

# ALTERACIÓN DE LA FERTILIDAD DEL SUELO, Y VULNERABILIDAD DE MAÍZ Y TRIGO BAJO RIEGO DEBIDO AL CAMBIO CLIMÁTICO

- Liliana Terrazas-Mendoza • Iouri Nikolskii-Gavrilov •  
• Sergio Santiago Herrera-Gómez •  
*Colegio de Postgraduados, México*
- Marcial Castillo-Álvarez •  
*Universidad Autónoma Chapingo, México*
- Adolfo Antenor Exebio-García •  
*Colegio de Postgraduados, México*

## Resumen

La estimación de la vulnerabilidad de los cultivos por efectos del cambio climático ha sido realizada principalmente para los cultivos de temporal, asumiendo que no existe alteración de la fertilidad del suelo atribuible al cambio climático. El objetivo principal del presente trabajo fue estimar el papel de modificación del índice integral de fertilidad del suelo en los cálculos de la productividad de los cultivos de maíz de grano y trigo en varios distritos de riego de México. Se ha desarrollado una metodología para predecir la alteración de algunas propiedades del suelo bajo riego y su índice integral de fertilidad, atribuibles al cambio climático. Los resultados de la investigación señalan que la sensibilidad de los suelos agrícolas bajo riego en México al cambio climático es menor que los suelos agrícolas de temporal y suelos sin uso agrícola (vírgenes); sin afectar significativamente la vulnerabilidad de los cultivos al cambio climático. La principal afectación por la alteración de la fertilidad del suelo en estimaciones de vulnerabilidad de los cultivos bajo riego se espera en las zonas climáticas semiárida, semihúmeda y húmeda tropical de México, donde el índice climático adimensional promedio anual *IHT* es menor de 2.5.

**Palabras clave:** ley geográfica de zonificación de suelos, índice climático, índice integral de fertilidad.

## Introducción

La producción de maíz y trigo para grano es muy importante y estratégica para México y el mundo (Cordero, 2008). En México, aproximadamente el 15% de la producción de estos cultivos proviene de las unidades y distritos de riego, cuya área regable es de  $6.3 \times 10^6$  ha, donde se consume cerca de 80% del agua utilizada anualmente en el país (DOF, 2007). Sin embargo, México es deficitario en estos granos; alrededor de 25% del consumo nacional de maíz y 50% de consumo de trigo se importan anualmente (Cordero, 2008).

El cambio climático puede causar en el país un incremento de la temperatura promedio anual de 1 a 4 °C y cambios en la precipitación promedio anual de 0.4 a 1.4 veces, dependiendo de la región, durante el presente siglo, en función del escenario de crecimiento poblacional, y el desarrollo tecnológico y económico (IPCC, 2007; Conde y Gay, 2008; Conde *et al.*, 2008).

En México hay pocos estudios relacionados con la estimación de la vulnerabilidad de los cultivos al cambio climático (Conde *et al.*, 1998; Gay, 2003; Gay *et al.*, 2004). Estos trabajos se centran principalmente en cultivos de temporal, sin considerar la posible alteración de la fertilidad

del suelo por efectos del cambio climático. Los resultados de tales investigaciones señalan que al final del siglo XXI se espera una disminución de la productividad de maíz de grano como cultivo con mecanismo fotosintético  $C_4$  hasta de 60% y el crecimiento de la productividad de trigo con mecanismo fotosintético  $C_3$  hasta de 30%, dependiendo de la región y del escenario del cambio climático (Conde *et al.*, 1998; Allen, 1990).

Castillo *et al.* (2007) mostraron que el no considerar la alteración de la fertilidad del suelo atribuible al cambio climático puede causar errores en los pronósticos de los rendimientos de los cultivos agrícolas de maíz de grano y trigo de temporal hasta en más de 30%, dependiendo del cultivo y la región. Estos autores utilizaron la metodología de la FAO UNESCO, ampliamente utilizada en el mundo, para calcular los rendimientos de los cultivos de maíz y trigo de temporal (FAO, 2000).

En algunas publicaciones estimaron la alteración de las reservas de nitrógeno mineral en el suelo como resultado del cambio climático y su efecto en vulnerabilidad de los cultivos agrícolas (Conde *et al.*, 1998; Gay *et al.*, 2004). Sin embargo, considerar la reserva de nitrógeno del suelo como único indicador de la fertilidad no es suficiente, debido a que representa sólo el 30% del índice integral de fertilidad (Pegov y Jomyakov, 1991; Graham, 2000). Para reflejar objetivamente el efecto de alteración de fertilidad del suelo en la vulnerabilidad de los cultivos al cambio climático es indispensable considerar también otras propiedades, entre las cuales, el contenido de materia orgánica ocupa el primer lugar debido al papel que desempeña en formación de reservas de nitrógeno, estructura del suelo, capacidad de intercambio catiónico, etcétera (Graham, 2000).

Para pronosticar la alteración de la fertilidad integral del suelo agrícola de temporal, Nikol'skii *et al.* (2006) y Castillo *et al.* (2007) presentaron una metodología basada en la aplicación de la ley geográfica de zonificación de suelos sin uso agrícola (vírgenes) distinta a la aplicación de los modelos matemáticos de

formación del suelo, considerando que estos modelos tienen poca confiabilidad cuando los pronósticos se hacen a mediano y largo plazos (varias décadas) (Young, 1994). El principio de la metodología para cuantificar la alteración de la fertilidad del suelo agrícola de temporal atribuible al cambio climático fue presentada por Castillo *et al.* (2007) con las siguientes características:

- Existencia de una dependencia del índice de fertilidad del suelo virgen no usado para agricultura  $F_v^{2000}$  y del suelo agrícola  $F_t^{2000}$  de los terrenos geomorfológicamente homogéneos con maíz y trigo de temporal, en función del índice climático  $IHT^{2000}$  al inicio del siglo XXI.
- Pronóstico del cambio de este índice a un periodo futuro durante el siglo XXI ( $IHT^{\text{futuro}}$ ) con base en los escenarios climáticos existentes y utilizando las relaciones  $F_v^{2000}(IHT^{2000})$  y  $F_t^{2000}(IHT^{2000})$ .
- Estimación de los valores regionales del índice de fertilidad  $F_t^{\text{futuro}}$  para finales del siglo XXI, para cada grupo de suelos geomorfológicamente homogéneos (con el mismo rango de pendiente superficial, con la misma ubicación geomorfológica, etcétera).

Para establecer las relaciones  $F_v^{2000}(IHT^{2000})$  y  $F_t^{2000}(IHT^{2000})$  se requiere estimar el índice climático adimensional  $IHT$ , usando la siguiente relación (Nikolskii *et al.*, 2001; Contreras *et al.*, 2002; Nikol'skii *et al.*, 2006; Castillo *et al.*, 2007):

$$IHT = \frac{Rn}{\lambda(Pr - S)} \quad (1)$$

Donde  $\lambda=2.512 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  es el calor latente de evaporación;  $Rn$ ,  $Pr$  y  $S$  son los valores promedio acumulados anuales de la radiación neta ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ), precipitación y escurrimiento superficial ( $\text{mm año}^{-1}$ ), respectivamente. Investigaciones preliminares (Nikolskii *et al.*, 2001; Contreras *et al.*, 2002) señalan que en los terrenos planos con

pendientes menores de 3%, el escurrimiento superficial se puede ignorar en los cálculos del *IHT* para las zonas donde  $Pr \leq 1\ 000\ \text{mm año}^{-1}$  e  $IHT \geq 1.5$ .

En comparación con los pronósticos realizados para cultivos de temporal, para evaluar la vulnerabilidad de los cultivos agrícolas bajo riego es necesario:

- Establecer la dependencia del índice integral de fertilidad de los suelos irrigados ( $F_r^{2000}$ ) en los terrenos geomorfológicamente homogéneos con el cultivo seleccionado, en función del índice climático de referencia  $IHT^{2000}$  para inicio del siglo XXI.
- Pronosticar el cambio del valor regional del índice integral de fertilidad del suelo para un periodo futuro ( $F_r^{\text{futuro}}$ ).
- Estimar el cambio de la lámina de riego para el ciclo de cada cultivo, en función de los escenarios climáticos para el mismo periodo futuro.

El objetivo del presente trabajo fue cuantificar el papel de la alteración de la fertilidad del suelo atribuible al cambio climático, con fines de estimación de rendimientos de los cultivos de maíz y trigo bajo riego para un periodo dentro del siglo XXI, para algunos distritos de riego de referencia ubicados en diferentes zonas climáticas de México.

