



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS  
AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO**

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**ALTERACIÓN DE LA FERTILIDAD DEL SUELO POR EL CAMBIO  
CLIMÁTICO Y SU EFECTO EN LA PRODUCTIVIDAD DE MAÍZ Y TRIGO  
BAJO RIEGO**

**SERGIO SANTIAGO HERRERA GÓMEZ**

**T E S I S**

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO DE MÉXICO**

**2008**

---

La presente tesis, titulada: **alteración de la fertilidad del suelo por el cambio climático y su efecto en la productividad de maíz y trigo bajo riego**, realizada por el alumno: **Sergio Santiago Herrera Gómez**, bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



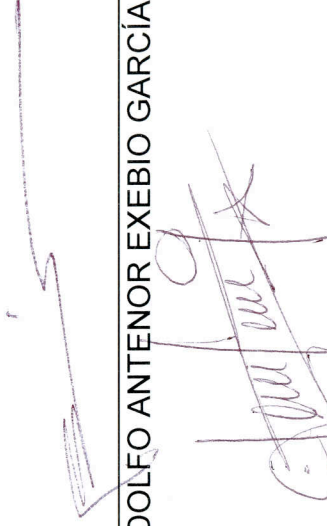
DR. IOURII NIKOLSKII GAVRILOV

ASESOR:



DR. MARCIAL CASTILLO ÁLVAREZ

ASESOR:



DR. ADOLFO ANTEÑOR EXEBIO GARCÍA

ASESOR:



M.C. JOSÉ ALEJANDRO CONTRERAS BENÍTEZ

Montecillo, Texcoco, México, 30 de Julio de 2008

## **ALTERACIÓN DE LA FERTILIDAD DEL SUELO POR EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU EFECTO EN LA PRODUCTIVIDAD DE MAÍZ Y TRIGO BAJO RIEGO**

### **RESUMEN**

Se ha desarrollado la metodología de estimación de alteración de algunas propiedades y un índice integral de fertilidad de los suelos irrigados de México atribuible al cambio climático global durante el siglo XXI. Esta metodología fue aplicada para evaluar la vulnerabilidad de la productividad de los cultivos de maíz de grano y trigo bajo riego en algunos distritos de riego de referencia del país ubicados en diferentes zonas climáticas. Los resultados de la investigación señalan que la sensibilidad de los suelos agrícolas bajo riego en México, al cambio climático, es mucho menor que los suelos de temporal y vírgenes y no afecta significativamente la vulnerabilidad de los cultivos de maíz y trigo bajo riego. Por lo general, los valores de cambio de la productividad de grano de los cultivos de maíz y trigo varían entre -10 a + 70% en función de la región, del cultivo y de su periodo de desarrollo. La aportación principal al incremento del rendimiento de los cultivos está en el aumento esperado de la temperatura del aire, de la radiación fotosintéticamente activa y de la cantidad de bióxido de carbono en la atmósfera. El factor principal de la pérdida de cosecha es la disminución de la disponibilidad del agua en el suelo debido a la disminución de precipitación y al aumento de la demanda de agua por los cultivos. Para prevenir la pérdida de cosecha se recomienda ahorrar el agua en los distritos de riego combatiendo sus pérdidas en las redes de conducción y mejorando las tecnologías de riego.

Palabras clave: grano, vulnerabilidad, régimen hídrico, índice, propiedades.

**ALTERATION OF THE FERTILITY OF THE SOIL BY THE CLIMATE CHANGE  
AND ITS EFFECT IN THE PRODUCTIVITY OF MAIZE AND WHEAT IN IRRIGATE  
SOILS**

**ABSTRACT**

The methodology to assess some soil properties and integral fertility irrigated Mexican soils alteration due to the global climate change during XXI century has been developed. This methodology has been applied to assess vulnerability of grain productivity of irrigated maize and wheat in some referenced irrigation districts located in different climatic zones. The results of investigation show that the irrigated agricultural soil sensitivity to the climate change is much less than of rain fed and virgin soils and it does not affect significantly irrigated maize and wheat crops productivity. In general, the values of maize and wheat grain productivity change varies between -10 and +70% as a function of the region, crop and vegetation period. The atmospheric temperature, photosynthetically active radiation and carbon dioxide growth have the principal contribution to the crops productivity. The principal factor of crop yield lost is related with precipitation reduction and growth of water requirement for the crops. In order to prevent the crop yield loss is recommended to save the water resource by means of reduction of water losses in the conduction net and irrigation technologies improvement.

