizó también el caso del impacto que tendría en la producción la liberalización de los precios por tonelada de maíz, previstos por el Tratado de Libre Comercio, en México, a partir del próximo siglo.

Para todos los casos, excepto para el Estado de Puebla, el análisis muestra que las medidas de adaptación resultan benéficas cuando el subsidio al maíz se mantiene (figs. 8 y 9).

Sin subsidio, algunas de las medidas que resultaban redituables, se muestran no viables en función de los costos de producción; existe así disminución en la ganancia o inclusive pérdidas (figs. 10 y 11).

6. Discusión

La producción de maíz en México depende ante todo del clima. Los bajos rendimientos y la gran superficie siniestrada registrada año con año, son indicativos de que este cultivo no se desarrolla ni exclusiva ni fundamentalmente para su comercialización a gran escala.

La producción extensiva para el autoconsumo, muy vulnerable a los eventos climáticos extremos y al posible cambio climático, se realiza con semillas locales, adaptadas a las condiciones y patrones culturales de los sitios estudiados.

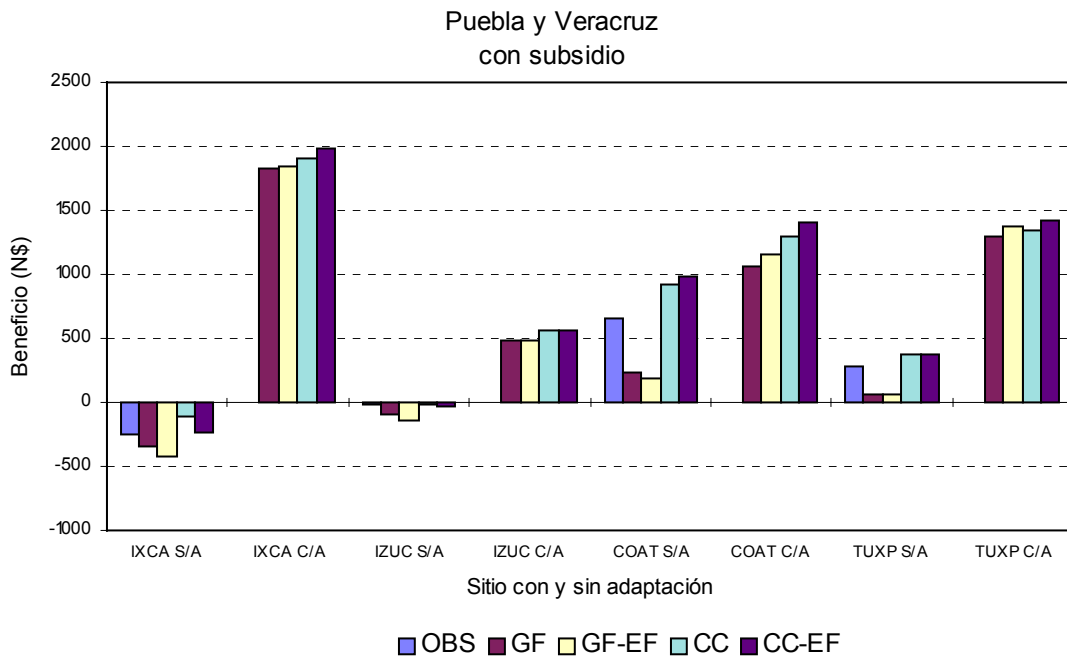


Figura. 8. Comparación del beneficio en pesos de 1994 para los sitios de Puebla y Veracruz sin adaptación (S/A) y con adaptación (C/A), para cada escenario. Se considera que la producción de maíz continúa subsidiada