## Materiales y métodos

### *Estimación de la productividad agrícola del maíz y trigo bajo riego*

De acuerdo con la metodología de la FAO (2000), los rendimientos de maíz de grano y trigo bajo riego se pueden calcular con la siguiente ecuación:

$$Y^j = Y_{\text{máx}}^j K^j F_r^j \quad (2)$$

Donde  $Y^j$  es la productividad agrícola ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) en un sitio de referencia para las condiciones climáticas a principios del siglo

XXI ( $j=2000$ ) o estimadas en un periodo futuro ( $j=\text{futuro}$ );  $Y_{\text{máx}}^j$  es el rendimiento potencial máximo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), correspondiente a los mismos escenarios climáticos y depende de los valores mensuales de la temperatura del aire, radiación fotosintéticamente activa y las características fisiológicas del cultivo;  $K^j$  es un índice hídrico adimensional que caracteriza la disponibilidad de agua en el suelo para los cultivos;  $F_r^j$  es el índice integral de fertilidad del suelo agrícola (adimensional).  $K^j$  y  $F_r^j$  varían de cero a uno.

Con la ecuación (1) se calcularon los rendimientos de cada cultivo para inicios del siglo XX ( $Y^{2000}$ ) y la mitad del siglo XXI ( $Y^{2050}$ ). El nivel del año 2050 fue seleccionado como ejemplo para estimar los cambios significativos en la fertilidad del suelo, considerando que estos cambios son relativamente lentos y pueden observarse en el transcurso de varias décadas. Por lo general, los cálculos similares se pueden realizar con la misma metodología para cualquier periodo distinto de 2050. Generalmente, el valor de cambio de fertilidad del suelo depende del nivel del cambio climático que, a su vez, está en función de la formación del clima futuro y del tiempo: mayor periodo–mayor cambio climático–mayor efecto de cambio de fertilidad del suelo. Entonces, para los periodos relativamente cortos (10 a 15 años) se puede ignorar el efecto de alteración de fertilidad del suelo en estimaciones de vulnerabilidad de los cultivos agrícolas al cambio climático (Nikol'skii et al., 2006).

Para calcular los rendimientos  $Y^{2000}$  en los mismos sitios de referencia para las condiciones climáticas existentes al inicio del siglo XXI, se utilizaron las normales climatológicas obtenidas de la base de datos *ERIC III*, v. 1 (IMTA, 2006).

Los cálculos de los rendimientos para mitad del siglo XXI ( $Y^{2050}$ ) se realizaron utilizando los escenarios climáticos con mayor cambio climático esperado: A2 (con crecimiento de la cantidad de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera en el nivel del año 2050 hasta 536 ppm), B1 (491 ppm) y B2 (478 ppm) (IPCC, 2007; IPCC-TGICA,

2007), y las salidas interpoladas desarrolladas con los modelos de circulación de la atmósfera *GFDL CM2.0* y *ECHAM5/MPI* para el año 2050 (Conde y Gay, 2008; Conde et al., 2008). Indudablemente, los pronósticos climáticos van a mejorarse y precisarse en el futuro.

Las salidas de estos escenarios contienen datos mensuales de las temperaturas del aire ( $T$ ) y precipitación ( $Pr$ ).

Los cambios relativos de rendimiento de los cultivos,  $\Delta Y$  (adim), en los distritos de riego de referencia se calcularon con la siguiente ecuación:

$$\Delta Y = \frac{Y^{2050} - Y^{2000}}{Y^{2000}} = \frac{Y_{\text{máx}}^{2050}}{Y_{\text{máx}}^{2000}} \frac{K^{2050}}{K^{2000}} \frac{F_r^{2050}}{F_r^{2000}} - 1 \quad (3)$$

Donde  $Y_{\text{máx}}^{2050}$  y  $Y_{\text{máx}}^{2000}$  son los rendimientos potenciales máximos;  $K^{2050}$  y  $K^{2000}$  representan los índices hídricos del suelo para los ciclos de los cultivos, y  $F_r^{2050}$  y  $F_r^{2000}$  corresponden a los índices integrales de fertilidad del suelo irrigado. Las tres variables son calculadas para los años 2000 y 2050 (inicios y mitad del siglo XXI).

### Estimación de la productividad potencial

La productividad potencial,  $Y_{\text{máx}}^j$  (kg ha<sup>-1</sup>), se calculó con el método de la FAO (2000), que se basa en la estimación de la producción de asimilados brutos, en función de las propiedades fisiológicas del cultivo, como la ruta fotosintética, la radiación fotosintéticamente activa y la temperatura del aire promedio durante el ciclo del cultivo:

$$Y_{\text{máx}}^j = B_n I_c \quad (4)$$

Donde  $B_n$  es la biomasa neta de la materia seca total (kg ha<sup>-1</sup>);  $I_c$  es el índice de cosecha o la fracción de la biomasa  $B_n$  que corresponde al producto agrícola (adimensional). El valor de  $B_n$  (kg ha<sup>-1</sup>) se calcula de la siguiente manera (FAO, 2000):

$$B_n = \frac{0.36 b_{br} L}{(1/n) + 0.25 C_t} \quad (5)$$

Donde  $b_{br}$  corresponde a la tasa máxima de producción de biomasa bruta de un cultivo de referencia, asumiendo un índice de área foliar ( $IAF$ ) igual a 5 (kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>);  $b_{br}$  depende principalmente de la concentración de  $CO_2$  en la atmósfera y de la radiación global (o más bien, de la radiación fotosintéticamente activa);  $n$  es la duración del ciclo normal del cultivo (en días);  $C_t$  es la fracción de la tasa de producción de biomasa bruta (como  $CH_2O$ ) que se pierde por la respiración de mantenimiento, la cual depende del tipo de cultivo (leguminosa o no leguminosa) y de la temperatura media del aire (kg kg<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>);  $L$  representa la fracción de la tasa máxima de crecimiento del cultivo por cobertura incompleta del terreno. Cuando  $IAF < 5$ ,  $L$  puede ser estimada con la siguiente ecuación (adimensional):

$$L = 0.3424 + 0.9051 \text{Log}_{10}(IAF) \text{ si } IAF < 5 \quad (6)$$

Cuando  $IAF \geq 5$  el valor de  $L=1$ .

Los valores de  $b_{br}$  se estimaron en función de la tasa máxima de producción de biomasa,  $P_m$  (en kg  $CH_2O$  ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) (FAO, 2000):

$$b_{br} = N (0.8 + 0.01 P_m) b_o + (1-N) (0.5 + 0.025 P_m) b_c \quad (7)$$

si  $P_m \geq 20$  kg  $CH_2O$  ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>

$$b_{br} = N (0.5 + 0.025 P_m) b_o + (1-N) 0.05 P_m b_c \quad (8)$$

si  $P_m < 20$  kg  $CH_2O$  ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>

Donde los valores de  $P_m$  para maíz y trigo, en función de la concentración de  $CO_2$  en la atmósfera, se obtuvieron de la literatura (Acock, 1990; Allen, 1990);  $b_o$  y  $b_c$  son las tasas brutas de producción de materia seca para un cultivo de referencia hipotético (kg  $CH_2O$  ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) en días completamente nublados y días completamente despejados, respectivamente, con dosel cubriendo completamente el terreno y asumiendo una tasa máxima de producción de biomasa de 20 kg ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>;  $N$  es un parámetro adimensional que depende de la radiación fotosintéticamente activa potencial ( $RFA$ ) diaria

para cielo totalmente despejado ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) y de la radiación global de onda corta  $R_g$  ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ):

$$N = \frac{RFA - 0.5 R_g}{0.8 RFA} \quad (9)$$

Los valores de  $C_t$  se calculan así (FAO, 2000):

$$C_t = C_{30} (0.044 + 0.0019 T + 0.001 T^2) \quad (10)$$

Donde  $T$  es la temperatura media mensual del aire ( $^{\circ}\text{C}$ );  $C_{30}$  es la tasa de pérdida de producción de biomasa bruta por la respiración de mantenimiento a  $30^{\circ}\text{C}$  (de 0.0108 para plantas no leguminosas).

Se utilizó información bibliográfica de la FAO (2000) sobre  $I_c$ ,  $IAF$ ,  $P_m$ ,  $b_o$  y  $b_c$ .

*Estimación del índice de disponibilidad de agua en el suelo*

El índice  $K_r^j$  de la ecuación (2) se calcula como sigue (FAO, 2000):

$$K^j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{(Pr_i^j + Lr_i^j)}{ET_i^j}, \quad (11)$$

y si  $K^j > 1$ , se considera  $K^j = 1$

Donde  $Pr_i^j$ ,  $Lr_i^j$  y  $ET_i^j$  son los valores medios mensuales de precipitación, lámina de riego neta y la evapotranspiración de referencia, respectivamente, para cada mes  $i$  en la estación de cada cultivo, con duración de  $m$  meses en los años  $j=2000$  y  $j=2050$ .

La condición  $K^j > 1$  corresponde al exceso de agua en el suelo agrícola. Se ha considerado  $K^j=1$  cuando  $K^j > 1$ , asumiendo que con medidas agrotécnicas se pueden evitar los casos de exceso de humedad en el suelo y los daños correspondientes al cultivo.