Key words: grain, vulnerability, water regime, index, properties.

AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y  
TECNOLOGÍA (CONACYT)

Por el financiamiento otorgado para realizar  
mis estudios de Maestría en Ciencias

A LA SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS  
NATURALES (SEMARNAT)

Por el apoyo recibido para la realización del presente trabajo  
a través del proyecto SEMARNAT-CONACYT 23748

AL DR. IOURII NIKOLSKII GAVRILOV

Por el tiempo que dedicó al dirigir esta tesis.  
Gracias por su paciencia, orientación  
y dirección de este trabajo

AL DR. MARCIAL CASTILLO ÁLVAREZ

Por sus valiosas observaciones a este trabajo.  
Gracias por su tiempo y disposición en toda la  
elaboración de este trabajo

AL DR. ADOLFO ANTENOR EXEBIO GARCÍA

Por sus valiosas sugerencias y contribuciones  
durante el proceso de investigación  
gracias por su apoyo

AL M.C. JOSÉ ALEJANDRO CONTRERAS BENÍTEZ

Por sus acertadas sugerencias  
y disponibilidad oportuna para la elaboración  
de este trabajo

A Dios, al que debo todo lo que soy y lo que tengo

A los millones de mexicanos que al pagar impuestos han hecho posible que el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) haya financiado mi formación académica en el Colegio de Postgraduados (CP);

Al Dr. Iouri Nikolskii Gavrilov, Dr. Marcial Castillo Álvarez y a la maestra Oktiabrina Backlaeva Egorova por su calidad humana, y estar siempre dispuestos a ayudarme;

A la maestra María Eugenia Delgadillo Piñón, por su amistad y apoyo brindado

Al Ing. Leopoldo Hernández, por su disposición para obtener la información indispensable para este trabajo

A mi familia que tanto apoyo me brindó en los momentos que más lo necesité. A mis padres Margarita y Santiago; a mis hermanos: Santiago, Miriam, Ángel y Nínive; a mis sobrinos; Juan y Citlali

A Liliana Terrazas, que con cariño y dedicación ha hecho posible este trabajo.

A mis amigos:

José Luis, Viridiana, Hector, por el apoyo con el manejo de los Sistemas de Información Geográfica; al Donas, Adolfo, Dulce, Juan Luis, Daysi, Rocío, Fátima, Leslie, Jazmín, Pablo y Verónica, por su amistad y apoyo siempre oportuno.

# CONTENIDO

Página

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS</b> .....	5
2.1. Objetivo general.....	5
2.2. Objetivos particulares.....	5
2.3. Hipótesis.....	6
<b>3. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	7
3.1. Pronósticos existentes del cambio climático en México.....	7
3.2. Impacto directo del incremento en la concentración del CO <sub>2</sub> en la atmósfera sobre la productividad agrícola.....	12
3.3. Pronósticos de los rendimientos de algunos cultivos agrícolas de temporal en función de los escenarios del cambio climático.....	13
3.4. Método para evaluar alteración de fertilidad del suelo agrícola debido al cambio climático y su impacto sobre la productividad agrícola.....	17
3.5. Cálculo del índice integral de fertilidad del suelo.....	23
<b>4. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	27
4.1. Materiales.....	27
4.2. Metodología.....	28
4.2.1. Selección de los sitios de referencia para pronosticar vulnerabilidad de los rendimientos.....	30
4.2.2. Cálculo del índice $IHT_r$ para los terrenos bajo riego.....	31
4.2.3. Pronóstico de los rendimientos de maíz y trigo en función de los escenarios del cambio climático global.....	32
4.2.3.1. Cálculo del rendimiento potencial.....	34