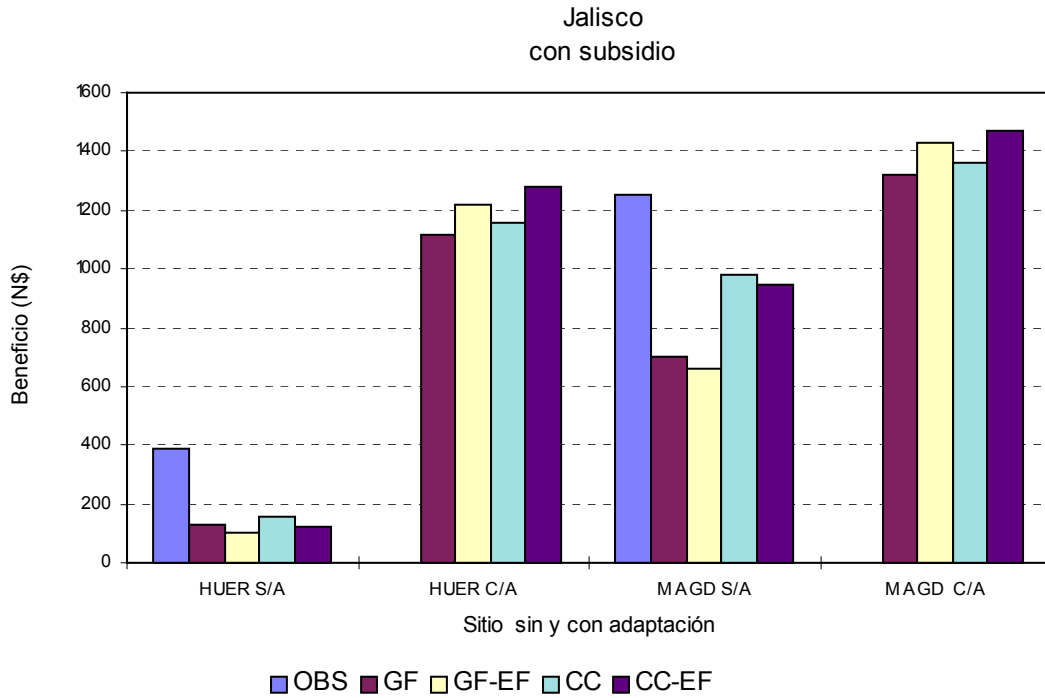


Figura. 9. Comparación del beneficio en pesos de 1994 para los sitios de Jalisco sin adaptación (S/A) y con adaptación (C/A), para cada escenario. Se considera que la producción de maíz continúa subsidiada.