Las láminas de riego  $Lr^{2000}$  promedio anuales por ciclo de los cultivos de maíz y trigo al inicio del siglo XXI ( $j=2000$ ) se han obtenido de los reportes anuales de los distritos de riego denominados "Planes de riego" a partir del

año 1990 (datos no publicados y prestados por el jefe de este proyecto, ingeniero Leopoldo Hernández Gómez de la Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola de la Conagua). Los valores  $Lr^{2050}$  ( $j=2050$ ) se han determinado en forma aproximada proporcionalmente a los valores promedio anuales de almacenamiento del agua en las presas, las cuales alimentan los distritos de riego de referencia. La cantidad de almacenamiento de agua fue asumida proporcionalmente al escurrimiento superficial o a la lámina de precipitación media en las áreas, en las cuencas hidrográficas correspondientes a cada presa, suponiendo que el escurrimiento superficial promedio anual depende de la lámina de precipitación promedio anual y media en cada cuenca. Con este supuesto, la lámina de riego promedio anual correspondiente al ciclo del cultivo se determinó como sigue:

$$Lr^{2050} = Lr^{2000} \frac{Pr_c^{2050}}{Pr_c^{2000}} \quad (12)$$

Donde  $Pr_c^{2000}$  y  $Pr_c^{2050}$  corresponden a las láminas promedio anuales de precipitación en la cuenca hidrográfica de la presa del distrito de riego de referencia al inicio y mitad del siglo XXI, respectivamente. Para obtener los valores de  $Pr_c^{2000}$  y  $Pr_c^{2050}$  se estimaron las láminas medias de precipitación entre las láminas promedio anuales para algunas estaciones meteorológicas dentro de cada cuenca, para las cuales existen los datos de precipitación promedio anual al inicio y mitad del siglo. Se supone que tal enfoque aproximado puede ser aplicado con el supuesto de que las condiciones de escurrimiento superficial no cambian significativamente en el tiempo; es decir, que no hay grandes cambios en la cobertura vegetal, ni la intensidad de las lluvias en la cuenca, así como en ningún otro factor influyente en el proceso de escurrimiento superficial.

Los cálculos preliminares, en los cuales los valores de  $ET_i^j$  se determinaron con las fórmulas de Thornthwaite o Blaney Criddle

(Ángeles, 2000), a partir de los datos mensuales de temperatura del aire y la ubicación del sitio geográfico, señalaron que los mismos valores de  $K^j$  y las mismas relaciones  $\frac{K^{2050}}{K^{2000}}$  también se pueden obtener a través de la fórmula:

$$K^j = \frac{m}{\sum_{i=1}^m IHT_i^j}, \text{ y si } K^j > 1, \text{ se considera } K^j = 1 \quad (13)$$

Donde  $IHT_i^j$  son los valores del índice  $IHT$  calculados para cada mes  $1 \leq i \leq m$  durante los ciclos de los cultivos bajo riego con la fórmula siguiente:

$$IHT_i^j = \frac{Rn_i^j}{\lambda \left( Pr_i^j + \frac{Lr^j}{m} \right)} \quad (14)$$

Donde  $Rn_i^j$  y  $Pr_i^j$  son los valores medios de la radiación neta y la precipitación en cada mes  $i$  del ciclo del cultivo con duración de  $m$  meses en los años  $j=2000$  o  $2100$ ;  $Lr^j$  es la lámina promedio anual de riego durante la estación del cultivo en cada uno de estos años;  $\lambda$  es el calor latente de evaporación (ver ecuación (1)). Considerando la aproximación del cálculo del  $K^j$  en la fórmula (14), la lámina de riego  $Lr^j$  fue distribuida homogéneamente entre todos los meses del ciclo del cultivo.

Los valores de  $Rn_i^j$  se han calculado a partir de los valores mensuales de temperatura y la radiación global ( $Rg_i^j$ ), y en forma indirecta de la precipitación, utilizando la metodología descrita por Contreras *et al.* (2002). Las salidas climatológicas actuales no contienen los datos sobre cambio de la radiación global (Conde y Gay, 2008; Conde *et al.*, 2008). Los pronósticos climáticos anteriores señalan que este cambio debería ser insignificante (dentro de 4% en el territorio de México) al final del siglo XXI para diferentes escenarios (Gay, 2003). Por esta razón, en nuestros cálculos, los valores  $Rg_i^{2050}$  se han considerado aproximadamente iguales a los registrados al inicio de este siglo.

Se asume que los valores de albedo mensuales de cada cultivo no se cambian en el transcurso del siglo XXI y deben ser similares en cada mes de la estación del cultivo al inicio y final de este siglo.

En los casos en que en el mes ( $j=0$ ) que antecede al de la siembra presente una precipitación  $Pr_0^j$  tan alta que:

$$IHT_0^j = \frac{Rn_0^j}{\lambda Pr_0^j} \leq 1 \quad (15)$$

por lo tanto, se considera la humedad residual y el  $K^j$  se calcula para  $m+1$  meses; es decir, para  $m$  meses de la estación del cultivo más el mes anterior a la siembra:

$$K^j = \frac{m+1}{\sum_{i=0}^m IHT_i^j}, \text{ y si } K^j > 1, \text{ se considera } K^j = 1 \quad (16)$$

Donde  $IHT_0^j \leq 1$  es el índice climático correspondiente al primer mes (antes de la siembra), cuando la precipitación  $Pr_0^j$  es alta.

#### Estimación del índice integral de fertilidad del suelo

Para calcular el índice integral de fertilidad del suelo  $F_r^{2000}$  se ha utilizado la fórmula propuesta por Pegov y Jomyakov (1991):

$$F_r^{2000} = 0.46 \frac{MO}{MO_{\text{máx}}} + 0.28 \sqrt{\frac{P}{P_{\text{máx}}} \frac{K}{K_{\text{máx}}}} + 0.26 e^{-\left(\frac{pH-6}{2}\right)^2} \quad (17)$$

Donde pH y MO, P, K son los valores modales de pH, contenido en el suelo de materia orgánica (MO) y formas disponibles para el cultivo de fósforo (P) y de potasio (K), típicos para los terrenos irrigados con el mismo cultivo y con el mismo valor del índice climático  $IHT$  para inicio del siglo XXI;  $MO_{\text{máx}}$ ,  $P_{\text{máx}}$  y  $K_{\text{máx}}$  son valores máximos observados de MO, P y K

entre todos los terrenos estudiados. La ecuación (17) es conveniente, porque en forma explícita establece la relación entre el índice integral de fertilidad del suelo y la relativamente limitada información sobre las propiedades del suelo disponibles en bases de datos existentes (INEGI, 2004).

Si es necesario calcular los rendimientos de los cultivos considerando no solamente la cantidad de nutrimentos disponibles en el suelo, sino también las dosis de fertilizantes, el  $F_r^{2000}$  se calcula por la ecuación reportada por Pegov y Jomyakov (1991):

$$F_r^{2000} = 0.32 \frac{MO}{MO_{\text{máx}}} + 0.42 \sqrt[3]{\frac{N^{\text{fert}}}{N_{\text{máx}}^{\text{fert}}} \frac{P + P^{\text{fert}}}{P_{\text{máx}} + P_{\text{máx}}^{\text{fert}}} \frac{K + K^{\text{fert}}}{K_{\text{máx}} + K_{\text{máx}}^{\text{fert}}}} + 0.26 e^{-\left(\frac{\text{pH}-6}{2}\right)^2} \quad (18)$$

Donde  $N^{\text{fert}}$ ,  $P^{\text{fert}}$  y  $K^{\text{fert}}$  son las dosis promedio anuales de los componentes activos de fertilizantes de N, P y K al principio del siglo XXI, respectivamente;  $N_{\text{máx}}^{\text{fert}}$ ,  $P_{\text{máx}}^{\text{fert}}$  y  $K_{\text{máx}}^{\text{fert}}$  son las dosis máximas de fertilizantes promedio anuales observadas para las zonas estudiadas.

La estimación de la alteración de la fertilidad de los suelos está basada en la ley geográfica de zonificación del suelo no usado en la agricultura (Budyko, 1974; Volobuev, 1974). De acuerdo con esta ley, los valores modales regionales de algunas propiedades químicas, físicas y biológicas ( $f$ ) de los suelos vírgenes, geomorfológicamente homogéneos (con la misma topografía, rangos de pendientes superficiales, condiciones geológicas e hidrogeológicas, textura y mineralogía del subsuelo y tiempo de formación), dependen principalmente del índice climático  $IHT$  (ver la ecuación (1)). Cuando el cambio climático ocurre relativamente lento, en comparación con las intensidades de formación de las propiedades MO, P, K y pH—componentes del índice integral de fertilidad—, las relaciones

entre estas propiedades y el  $IHT^{2000}$  o entre el  $F_r^{2000}$  y el  $IHT^{2000}$  establecidas a inicios del siglo XXI, debe conservarse al final del mismo siglo. Este supuesto se justifica en el trabajo de Arnold *et al.* (1990). Si a través de los escenarios climáticos se obtiene el índice climático  $IHT^{2050}$  en cada uno de los distritos de riego o cualquier sitio geográfico de referencia, entonces utilizando las relaciones  $f_v^{2000}$  ( $IHT_v^{2000}$ ) o  $F_v^{2000}$  ( $IHT_v^{2000}$ ) establecidas para cada grupo geomorfológicamente homogéneo de los suelos vírgenes se pueden determinar las nuevas propiedades o el índice de estos suelos. Los suelos agrícolas por la aplicación de fertilizantes y el manejo de los cultivos no necesariamente dependen de una zonificación.