4.2.3.2. Cálculo de los componentes de la radiación neta promedio mensual.....	38
4.2.3.3. Cálculo del índice hídrico .....	38
4.2.3.4. Tratamiento de los datos sobre algunas propiedades de los suelos agrícolas de temporal y suelos irrigados .....	41
4.2.3.5. Evaluación de la alteración de algunas propiedades del suelo y del índice integral de fertilidad del suelo causado por el cambio climático.....	44
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>49</b>
5.1. Rendimiento potencial del cultivo de maíz y trigo bajo riego .....	49
5.2. Cambio del índice hídrico del suelo por el cambio climático en México.....	56
5.3. Dependencia de algunas propiedades químicas y biológicas del suelo y del índice integral de fertilidad del suelo en función del índice climático en diferentes partes de México al principio del siglo XXI .....	61
5.4. Evaluación del cambio del índice integral de fertilidad por el cambio climático .....	66
5.5. Estimación de la vulnerabilidad de maíz y trigo al cambio climático .....	68
5.5.1 Estimación de la vulnerabilidad del maíz.....	71
5.5.2 Estimación de la vulnerabilidad del trigo.....	80
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>81</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>82</b>
<b>8. ANEXOS.....</b>	<b>87</b>



## LISTA DE CUADROS

	Página
<p><b>Cuadro 1.</b> Valores promedio anuales de la temperatura del aire (<math>T^{2000}</math>), precipitación (<math>P^{2000}</math>) del índice climático (<math>IHT_v^{2000}</math>) para el inicio del siglo XXI típicos para los distritos de riego seleccionados con la producción de maíz de grano y trigo .....</p>	50
<p><b>Cuadro 2.</b> Cambios en la respuesta fisiológica y productiva del cultivo de maíz del ciclo <i>PV</i> bajo riego con alto nivel de insumos en condiciones de cambio climático durante el siglo XXI .....</p>	52
<p><b>Cuadro 3.</b> Cambios en la respuesta fisiológica y productiva del cultivo de maíz del ciclo <i>OI</i> bajo riego con alto nivel de insumos en condiciones de cambio climático durante el siglo XXI .....</p>	53
<p><b>Cuadro 4.</b> Cambios en la respuesta fisiológica y productiva del cultivo de trigo del ciclo <i>OI</i> bajo riego con alto nivel de insumos en condiciones de cambio climático durante el siglo XXI .....</p>	54
<p><b>Cuadro 5.</b> Cambio en las variables climáticas (<math>\Delta Rn_r</math>, <math>\Delta IHT_r</math> y <math>\Delta K_{hidr}</math>) durante el ciclo <i>PV</i> del maíz de riego en una atmósfera con concentración de <math>CO_2</math> duplicada .....</p>	58
<p><b>Cuadro 6.</b> Cambio en las variables climáticas (<math>\Delta Rn_r</math>, <math>\Delta IHT_r</math> y <math>\Delta K_{hidr}</math>) durante la estación de crecimiento de maíz <i>oi</i> de riego con alto nivel de insumos en una atmósfera con concentración de <math>CO_2</math> duplicada .....</p>	59
<p><b>Cuadro 7.</b> Cambio en las variables climáticas (<math>\Delta Rn_r</math>, <math>\Delta IHT_r</math> y <math>\Delta K_{hidr}</math>) durante la estación de crecimiento del trigo <i>OI</i> .....</p>	60
<p><b>Cuadro 8.</b> Cambio del índice de fertilidad de los suelos irrigados con producción de maíz de grano en el ciclo <i>PV</i> según el escenario climático de los modelos <i>GFDL-R30</i> y <i>CCC</i> .....</p>	66
<p><b>Cuadro 9.</b> Cambio del índice de fertilidad de los suelos irrigados con producción de maíz de grano en el ciclo <i>OI</i> según el escenario climático de los modelos <i>GFDL-R30</i> y <i>CCC</i> .....</p>	67
<p><b>Cuadro 10.</b> Cambio del índice de fertilidad de los suelos irrigados con producción de trigo en el ciclo <i>OI</i> según el escenario climático de los modelos <i>GFDL-R30</i> y <i>CCC</i> .....</p>	67