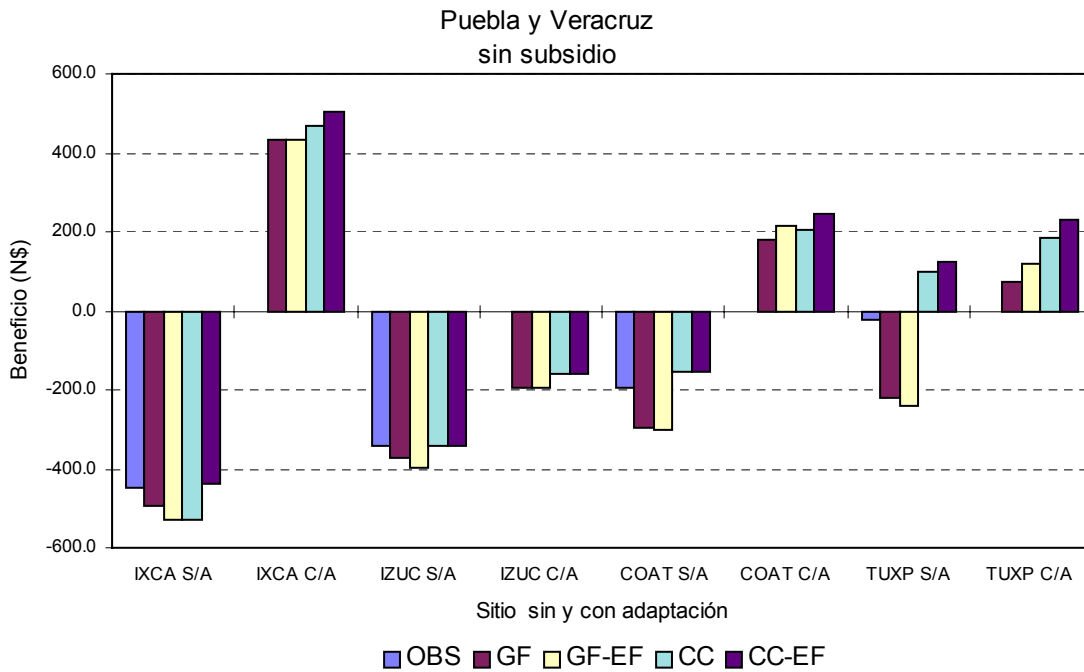


Figura. 10. Comparación del beneficio en pesos de 1994 para los sitios de Puebla y Veracruz sin adaptación (S/A) y con adaptación (C/A), para cada escenario. Se considera que se ha retirado el subsidio la producción de maíz.

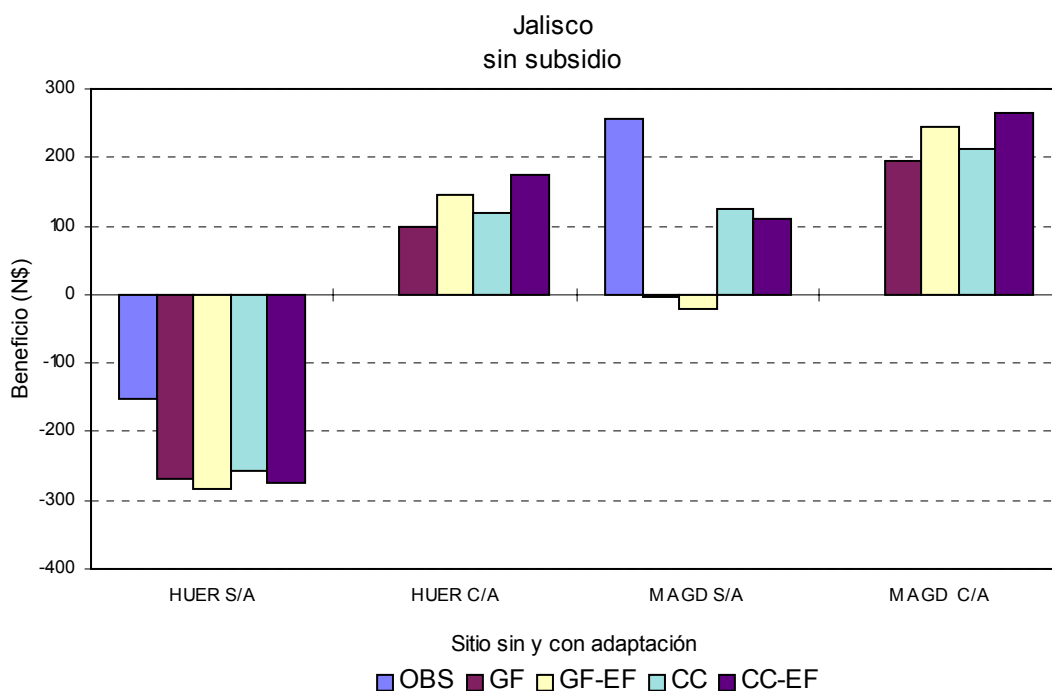


Figura. 11. Comparación del beneficio en pesos de 1994 para los sitios de Jalisco sin adaptación (S/A) y con adaptación (C/A), para cada escenario. Se considera que se ha retirado el subsidio a la producción de maíz.

Es importante emplear el Modelo CERES-Maize en este tipo de estudios, ya que permite simular los rendimientos actuales y los proyectados ante un calentamiento global. Al incluir el análisis detallado de las diferentes etapas del desarrollo del maíz, es posible calcular las carencias de nitrógeno o de agua que se presenten en el cultivo.

Sin embargo, la complejidad y, en ocasiones, la carencia de datos referentes al clima, los suelos, la fenología y los rendimientos históricos de los sitios en estudio, obligan a efectuar generalizaciones en detrimento de los resultados obtenidos. También las semillas locales difícilmente son modeladas por el CERES-Maize.

A pesar de lo anterior, se puede considerar que los resultados obtenidos en este trabajo con el CERES-Maize, son ilustrativos de las condiciones actuales de la producción de maíz en México y que permiten hacer proyecciones de los impactos que un cambio climático tendría en ella.