Para estimar la alteración del suelo agrícola irrigado debido únicamente al cambio climático se ha utilizado el procedimiento similar al descrito en las publicaciones (Nikolskii *et al.*, 2001; Contreras *et al.*, 2002; Nikol'skii *et al.*, 2006) y esquemáticamente mostrado en la figura 1.

En esta figura se observa que la relación  $F_v^{2000}$  ( $IHT_v^{2000}$ ) tiene regularidad, la cual refleja la ley geográfica de zonificación del suelo virgen dentro del grupo de suelos geomorfológicamente homogéneos, en función del índice climático  $IHT_v^{2000}$ ; mientras que la relación  $F_r^{2000}$  ( $IHT_v^{2000}$ ) no tiene esta regularidad debido a la modificación del suelo agrícola irrigado por las prácticas de manejo del suelo, cultivo y agua.

Para estimar el cambio del índice de fertilidad del suelo agrícola irrigado ( $F_{r,1}^{2050} - F_{r,1}^{2000}$ ), en un sitio de referencia con el número 1 para mediados del siglo, causado exclusivamente por el cambio climático e ignorando los efectos relacionados con el uso del terreno, se utiliza la ecuación siguiente:

$$F_{r,1}^{2050} - F_{r,1}^{2000} = \frac{F_{r,\text{máx}}^{2000}}{F_{v,\text{máx}}^{2000}} (F_{v,1}^{2050} - F_{v,1}^{2000}) \quad (19)$$

Donde  $F_{r,1}^{2000}$  y  $F_{r,1}^{2050}$  representan los índices regionales de fertilidad del suelo irrigado en el sitio de referencia con el número 1 al inicio y

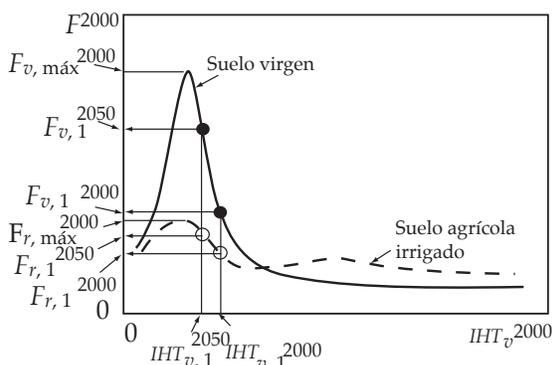


Figura 1. Dependencia esquemática del índice regional de fertilidad del suelo no usado en la agricultura ( $F_v^{2000}$ ) y suelo agrícola irrigado ( $F_r^{2000}$ ), en función del índice climático ( $IHT_v^{2000}$ ) al inicio del siglo XXI.  $F_{v,máx}^{2000}$  y  $F_{r,máx}^{2000}$  son los valores máximos del índice de fertilidad de los suelos vírgenes e irrigados en las gráficas  $F_v^{2000}(IHT_v^{2000})$  y  $F_r^{2000}(IHT_v^{2000})$ , respectivamente;  $F_{v,1}^{2000}$  y  $F_{r,1}^{2000}$  son los valores del índice de fertilidad, correspondientes a un sitio geográfico de referencia con el número 1, donde el valor del índice climático es igual a  $IHT_{v,1}^{2000}$  a principios del siglo XXI.  $F_{v,1}^{2050}$  y  $F_{r,1}^{2050}$  son los valores del índice de fertilidad en el mismo sitio 1 en la mitad del siglo XXI, cuando el índice climático será igual a  $IHT_{v,1}^{2050}$ .

mitad del siglo XXI, correspondientes al cambio del índice climático de  $IHT_{v,1}^{2000}$  a  $IHT_{v,1}^{2050}$ ;  $F_{v,1}^{2000}$  y  $F_{v,1}^{2050}$  son los índices de fertilidad del suelo virgen en el mismo sitio de referencia al inicio y mitad del siglo XXI, respectivamente. Los índices climáticos  $IHT_v^{2000}$  e  $IHT_v^{2050}$  se calculan con la ecuación (1).  $F_{v,máx}^{2000}$  y  $F_{r,máx}^{2000}$  corresponden a los valores máximos del índice de fertilidad de los suelos vírgenes e irrigados en las gráficas  $F_v^{2000}(IHT_v^{2000})$  y  $F_r^{2000}(IHT_v^{2000})$ , respectivamente.

La ecuación (19) refleja en forma cuantitativa la ley geográfica de zonificación de suelos. El año 2050 ha sido seleccionado como ejemplo para estimar cambios significativos en fertilidad del suelo, considerando que estos cambios son relativamente lentos y pueden observarse en el transcurso de varias décadas. De acuerdo con la ley geográfica, si los cambios climáticos se observan en el transcurso de varias décadas, debe conservarse la relación entre algunas

propiedades del suelo y el índice climático  $IHT$  promedio anual, existente al inicio del siglo XXI. Por esta razón, la ecuación (19) puede aplicarse por lo menos para cualquier periodo dentro del siglo XXI.

La ecuación (19) se puede utilizar a nivel regional y de la parcela. En este caso, la diferencia ( $F_{r,1}^{2050} - F_{r,1}^{2000}$ ) en el ámbito regional se puede agregar al índice de fertilidad de una parcela ( $F_{parcela}^{2000}$ ) si el índice climático en esta parcela se cambia del inicio a la mitad del siglo XXI de  $IHT_v^{2000}$  e  $IHT_v^{2050}$ , imaginando que la parcela tiene una cobertura vegetal natural igual a la de la región (Nikolskii et al., 2001; Contreras et al., 2002; Nikol'skii et al., 2006). Para desarrollar la metodología del pronóstico de cambio del índice de fertilidad del suelo agrícola irrigado para los distritos de riego de referencia a mitad del siglo XXI, exclusivamente a causa del cambio climático, es necesario establecer las relaciones cuantitativas entre el índice climático  $IHT_v^{2000}$  y los valores modales regionales de las propiedades MO, P, K, pH y el índice integral de fertilidad de los suelos vírgenes ( $F_v^{2000}$ ) y agrícolas irrigados ( $F_r^{2000}$ ), con los cultivos de maíz y trigo en los distritos de riego ubicados en diferentes zonas climáticas de México. Tales relaciones deben establecerse para cada grupo de suelos geomorfológicamente homogéneo. En el trabajo actual, las investigaciones se han realizado para suelos automorfos (con profundidad del nivel freático aproximadamente mayor de 4 m) en altitudes de 0 a 2 500 m, y formados *in situ* con una pendiente superficial menor de 3%. El procedimiento para establecer las relaciones  $F_v^{2000}(IHT_v^{2000})$  y  $F_r^{2000}(IHT_v^{2000})$  está descrito en los trabajos de Nikolskii et al. (2001 y 2006) y Contreras et al. (2002), e incluye principalmente las siguientes etapas:

1. Selección y sistematización de sitios geográficos y de los datos sobre las propiedades mencionadas de los suelos vírgenes y agrícolas irrigados en función del índice climático  $IHT_v^{2000}$ , utilizando el conjunto de las cartas de INEGI de

México con escala 1:50 000 y 1:250 000 sobre la topografía, uso del suelo, geología y edafología (INEGI, 1988). En el presente trabajo, el procesamiento de la información edafológica fue automatizado, aplicando el sistema *ArcInfo 9.2* para el análisis del modelo digital de elevación del terreno a escala 1:250 000 (con un tamaño de malla de 200 por 200 metros) y utilizando las bases de datos geo-referenciados sobre las propiedades de los pozos edafológicos (INEGI, 2004).

2. Procesamiento estadístico de los datos sobre las propiedades de los suelos y el índice de fertilidad; búsqueda de sus valores modales  $X$  y los intervalos de confianza  $X \pm 2\sigma$  (donde  $\sigma$  corresponde a la desviación estándar de los logaritmos naturales de los valores parciales de cada propiedad) en cada uno de los intervalos establecidos en la escala del índice climático  $IHT_v^{2000}$ . En las investigaciones previas fue establecido que la distribución estadística de cada propiedad tiene carácter lognormal (Nikolskii et al., 2001; Contreras et al., 2002).
3. Establecimiento de las curvas  $f_v^{2000}(IHT_v^{2000})$  y  $f_r^{2000}(IHT_v^{2000})$  o  $F_v^{2000}(IHT_v^{2000})$ , y  $F_r^{2000}(IHT_v^{2000})$  de mejor ajuste a los valores modales de estas propiedades de los suelos utilizando el programa *CurveExpert 1.34* (Hyams, 1997).
4. El efecto directo del aumento de la concentración creciente de  $CO_2$  en la atmósfera a finales del siglo XXI sobre el cambio de contenido de materia orgánica y el índice de fertilidad fue ignorado, ya que no es significativo (Bazzaz y Sombroek, 1996; Knorr et al., 2005).