<b>Cuadro 11.</b> Escenarios de cambios en las componentes del rendimiento para maíz de grano del periodo <i>PV</i> al final del siglo XXI en caso de duplicación del contenido de CO <sub>2</sub> en la atmósfera.....	71
<b>Cuadro 12.</b> Escenarios de cambios en las componentes del rendimiento para el maíz de grano del periodo <i>O</i> / al final del siglo XXI en caso de duplicación del contenido de CO <sub>2</sub> en la atmósfera.....	74
<b>Cuadro 13.</b> Escenarios de cambios en las componentes del rendimiento para el trigo del periodo <i>O</i> / al final del siglo XXI en caso de duplicación del contenido de CO <sub>2</sub> en la atmósfera.....	77
<b>Cuadro 14.</b> Análisis comparativo de los resultados de estimación de vulnerabilidad del cultivo de maíz de riego con los escenarios climáticos al final del siglo XXI desarrollados por castillo (2007) con los modelos climáticos <i>GFDL-R30</i> y <i>CCC</i> para dos zonas climáticas de México.....	80

## LISTA DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 1.</b> Esquema metodológico general para la estimación de cambios en los rendimientos de maíz y trigo de riego bajo escenario de cambio climático global.....	29
<b>Figura 2.</b> Esquema de pronóstico de cambio del índice integral de fertilidad del suelo agrícola bajo riego en el sitio marcado con subíndice 1, en el transcurso del siglo XXI del valor $F_{r,1}^{2000}$ hasta $F_{r,1}^{2100}$ .....	48
<b>Figura 3.</b> Ubicación de los distritos de riego seleccionados para escenarios de cambio en el rendimiento del maíz de riego y las condiciones climáticas anuales al inicio del siglo XXI.....	51
<b>Figura 4.</b> Cambio de los rendimientos de maíz de grano producido en los periodos primavera – verano ( <i>PV</i> ), otoño – invierno ( <i>OI</i> ) y de trigo del periodo otoño – invierno ( <i>OI</i> ) en algunos distritos de riego del país durante los últimos 10 años.....	57
<b>Figura 5.</b> Dependencia de los valores modales regionales del contenido de materia orgánica ( <i>MO</i> ) y <i>pH</i> , en los suelos vírgenes no usados en la agricultura y suelos agrícolas con la producción de maíz de grano y trigo de temporal y bajo riego en México.....	61
<b>Figura 6.</b> Dependencia de los valores modales regionales del contenido de fósforo ( $P_2O_5$ ) y potasio ( $K_2O$ ), en los suelos vírgenes no usados en la agricultura y suelos agrícolas con producción de grano de maíz y trigo de temporal y bajo riego en México.....	62
<b>Figura 7.</b> Dependencia del índice integral de fertilidad $F_{r,1}^{2000}$ de suelos agrícolas vírgenes y de temporal y $F_{r,1}^{2000}$ de suelos irrigados.....	64
<b>Figura 8.</b> Comparación de los rendimientos de maíz de grano y trigo calculados ( $Y_{calc} / Y_{calc}^{max}$ ) y obtenidos en campo ( $Y_{real} / Y_{real}^{max}$ ) en algunos distritos de riego del país.....	69
<b>Figura 9.</b> Cambio en la productividad de maíz de grano bajo riego del periodo primavera – verano ( <i>PV</i> ) en los distritos de riego de México al final del siglo XXI debido al escenario del cambio climático correspondiente al modelo climático CCC en caso de duplicación del contenido de $CO_2$ en la atmósfera.....	73

<b>Figura 10.</b> Cambio en la productividad de maíz de grano bajo riego del periodo primavera – verano ( <i>PV</i> ) en los distritos de riego de México al final del siglo XXI debido al escenario del cambio climático correspondiente al modelo climático <i>GFDL-30</i> en caso de duplicación del contenido de CO <sub>2</sub> en la atmósfera.....	73
<b>Figura 11.</b> Cambio en la productividad de maíz de grano bajo riego del periodo otoño – invierno ( <i>OI</i> ) en los distritos de riego de México al final del siglo XXI debido al escenario del cambio climático correspondiente al modelo climático <i>GFDL-30</i> en caso de duplicación del contenido de CO <sub>2</sub> en la atmósfera.....	76
<b>Figura 12.</b> Cambio en la productividad de maíz de grano bajo riego del periodo otoño - invierno ( <i>OI</i> ) en los distritos de riego de México al final del siglo XXI debido al escenario del cambio climático correspondiente al modelo climático CCC en caso de duplicación del contenido de CO <sub>2</sub> en la atmósfera.....	76
<b>Figura 13.</b> Cambio en la productividad del trigo bajo riego del periodo otoño - invierno ( <i>OI</i> ) en los distritos de riego de México al final del siglo XXI debido al escenario del cambio climático correspondiente al modelo climático CCC en caso de duplicación del contenido de CO <sub>2</sub> en la atmósfera.....	79
<b>Figura 14.</b> Cambio en la productividad del trigo bajo riego del periodo otoño - invierno ( <i>OI</i> ) en los distritos de riego de México al final del siglo XXI debido al escenario del cambio climático correspondiente al modelo climático <i>GFDL-30</i> en caso de duplicación del contenido de CO <sub>2</sub> en la atmósfera.....	79