Una conclusión importante de este trabajo es que no por fuerza el cambio climático impactaría negativamente en el cultivo de maíz, sobre todo en el caso de las regiones altas de México. Sin embargo, este resultado tendría que analizarse en el marco de los estudios de erosión de este mismo Estudio de País: México.

La medida de adaptación más importante que se sugiere aquí, es la de la aplicación de fertilizante, aunque ésta no sería económicamente viable en todos los sitios estudiados. Este último hecho se agravaría si se retiraran los subsidios al cultivo. Lo anterior puede ser indicativo de que las condiciones y producción del campo en México serían impactadas en mayor medida por los cambios en la política económica aplicada que por un posible cambio climático. En cualquier caso, un calentamiento global futuro resalta la urgencia de diseñar estrategias mucho más coherentes que las existentes en la política agraria actual, planificando la liberación de los precios de los insumos y desarrollando sistemas de seguros a los cultivos básicos en este país.

Por otra parte, en todos los escenarios de cambio climático en los cuales ocurrieron incrementos positivos en la precipitación, se obtuvieron bajas sensibles en los rendimientos. Este sorprendente resultado se relaciona con la necesidad de aplicación de fertilizante al suelo. De la misma manera explica porqué la irrigación no resultó una medida de adaptación viable. Si se efectuara un análisis de suelos más minucioso en los sitios seleccionados, posiblemente se modificaría este resultado.

En estudios posteriores sería necesario enriquecer las bases de datos requeridas para el funcionamiento óptimo del CERES, tanto para maíz como para otros cultivos, como el frijol y el trigo. En particular, se podría enriquecer el CERES con información sobre las plagas que afectan estos cultivos.

Por último, y para enmarcar los resultados que se obtienen con el modelo, sería necesario incluir como factores importantes en el análisis, las tendencias históricas de la producción real, las proyecciones de la política agraria en México (por ejemplo, en las formas de tenencia de la tierra) y las adaptaciones a los cambios extremos que históricamente han aplicado los productores afectados.

Referencias

- Conde, C., O. Sánchez, V. Magaña, C. Gay, 1995, "Escenarios climáticos básicos y regionales", en, *México ante el Cambio Climático. Segundo Taller de Estudio de País: México*, Cuernavaca, Morelos, México, pp. 39 - 44.
- Conde, C., D. Liverman, M. Flores, R. Ferrer, R. Araujo, E. Betancourt, G. Villarreal, C. Gay, 1997, "Vulnerability of rainfed maize crops in Mexico to climate change", en, *Climate Research*, 9(1and 2), pp. 17 - 23.
- INEGI, 1994, VII Censo Agrícola-Ganadero de los Estados Unidos Mexicanos, México, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.
- IPCC, 1995, Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses, Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, pp. 427 - 467.
- Fernández-Marroquín, O., 1995, Jefe del programa de Fomento Agrícola, Delegación Puebla, SARH, Comunicación personal.
- Jones, C.A. and J.R. Kiniry, 1986, CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development, Texas A&M Press, College Station, 194 pp.
- Liverman, D., M. Dilley, K. O'Brian, L. Menchaca, 1994, "Possible Impacts of Climate Change on Maize Yields in Mexico", en *Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study*, Cynthia Rosenzweig and Ana Iglesias, (Eds), EPA.
- Magaña, V., 1995, "A Strategy to Determine Regional Climate Change", en *México ante el Cambio Climático. Memorias. Primer Taller de Estudio de País: México*, Cuernavaca, Morelos, México, pp. 45 - 51.
- Parry, M., 1993, "Climate change and the future of Agriculture", en *International Journal of Environment and Pollution*, Vol. 3, Nos. 1 - 3, pp. 13-30.
- Ritchie, J., U. Singh, D., Godwin and I. Hunt, 1989, A User's Guide to CERES - Maize V2.10, Michigan State University, International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, EUA.
- Rosenzweig, C., J. Jones, 1990, Climate Change Crop Modeling Study, Handbook. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Policy, Planning and Evaluation, U.S. Agency for International Development S&T/AGR/RNRM, 31 pp.