## Resultados y discusión

Para verificar si los cálculos de los rendimientos eran confiables o no, en la figura 2, los rendimientos maíz y trigo medidos durante los últimos 17 años (del 1990 al 2006) en los distritos de riego ( $Y_{real}$ ) se comparan con los rendimientos calculados ( $Y_{calc}$ ) con la fórmula (18), utilizando la información meteorológica promedio anual

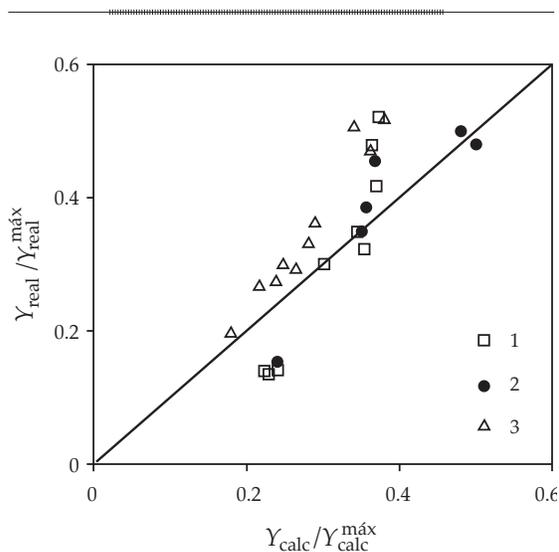


Figura 2. Comparación de los rendimientos de maíz de grano y trigo calculados ( $Y_{calc}/Y_{calc}^{máx}$ ) y obtenidos en campo ( $Y_{real}/Y_{real}^{máx}$ ) en algunos distritos de riego (DR) del país.

Las cifras en la gráfica corresponden a los cultivos: 1, el maíz del ciclo primavera-verano en los DR 4, 10, 13, 14, 34, 48, 66, 76 y 89; 2, el maíz del ciclo otoño-invierno en los DR 10, 13, 34, 63, 75 y 76; 3, el trigo del ciclo otoño-invierno en los DR 4, 13, 17, 34, 52, 63, 66, 75 y 76.

para los periodos de desarrollo de cada cultivo y datos estimados de los componentes de la fórmula del cálculo del rendimiento:  $Y_{máx}$ ,  $K_{hidr}$  y  $F$ .

Los distritos de riego seleccionados se ubican en diferentes zonas climáticas de México: zonas tropicales subhúmedas y húmedas de la vertiente del Golfo de México; tierras frías del centro del país; zona tropical seca de la vertiente del océano Pacífico; zonas áridas y semiáridas del centro y noroeste del país.

En los cálculos del índice de fertilidad  $F$  se han tomado en cuenta las dosis de fertilizantes, según los datos publicados (Reyes, 1990; FAO, 2004). Los valores  $Y_{real}$  se han obtenido de la base de datos de Conagua (Conagua, 2007). Los valores de los rendimientos en la figura 2 son adimensionales. Dentro de cada grupo de los rendimientos medidos y calculados para cada año (para los ciclos primavera-verano y otoño-invierno) en cada uno de los distritos de riego

de referencia, se han tomado los rendimientos máximos medidos y calculados. Después, todos los rendimientos medidos y calculados por año se dividieron por los valores máximos medidos ( $Y_{real}^{m\acute{a}x}$ ) y calculados ( $Y_{calc}^{m\acute{a}x}$ ), respectivamente. Los valores adimensionales de  $Y_{real}/Y_{real}^{m\acute{a}x}$  y  $Y_{calc}/Y_{calc}^{m\acute{a}x}$  se colocaron a la gráfica en la figura 2.

El tratamiento estadístico de la relación  $Y_{calc}/Y_{calc}^{m\acute{a}x}(Y_{real}/Y_{real}^{m\acute{a}x})$  en la figura 2 permitió obtener los coeficientes de correlación iguales a 0.837, 0.863 y 0.752 para maíz de los ciclos primavera-verano y otoño-invierno, y para trigo del ciclo otoño-invierno, respectivamente. Estos coeficientes de correlación señalan que los rendimientos calculados tienen confianza para estimar sus cambios relativos:  $\Delta Y = (Y^{2050} - Y^{2000})/Y^{2000}$ .

Posteriormente se realizaron los cálculos de los rendimientos de estos cultivos para los mismos distritos de riego. En el cuadro 1 se presentan las características climáticas de los distritos de riego de referencia.

Estos distritos de riego se ubican en altitudes de 8 a 1 980 m y tienen precipitaciones promedio anuales ( $Pr$ ) de 205 a 1 114 mm, y el índice climático  $IHT_v^{2000}$  de 1.5 a 17.8. Los valores del  $IHT_v^{2000}$  entre 1 y 2 corresponden a las

condiciones semihúmedas, con  $1\ 000 < Pr \leq 1\ 500$  mm; de 2 a 3.5 para las condiciones semiáridas, con  $300 < Pr \leq 1\ 000$  mm; y los valores de  $IHT_v^{2000}$  mayores de 3.5 a las condiciones áridas, con  $Pr \leq 300$  mm (Contreras et al., 2002).

Para verificar el papel de la alteración de la fertilidad del suelo por el cambio climático en pronósticos de los rendimientos de los cultivos de maíz y trigo bajo riego se ha desarrollado la dependencia de los valores modales de pH, contenido de materia orgánica (MO) y formas disponibles para el cultivo de fósforo (P) y de potasio (K) en el suelo virgen no usado en la agricultura e irrigado en función del índice climático  $IHT_v^{2000}$ . Las relaciones anteriores se han transformado posteriormente a las gráficas de dependencias del índice integral de fertilidad del suelo virgen ( $F_v^{2000}$ ) y el suelo irrigado ( $F_r^{2000}$ ), en función del índice  $IHT_v^{2000}$  (figura 3). En estas gráficas se muestran los valores modales de  $F_v^{2000}$  y  $F_r^{2000}$ , típicos para las regiones con los mismos  $IHT_v^{2000}$  y los intervalos de confianza  $X \pm 2\sigma$ , donde  $X$  es el valor modal y  $\sigma$  es la desviación estándar de los logaritmos naturales de los valores parciales de cada propiedad. Porque los valores modales del  $F_r^{2000}$  para los terrenos con los cultivos de maíz

Cuadro 1. Las características climáticas promedio anuales de los distritos de riego de referencia al inicio del siglo XXI.

Distrito de riego	Estado	Altitud (m)	Cultivos	$T^{2000}$ (°C)	$Pr^{2000}$ (mm)	$IHT_v^{2000}$ (adim)
004 Don Martín	N.L.	187	Maíz y trigo	24.6	528	2.4
010 Culiacán-Humaya-San Lorenzo	Sin.	340	Maíz y trigo	25.9	584	2.5
013 Estado de Jalisco	Jal.	1 800	Maíz y trigo	20.9	761	1.6
014 Río Colorado	B.C.N.	51	Maíz	25.6	59	17.8
017 Región Lagunera	Coah.-Dur.	112	Trigo	24.6	205	4.5
034 Estado de Zacatecas	Zac.	1 980	Maíz y trigo	19.9	398	1.8
048 Ticul	Yuc.	8	Maíz	28.0	1 114	1.5

Nota: se mencionan los números y nombres de los distritos de riego según el catálogo de la Conagua;  $T^{2000}$ ,  $Pr^{2000}$  e  $IHT_v^{2000}$  son los valores promedio anuales de la temperatura del aire, precipitación y del índice climático, respectivamente. El índice climático corresponde a la superficie no regada con la vegetación natural representativa para la región climática a la cual pertenece el distrito de riego.

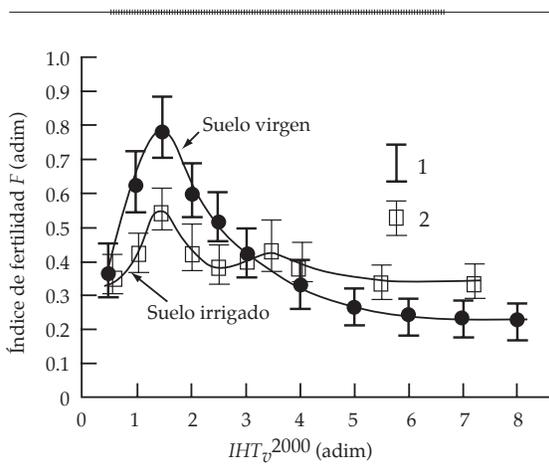


Figura 3. Dependencia de los valores modales del índice integral de fertilidad  $F_v^{2000}$  del suelo virgen y  $F_r^{2000}$  del suelo en terrenos con maíz y trigo bajo riego, en función del índice climático  $IHT_v^{2000}$  al inicio del siglo XXI. Las gráficas corresponden a los terrenos con pendientes menores a 3% y ubicados en diferentes zonas climáticas del país, en altitudes de 8 a 1 980 metros; 1 y 2 son los intervalos de confianza de variación del índice integral de fertilidad del suelo virgen e irrigado, respectivamente.

y trigo prácticamente no tienen diferencia, en la figura 3 se muestra la única gráfica  $F_r^{2000}$  ( $IHT_v^{2000}$ ).