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la producción de los cultivos de maíz de grano y trigo es muy importante y estratégica en el mundo (Cordero, 2008). Ambos cultivos son de gran importancia en el ámbito internacional y nacional, ya que son básicos en la dieta alimenticia humana. En México, la mayor producción de estos cultivos (alrededor de 15%) proviene de las unidades y distritos de riego, las cuales abarcan  $6.4 \cdot 10^6$  ha de las más de  $20 \cdot 10^6$  dedicadas a la agricultura, y en ellas se generan el 42% del valor total de la producción agrícola. De la extracción total de agua en el país, 77% se dedica a la actividad agropecuaria (DOF, 2007).

México es centro de origen de la gramínea del maíz, que nuestros ancestros desarrollaron a lo largo de miles de años y más de 350 generaciones lo han relegado a la humanidad. Sin embargo, México es un país importador de maíz, solamente superado en importación por Japón y Corea del Sur con  $16 \cdot 10^6$  y  $9 \cdot 10^6$  t respectivamente. El mayor número de importaciones mexicanas de maíz amarillo se debe al crecimiento de la industria pecuaria.

Durante el periodo de 1994 a 2007, tanto la producción nacional de maíz como el rendimiento de la superficie cosechada presentaron aumentos. La primera en cerca de 28.3% pasando de  $18 \cdot 10^6$  t en 1994, a  $23.4 \cdot 10^6$  t en el 2007. Por su parte, el rendimiento aumentó 37.16 % hasta llegar a  $3.05$  t  $ha^{-1}$ . En el mismo periodo, la superficie total cosechada de trigo decreció 32.2% hasta llegar a  $654 \cdot 10^3$  ha. La producción de trigo decreció 15.7%. En 1994 la producción era de poco más de  $4 \cdot 10^6$  t, mientras que en 2007 fue de  $3.5 \cdot 10^6$  t.

De acuerdo con Cordero (2008), el aumento en la demanda del maíz por la generación de bio combustibles y etanol, ha provocado un aumento en los precios reales, el cual va de  $1,600$  \$MN  $t^{-1}$  a  $2,011$  \$MN  $t^{-1}$  en 2006, con un estimado de  $2,202$  \$MN  $t^{-1}$  en 2001. Lo anterior, representa un aumento de 34.7% de 2005 a 2007. Cordero (2008), también argumenta que el interés por el cultivo de bio

combustibles ha cambiado la tendencia de los precios reales del trigo en los dos últimos años ubicándose en 1,677 \$MN t<sup>-1</sup> en 2006 y un estimado de 2,742 \$MN t<sup>-1</sup> en 2007. El valor de la producción de maíz durante 2007 fue de 51,513\*10<sup>6</sup> \$MN, lo que representa 14.63% del Producto Interno Bruto sectorial y un aumento de 62.9% de 2005 a 2007. Por su parte, el valor de la producción de trigo en 2007 fue de 9,597\*10<sup>6</sup> \$MN, lo que representa 2.73% del Producto Interno Bruto sectorial y un aumento de 63% durante el periodo de 2005 a 2007.

Los principales estados productores de maíz son: Sinaloa, Jalisco y el Valle de México. En lo que respecta al trigo: Baja California y Sonora son los estados productores que sobresalen en el país.

México consume 31.6\*10<sup>6</sup> t de maíz, del total, 23.4\*10<sup>6</sup> t son de producción propia principalmente de maíz blanco, mientras que el resto de importación, en especial de maíz amarillo para la industria pecuaria. Cerca de 15\*10<sup>6</sup> t del maíz blanco producidos son comercializadas y el 33% restante es para autoconsumo.