Según la figura 3, los suelos vírgenes más fértiles en México se encuentran en las zonas con clima semihúmedo, donde la precipitación promedio anual es alrededor de 1 300 mm y el  $IHT_v^{2000}$  de 0.75 a 3 (regiones de los estados de Guanajuato, Michoacán, Chiapas, Veracruz, Campeche y Colima).

En estas regiones, el índice  $F_v^{2000}$  varía entre 0.4 y 0.8. Los valores del  $F_v^{2000}$  varían de 0.23-0.4 en las zonas áridas, donde el  $IHT_v^{2000} > 3$ , y de 0.35-0.4 en las zonas húmedas, donde el  $IHT_v^{2000} < 0.75$ . Los suelos regados son un poco más fértiles que los suelos vírgenes en las zonas áridas, donde el  $IHT_v^{2000} > 3$ , y menos fértiles que los suelos vírgenes en las zonas semiáridas y húmedas, donde el  $IHT_v^{2000} < 3$ . Los suelos regados más fértiles se ubican en las zonas áridas, donde  $3 < IHT_v^{2000} < 4$ . En comparación con los suelos vírgenes, la fertilidad de los suelos

regados no depende tanto del cambio del índice  $IHT_v^{2000}$ . Esto se puede explicar por la alteración del suelo irrigado por la actividad agrícola y la incorporación al suelo de dosis de fertilizantes relativamente grandes, especialmente de fósforo, el cual se acumula paulatinamente en el suelo.

Por lo general, los valores del índice adimensional de fertilidad integral del suelo varían de 0.23 en suelos vírgenes o de temporal, a 0.30 en las zonas áridas y semiáridas bajo riego, donde el  $IHT_r^{2000} > 4$ . En estas zonas se puede observar que la práctica de riego en los cultivos de maíz y trigo mejora la fertilidad de los suelos irrigados. El índice  $F_r^{2000}$  en estas zonas es del orden de 0.35, mayor que de los suelos vírgenes ( $F_v^{2000} = 0.25$  a 0.30). En las zonas subhúmedas y tropicales húmedas del país, donde el  $IHT_r^{2000} < 2.5$ , el índice  $F_r^{2000} = 0.33$  a 0.55, menor que de los suelos vírgenes (0.35 a 0.8). Esto significa el impacto negativo de las prácticas de riego en maíz y trigo sobre el suelo, en las zonas donde el  $IHT_r^{2000} < 2.5$ . En la publicación de Tetumo *et al.* (2001) se hizo el análisis de las láminas anuales de riego desde el punto de vista de su impacto sobre el suelo y se ha señalado que en algunos distritos de riego de México este impacto, aun en caso de aplicación del agua de buena calidad, es negativo, debido al deterioro de las condiciones microclimáticas de formación del suelo, lo que causa su degradación paulatina a largo plazo.

Analizando la forma de las gráficas  $F_v^{2000}$  ( $IHT_v^{2000}$ ) y  $F_r^{2000}$  ( $IHT_v^{2000}$ ), se puede concluir que los suelos vírgenes e irrigados más susceptibles al cambio climático se encuentran en las zonas climáticas semiáridas, semihúmedas y tropicales del país, donde el índice climático varía dentro del intervalo  $0 < IHT_v^{2000} < 2.5$ . En estas zonas, la inclinación de las gráficas o de valores absolutos de las derivadas  $|\partial(F_v^{2000})/\partial(IHT_v^{2000})|$  y  $|\partial(F_r^{2000})/\partial(IHT_v^{2000})|$  es mayor, lo que significa que aquí los cambios climáticos deberían causar mayores modificaciones de fertilidad del suelo, en comparación con otras zonas climáticas de México.

En el cuadro 2 se presentan los resultados de estimación de cambio relativo de los rendimientos ( $\Delta Y$ ) y de los componentes de la

productividad ( $\Delta Y_{\text{máx}}$ ,  $\Delta K$  y  $\Delta F_r$ ) de los cultivos de maíz y trigo bajo riego al cambio climático, para mediados del siglo XXI en los distritos

Cuadro 2. Estimación de la vulnerabilidad de los rendimientos y de los componentes de la productividad de los cultivos de maíz y trigo bajo riego al cambio climático en los distritos de riego de referencia de México.

Distrito de riego	Estado	Escenario climático	$\Delta Y_{\text{máx}}$ (%)		$\Delta K$ (%)		$\Delta F_r$ (%)		$\Delta Y$ (%)		$\phi_r$ (%)	
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
<b>Maíz de PV</b>												
004	N.L.	A2	9.7	-1.9	-31.0	-26.4	-38.5	-35.3	-52.4	-1.9	56.6	13.5
		B1	-1.3	-1.7	-15.0	-10.9	-12.8	-16.0	-25.6	-25.0	42.1	46.4
		B2	-1.5	-1.7	-18.0	-14.2	-19.2	-20.8	-33.6	-32.1	45.9	54.6
010	Sin.	A2	-9.0	-5.5	0.0	-4.6	0.0	0.0	-9.0	-5.5	0.0	0.0
		B1	-5.0	-5.4	-2.6	0.6	0.0	0.0	-7.4	-4.5	0.0	0.0
		B2	-5.3	-5.4	-3.9	-0.1	0.0	0.0	-9.0	-5.5	0.0	0.0
013	Jal.	A2	-2.5	-1.6	-25.6	-18.6	-34.3	25.2	-35.9	-1.6	68.6	12.8
		B1	-1.5	-1.6	-19.2	-24.7	10.2	26.2	18.3	24.2	43.6	79.6
		B2	-1.6	-1.6	-19.0	-23.8	3.1	26.2	11.3	24.1	21.8	82.0
014	B.C.N	A2	-6.9	2.5	-28.1	-0.1	0.0	0.0	-19.7	2.5	0.0	0.0
		B1	2.9	2.6	-37.9	-4.7	0.0	0.0	-23.4	2.8	0.0	0.0
		B2	2.6	2.6	-32.4	-5.8	0.0	0.0	-16.7	2.6	0.0	0.0
034	Zac.	A2	6.1	5.9	-2.5	0.9	0.0	0.0	5.8	5.9	0.0	0.0
		B1	6.2	6.0	-0.5	4.7	0.0	0.0	6.2	6.1	0.0	0.0
		B2	6.1	6.0	-1.1	4.9	0.0	0.0	6.1	6.0	0.0	0.0
048	Yuc.	A2	3.4	2.2	0.1	-29.8	-1.3	-1.4	-6.2	2.2	21.5	43.2
		B1	2.7	2.4	-10.9	-13.9	-5.8	-1.7	-19.7	-17.6	26.9	8.5
		B2	2.5	2.4	-10.9	-13.8	3.1	-1.7	5.7	-17.8	49.4	8.4
<b>Maíz de OI</b>												
010	Sin.	A2	-9.1	-2.2	2.9	0.4	0.0	0.0	-6.4	-1.7	0.0	0.0
		B1	-2.7	-3.2	0.5	2.5	0.0	0.0	-2.3	-0.8	0.0	0.0
		B2	-3.5	-3.5	-1.5	2.9	0.0	0.0	-4.9	-0.7	0.0	0.0
034	Zac.	A2	1.2	-0.8	-38.8	-33.3	0.0	0.0	1.2	-0.8	0.0	0.0
		B1	-0.2	-1.1	-38.4	-31.5	0.0	0.0	-0.2	-1.1	0.0	0.0
		B2	-1.0	-0.9	-39.0	-31.7	0.0	0.0	-1.0	-0.9	0.0	0.0
<b>Trigo de OI</b>												
004	N.L.	A2	1.7	3.3	2.8	-11.5	0.0	-2.1	1.7	-5.1	0.0	37.4
		B1	6.7	10.0	1.8	1.4	4.0	-1.0	11.0	3.3	39.7	33.7
		B2	9.1	9.1	1.7	-1.7	-1.0	-2.1	2.5	-8.5	42.3	26.4
013	Jal.	A2	9.3	15.8	-3.1	-12.4	0.0	0.0	9.3	11.4	0.0	0.0
		B1	16.6	16.1	-0.1	0.2	0.0	0.0	16.6	16.1	0.0	0.0
		B2	17.8	15.6	0.5	1.6	0.0	0.0	17.8	15.6	0.0	0.0
034	Zac.	A2	15.0	16.2	-14.3	-3.7	0.0	0.0	15.0	16.2	0.0	0.0
		B1	16.1	15.8	-13.4	-1.3	0.0	0.0	16.1	15.8	0.0	0.0
		B2	16.1	16.1	-13.6	-1.1	0.0	0.0	16.1	16.1	0.0	0.0

Nota: 1 y 2 = modelos climatológicos GFDL CM2.0 y ECHAM5/MPI, respectivamente; PV y OI = periodos primavera-verano y otoño-invierno, respectivamente;  $\Delta Y_{\text{máx}}$ ,  $\Delta K_r$ ,  $\Delta F_r$  y  $\Delta Y$  = los cambios de rendimiento potencial máximo, índice hídrico, índice integral de fertilidad del suelo y del rendimiento de grano calculados con las ecuaciones (20), (21), (22), (23) y (3), respectivamente;  $\phi_r$  = aportación de la alteración de fertilidad del suelo en estimaciones de vulnerabilidad de los cultivos agrícolas al cambio climático.

de riego de referencia. Los valores ( $\Delta Y$ ) se han calculado con la ecuación (3), los valores  $\Delta Y_{\text{máx}}$ ,  $\Delta K$  y  $\Delta F_r$  se han calculado con las ecuaciones siguientes:

$$\Delta Y_{\text{máx}} = \frac{Y_{\text{máx}}^{2050} - Y_{\text{máx}}^{2000}}{Y_{\text{máx}}^{2000}} \quad (20)$$

$$\Delta K = \frac{K^{2050} - K^{2000}}{K^{2000}} \quad (21)$$

$$\Delta F_r = \frac{F_r^{2050} - F_r^{2000}}{F_r^{2000}} \quad (22)$$

El análisis del cuadro 2 señala que los cambios estimados de la productividad de maíz y trigo ( $\Delta Y$ ) en el periodo del 2000 hasta 2050 dependen del escenario climático y del modelo de circulación de la atmósfera con el cual se obtienen las salidas climatológicas.

Entre los distritos de referencia analizados, la mayor vulnerabilidad al cambio climático se presenta en la productividad de maíz de grano durante el periodo primavera-verano. Se espera un cambio en su rendimiento ( $\Delta Y$ ) de -52 a +24%, dependiendo del escenario climático, modelo de circulación de la atmósfera y ubicación del distrito de riego. El cambio de la productividad potencial ( $\Delta Y_{\text{máx}}$ ) de maíz bajo riego por lo general es insignificante (de -9 a +10% para el periodo primavera-verano, y de -10 a +1% para el periodo otoño-invierno). El mayor efecto del cambio climático se espera para trigo de otoño-invierno, cuya productividad potencial en el periodo otoño-invierno va a experimentar un cambio entre -9 y +18%, con mayores incrementos (hasta 15 a 18%) en los distritos de riego 013 y 034.

El factor hídrico ( $K$ ) tiene gran importancia en los cálculos, principalmente de los rendimientos de maíz. Por reducción de reservas del agua se espera una disminución de la productividad potencial ( $Y_{\text{máx}}$ ) de grano de maíz bajo riego hasta 60%. Para el caso de

pronósticos de la productividad de grano de trigo en el periodo de otoño-invierno, el factor  $K$  afortunadamente no tiene tanta importancia como para el maíz.

En el cuadro 2 se presentan también las estimaciones del impacto de la alteración de la fertilidad del suelo ( $\phi_F$ ) sobre la productividad de los cultivos. Los valores de  $\phi_F$  se han calculado de la siguiente manera:

$$\phi_F = \left| \frac{(Y_{\text{con } F}^{2050} - Y_{\text{con } F}^{2000}) - (Y_{\text{sin } F}^{2050} - Y_{\text{sin } F}^{2000})}{(Y_{\text{con } F}^{2050} - Y_{\text{con } F}^{2000})} \right| \quad (23)$$

Donde  $Y_{\text{con } F}^{2050}$  y  $Y_{\text{con } F}^{2000}$  = productividad del cultivo calculada con la ecuación (3) para los años 2050 y 2000, respectivamente, considerando la alteración de fertilidad del suelo agrícola;  $Y_{\text{sin } F}^{2050}$  y  $Y_{\text{sin } F}^{2000}$  = productividad del cultivo calculada para los años 2050 y 2000, respectivamente, ignorando la alteración de fertilidad del suelo agrícola. Los valores de  $Y_{\text{sin } F}^{2050}$  y  $Y_{\text{sin } F}^{2000}$  se calculan con la ecuación similar a (3), donde no se considera valor de  $F_r^j$ ; es decir, que  $F_r^j=1$ .

De acuerdo con el cuadro 2, en caso de ignorar el efecto de la alteración de la fertilidad del suelo ( $F_r$ ) atribuible al cambio climático, en los cálculos de la productividad de los cultivos agrícolas bajo riego se pueden generar errores de hasta un 80% por lo menos para el año 2050, lo que significa que en estos cálculos es indispensable considerar el índice integral de fertilidad del suelo  $F_r$ . Tomar en cuenta solamente algunos componentes de este índice (por ejemplo, de la reserva de nitrógeno) no es suficiente, porque se ignoran otros componentes importantes de la fertilidad integral del suelo, de la cual depende el rendimiento del cultivo.

La aportación de la alteración de la fertilidad del suelo ( $\phi_F$ ) en los resultados de cálculos de la productividad de los cultivos bajo riego depende del nivel y signo del cambio del índice climático  $IHT_r$  promedio anual (si aumenta o decrece) en el sitio de referencia, y de la sensibilidad del suelo al

cambio climático. De acuerdo con la figura 3, los suelos irrigados más sensibles al cambio climático se ubican en las zonas climáticas de México donde  $IHT_v \leq 2.5$ .

## Conclusiones

Se ha desarrollado la metodología para pronosticar el impacto del cambio climático global sobre la producción de maíz y trigo bajo riego, considerando el factor de alteración de la fertilidad del suelo, atribuible al cambio climático.

Los suelos agrícolas más sensibles al cambio climático se ubican en las zonas climáticas húmedas, semihúmedas y semiáridas de México, donde el índice climático  $IHT_v^{2000}$  es menor de 2.5. En estas zonas, en los cálculos de rendimientos de los cultivos agrícolas bajo riego, es indispensable considerar el efecto de la alteración del índice integral de fertilidad del suelo por el cambio climático ( $F_v$ ). Al ignorar este efecto se pueden generar errores hasta de 80% en los rendimientos pronosticados, por lo menos hasta el año 2050. Considerar solamente algunos componentes de este índice (por ejemplo, la reserva de nitrógeno) resulta insuficiente, porque se ignoran otros componentes importantes de la fertilidad integral del suelo.

Por lo general, el cambio de la productividad de los cultivos de maíz de grano y trigo se espera entre -50 a +25%, en función de la región, del cultivo y de su periodo de desarrollo.

## Recomendaciones

Se recomienda utilizar la metodología desarrollada en el presente trabajo para ampliar investigaciones de vulnerabilidad de varios cultivos bajo riego de importancia nacional.

Se recomienda utilizar los escenarios posteriores del cambio climático más avanzados, considerando que la representatividad de estimaciones de vulnerabilidad de los cultivos agrícolas depende, ante todo, de la calidad de los pronósticos climáticos.

## Agradecimientos

Al proyecto Semarnat-Conacyt-23748, por el apoyo económico en la investigación. Al ingeniero Leopoldo Hernández Gómez de la Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola de la Conagua, por facilitar información necesaria para el presente trabajo.

Recibido: 11/08/2008

Aprobado: 03/06/2009

## Referencias

- ACOCK, B. *Effects of carbon dioxide on photosynthesis, plant growth, and other processes. In: Impact of carbon dioxide, trace gases, and climate change on global agriculture: proceedings of a symposium.* Kimball, B. A. (editor). IIASA, Special Publ. no. 53, 1990, pp. 45-60.
- ALLEN, L. Plant responses to rising carbon dioxide and potential interactions with air pollutants. *Journal of Environmental Quality.* Vol. 19, 1990, pp. 15-34.
- ÁNGELES, V. *Diseño agronómico de sistemas de riego presurizado.* Chapingo, México: Ed. UACH, 2000, 167 pp.
- ARNOLD, R., SZABOLCS, I. and TARGULIAN, V. (editors). *Global Soil Change.* Viena: Publ. IIASA, 1990, 109 pp.
- BAZZAZ, F. and SOMBROEK, W. (editors). *Global Climate Change and Agricultural Production Direct and Indirect Effects of Changing Hydrological, Pedological and Plant Physiological Processes.* Rome: FAO Publ., 1996, 146 pp.
- BUDYKO, M. *Climate and life.* New York: Publ. Academic Press, 1974, 508 pp.
- CASTILLO, A.M., NIKOLSKII, I., ORTIZ, C., VAQUERA, H., CRUZ, G., MEJÍA, E. y GONZÁLEZ, A. Alteración de la fertilidad del suelo por el cambio climático y su efecto en la productividad agrícola. *Interciencia.* Vol. 32, núm. 6, junio de 2007, pp. 368-376.
- CONAGUA. *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego 1990-2006.* Ed. Anual de la CONAGUA del 1990 al 2006. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua (informes impresos), 2007.
- CONDE, C. y GAY, C. *Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional. Primera versión.* Centro de Ciencias de la Atmósfera. México, D.F.: Publ. UNAM, noviembre, 2008, pp. 18-26.
- CONDE, A.C., LIVERMAN, D., FLORES, M., FERRER, R.M.A. and ARAUJO, R. Vulnerability of rainfed maize in Mexico to climate change. *Climate Research.* Vol. 9, no. 3, 1998, pp. 17-23.
- CONDE, C., MARTÍNEZ, B., SÁNCHEZ, O., ESTRADA, F., FERNÁNDEZ, A., ZAVALA, J., GAY, C. *Escenarios*