El consumo de trigo en el país es de 7\*10<sup>6</sup> de toneladas de las cuales 3.4\*10<sup>6</sup> se producen en el territorio, 67% proviene de los distritos de riego y 3.6\*10<sup>6</sup> son importadas para la industria harinera.

La situación del precio del maíz y del trigo resulta favorable para los productores. México debe fortalecer y aumentar su producción con el fin de asegurar el abasto de la población ya que, además, el aumento de precio internacional del maíz provocará una reducción en los excedentes exportables de Estados Unidos.

Según varias publicaciones el cambio climático que se espera en el transcurso del siglo XXI, en el caso de duplicación de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, puede causar en México un incremento en 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 del país (Magaña, *et al.*, 1997; Gay, 2003). En el caso de triplicación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera los cambios climáticos serán mucho más drásticos (IPCC, 2007a). En México hay pocas publicaciones relacionadas con la vulnerabilidad de los

cultivos al cambio climático (Conde, *et al.*, 1998; Gay, 2003). Estos pronósticos corresponden solamente a los cultivos de temporal y no consideran la alteración de la fertilidad del suelo atribuible al cambio climático. Tampoco hay pronósticos para el cultivo de trigo. Desafortunadamente, hasta la fecha no ha sido estimada la vulnerabilidad al cambio climático por lo menos para algunos cultivos bajo riego.

Los resultados de las investigaciones realizadas para las condiciones de temporal, señalan que en el caso de duplicación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera se espera la pérdida de la productividad de grano de maíz como cultivo con mecanismo fotosintético C<sub>4</sub> hasta 60% y el crecimiento de la productividad de trigo con mecanismo fotosintético C<sub>3</sub> hasta 30% dependiendo de la región de México (Conde, *et al.*, 1998; Allen, 1990). Lo anterior, muestra la importancia de la evaluación de la vulnerabilidad de los principales cultivos de México, como maíz y trigo, al cambio climático. Asimismo, es indispensable ampliar los estudios hacia los terrenos irrigados del país considerando el gran papel de estas áreas en la producción agrícola.

Para pronosticar rendimientos de los cultivos en función de los escenarios de cambio se utilizan, generalmente, modelos matemáticos que consideran el efecto de la concentración de CO<sub>2</sub> en las plantas, la radiación fotosintéticamente activa (*RFA*), temperatura del aire (*T*) y la precipitación (*Pr*). Estos factores son los principales responsables de la productividad potencial (ó máxima) del cultivo, siendo la precipitación el factor limitante del rendimiento real pronosticado. A la fecha se sabe que el cambio climático puede alterar la fertilidad del suelo agrícola, afectando consecuentemente a la productividad en función de los escenarios del cambio climático.

Lamentablemente el efecto de alteración de fertilidad del suelo prácticamente no se toma en consideración en las estimaciones existentes de vulnerabilidad de los cultivos al cambio climático (Boote, *et al.*, 1996; Conde, *et al.*, 1998). La predicción de la alteración de las propiedades de los suelos en función del cambio climático a largo plazo, es un problema difícil. El uso de modelos matemáticos en esta predicción, tiene poca confiabilidad (Young, 1994), la cual disminuye cuando el periodo considerado aumenta (Ruelle, 1989). Una alternativa para obtener

pronósticos confiables consiste en utilizar un método distinto de la modelación matemática. Durante los últimos años se han publicado varios trabajos dedicados a la metodología de pronóstico de la alteración de la fertilidad de los suelos agrícolas atribuible al cambio climático basada en la ley geográfica de zonificación del suelo y otros recursos naturales (Tetumo, *et al.*, 2001; Nikolskii, *et al.*, 2006; Contreras, *et al.*, 2002). En esta metodología, se utiliza la relación cuantitativa entre los valores modales regionales de algunas propiedades químicas y biológicas del suelo virgen (no usado en la agricultura) y un índice climático llamado índice de aridez de Budyko ó índice hidrotérmico local. Este índice para los terrenos vírgenes ó de temporal ( $IHT_v$  ó  $IHT_t$ ) de acuerdo con Nikolskii, *et al.* (2006), se calcula de la siguiente manera:

$$IHT_v = IHT_t = Rn/\lambda(Pr - S) \quad (1)$$

Donde  $Rn$ ,  $Pr$  y  $S$  son los valores promedio anuales de la radiación neta, precipitación y escurrimiento superficial,  $\lambda = 2.512 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$  es la constante igual al calor latente.