- de Cambio Climático (2030 y 2050) para México y Centro América. *Temperatura y Precipitación* [en línea]. CEA UNAM, Disponible en Internet, 2008 [citado 30 de enero de 2009]: [http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/index.php?option=com\\_content&view=article&id=72&Itemid=74](http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/index.php?option=com_content&view=article&id=72&Itemid=74)>.
- CONTRERAS, B.A., NIKOLSKII, I., ACEVES, L., ARTEAGA, R., ESCALONA, M. y FERNÁNDEZ, D. Pronóstico del cambio en algunas propiedades de los suelos agrícolas al modificarse las condiciones microclimáticas. *Agrociencia*. Vol. 36, núm. 3, mayo-junio de 2002, pp. 267-277.
- CORDERO, E. Tendencias y perspectivas del maíz y trigo en México. *Diario Asia Agro XXI "Granos básicos en México, situación actual y perspectivas. Maíz, trigo, sorgo y arroz"*. Núm. 8, mayo de 2008, pp. 6-11.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (DOF). Plan Nacional de Desarrollo 2007-2013, 31 de mayo de 2007, México, 240 pp.
- FAO. *Global agroecological zones. Methodology and results of the Global Agro-Ecological Zones Model*. Food and Agriculture Organization [en línea] Versión: 1.0, 27 septiembre 2000 [citado: 26 febrero 2008], <http://www.fao.org>.
- FAO. *Tendencias actuales y perspectivas en los fertilizantes en el mundo*. Roma: FAO-UNESCO Publ., Food and Agriculture Organization, 2004, 560 pp.
- GAY, G.C. (editor). *Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*. México, D.F.: Publ. UNAM, 2003, 220 pp.
- GAY, C., ESTRADA, F., CONDE, C. y EAKIN, H. Impactos potenciales del cambio climático en la agricultura: escenarios de producción de café para el 2050 en Veracruz (México). En: García-Codron, J.C., Liaño, D.C., Hernández, F.A., Pedraja, G.C. y Racilla-Álvarez, D. (editores). *El clima entre el mar y la montaña*. Santander, España: Asoc. Esp. Clim. y Univ. Cantabria, Serie A, núm. 4, Publ. Santander, 2004, pp. 651-660.
- GRAHAM, P.H. Nitrogen transformation in agricultural soils. *Handbook of soil science*. Sumner, M.E. (editor). New York: Publ. CRC Press, 2000, pp. C139-C148.
- IMTA. *Extractor rápido de información climatológica de México ERIC III*. Base de datos en CD, v. 1.0. Jiutepec, México: CNA-IMTA, 2006.
- INEGI. *Conjunto de las cartas de topografía, geología, uso de suelo y edafología, (escala 1:250000 y 1:50000) de la República Mexicana*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1988.
- INEGI. *Información Nacional sobre Perfiles de Suelo. Ver. 1.2*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2004, 24 pp.
- IPCC. *Cambio climático: informe de síntesis*. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe sobre el Cambio Climático: IPCC, Ginebra, Suiza, 2007, 104 pp.
- IPCC-TGICA. *General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007, 66 pp.
- KNORR, W., PRENTICE, I., HOLLAND, E. and HOUSE, J. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature*. Vol. 433, no. 7023, 2005, pp. 298-301.
- NIKOLSKII, G.I., BAKHLAEVA, O., CONTRERAS, A. and ORDAZ, V. Assessment of changes in soil properties as dependent on hydrotermic conditions of plowlands (by the example of Mexico). *Eurasian Soil Science*. Vol. 35, no. 10, 2001, pp. 1031-1036.
- NIKOL'SKII, Y.U.N., CASTILLO-ÁLVAREZ, M., BAKHLAEVA, O.S., ROMÁN-CALLEROS, X.A. and MASLOV, B.S. The influence of the possible global climate change on the properties of Mexican soils. *Eurasian Soil Science*. Vol. 39, no. 11, 2006, pp. 1164-1169.
- PEGOV, S.A. y JOMYAKOV, P. *Modelación del desarrollo de los sistemas ecológicos*. (En ruso). San Petersburgo, Rusia: Ed. Gidrometeoizdat, 1991, 223 pp.
- REYES, P. *El maíz y su cultivo*. México, D.F.: AGT, S.R., 1990, 459 pp.
- TETUMO, G.J., NIKOLSKII, G.I., ORTIZ, C.S., TIJERINA, L.C. y ARTEAGA, R.R. Evaluación del impacto del riego sobre algunas propiedades de suelos a través del índice hidrotérmico. *Agrociencia*. Vol. 35, núm. 2, marzo-abril de 2001, pp. 137-147.
- VOLOBUEV, V.R. *Introducción a la energía de formación de suelos*. (En ruso). Moscú: Nauka Publ., 1974, 127 pp.
- YOUNG, I. *Modelling changes in soil properties. Soil Resilience and Sustainable Land Use*. Bristol, UK: CAB International Publ., 1994, pp. 423-447.

## Abstract

TERRAZAS-MENDOZA, L., NIKOLSKII-GAVRILOV, I., HERRERA-GÓMEZ, S.S., CASTILLO-ÁLVAREZ, M. & EXEBIO-GARCÍA, A.A. Alteration of soil fertility and irrigated maize and wheat vulnerability due to climate change. *Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. I, no. 1, January-March, 2010, pp. 87-102.

*Estimation of agricultural crop vulnerability to global climate change has usually been made for rainfed crops without taking into account soil fertility alteration as a result of climate change. The main objective of this paper is to assess the role of the integrated soil fertility index modification in calculations of maize and wheat grain productivity in various irrigation districts in Mexico. The methodology to predict the alteration of some irrigated soil properties and integrated fertility index due to climate change has been developed. The results show that in Mexico, irrigated soil is less sensitive to climate change than rainfed agricultural soil and non-agricultural (virgin) soils, and it does not affect irrigated crop vulnerability to climate change significantly. The main effect of soil fertility alteration in estimations of irrigated crop vulnerability is expected in semiarid, semi-humid and humid tropical Mexican zones, where dimensionless mean annual radiative index of dryness IHT is less than 2.5.*

**Keywords:** geographic law of soil zonality, climatic index, integrated soil fertility index.

## Dirección institucional de los autores

*Ing. Liliana Terrazas-Mendoza*

Ingeniera en Recursos Naturales Renovables  
Candidata a Maestra en Ciencias en Hidrociencias  
Colegio de Postgraduados  
Programa de Hidrociencias  
kilómetro 36.5 de la carretera México-Texcoco  
56230 Montecillos, Estado de México, México  
teléfono: + (52) (595) 9520 200, extensión 1175  
fax: + (52) (595) 9520 237  
termely@colpos.mx

*Dr. Iouri Nikolskii-Gavrilov*

Profesor-investigador  
Colegio de Postgraduados  
Programa de Hidrociencias  
kilómetro 36.5 de la carretera México-Texcoco  
56230 Montecillos, Estado de México, México  
teléfono: + (52) (595) 9520 200, extensión 1175  
fax: + (52) (595) 9520 237  
nikolski@colpos.mx

*M. en C. Sergio Santiago Herrera-Gómez*

Maestro en Ciencias en Hidrociencias  
Colegio de Postgraduados  
Programa de Hidrociencias

kilómetro 36.5 de la carretera México-Texcoco  
56230 Montecillos, Estado de México, México  
teléfono: + (52) (595) 9520 200, extensión 1175  
fax: + (52) (595) 9520 237  
hserch@colpos.mx

*Dr. Marcial Castillo-Álvarez*

Profesor-investigador  
Universidad Autónoma Chapingo  
Centro Regional Universitario Sureste  
kilómetro 7.0, carretera Teapa-Vicente Guerrero  
Ranchería San José Puyacatengo  
86800 Teapa, Tabasco  
teléfono: + (52) (932) 3271 622  
marcial.castillo@correo.chapingo.mx

*Dr. Adolfo Antenor Exebio-García*

Profesor-investigador  
Colegio de Postgraduados  
Programa de Hidrociencias  
kilómetro 36.5 de la carretera México-Texcoco  
56230 Montecillos, Estado de México, México  
teléfono: + (52) (595) 9520 200, extensión 1153  
fax: + (52) (595) 9520 237  
exebio@colpos.mx