Para los terrenos irrigados el mismo índice se calcula así (Nikolskii, *et al.*, 2006):

$$IHT_r = Rn/\lambda(Pr + Lr - S) \quad (2)$$

Donde  $Lr$  es la lámina promedio anual de riego.

Para el caso de terrenos planos con pendientes menores de 3%, en las fórmulas (1) y (2) se puede considerar  $S \cong 0$  (Nikolskii, *et al.*, 2006). Es decir, que el valor  $Pr$  que participa en las fórmulas (1) y (2) corresponde a la cantidad de agua que anualmente recibe el suelo y que se utiliza para su formación en actividades microbiológicas y absorción radical, transporte de sustancias químicas, biológicas y físicas, intercambios catiónicos y aniónicos, etc. Una fracción de la radiación neta también se utiliza en los procesos biológicos, químicos y físicos de formación del suelo. Por lo anterior, resulta necesaria y factible la evaluación de la vulnerabilidad de los cultivos agrícolas bajo riego en México atribuible al cambio climático, considerando no solamente las modificaciones del clima, sino también la alteración de fertilidad del suelo agrícola.



## 2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

### 2.1. Objetivo general

Estimar la alteración de la fertilidad del suelo agrícola en función de los escenarios existentes del cambio climático y su efecto en la productividad de maíz de grano y trigo bajo riego, en diferentes zonas climáticas de México al final del siglo XXI, para el caso de duplicación en la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

### 2.2. Objetivos particulares

- Recolectar información y estimar las láminas de riego anuales para maíz y trigo y sus rendimientos representativos para algunos sitios de referencia del país al principio del siglo XXI.
- Pronosticar el cambio de estas láminas de riego en los mismos sitios de referencia para finales del siglo XXI, utilizando los escenarios existentes del cambio climático global para el caso de duplicación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.
- Desarrollar una metodología para evaluar la alteración de algunas propiedades químicas y biológicas y del índice integral de fertilidad del suelo agrícola de los terrenos bajo riego, atribuible al cambio climático que se espera al final del siglo XXI.
- Actualizar las relaciones cuantitativas entre las mismas propiedades de los suelos vírgenes (no usados en la agricultura), ubicados en terrenos poco inclinados (con pendientes menores de 3%) y el índice climático  $IHT^{2000}$  representativo para las condiciones climáticas promedio anuales al principio del siglo XXI en México.
- Establecer la dependencia cuantitativa entre el índice integral de fertilidad de suelos vírgenes y agrícolas bajo riego en terrenos poco inclinados y el índice climático  $IHT^{2000}$ .

- Estimar la vulnerabilidad del maíz (con ruta fotosintética C<sub>4</sub>) y trigo (con ruta fotosintética C<sub>3</sub>) bajo riego atribuible al cambio climático global a finales del siglo XXI para el escenario de duplicación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera en diferentes partes de México, considerando no solamente los cambios de CO<sub>2</sub>, la radiación fotosintéticamente activa, temperatura del aire y precipitación, sino el impacto de la alteración de la fertilidad del suelo agrícola en los terrenos irrigados.

### **2.3. Hipótesis**

- El cambio climático puede modificar significativamente la fertilidad de los suelos agrícolas bajo riego en algunas zonas climáticas de México.
- La alteración de la fertilidad del suelo agrícola a finales del siglo XXI con el cambio climático global, puede ser factor significativo en los pronósticos de la productividad agrícola en los terrenos bajo riego.
- La lámina de riego promedio anual aplicada en los distritos de riego, puede ser un factor importante para mitigar los efectos negativos del cambio climático sobre la productividad agrícola.

### 3. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1. Pronósticos existentes del cambio climático en México

Para algunas estaciones meteorológicas de México, existen escenarios que describen cambios en la temperatura media anual y en la precipitación total anual para un escenario de duplicación de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera al final del siglo XXI, utilizando varios Modelos de Circulación General de diferentes dependencias (Liverman y O'Brien, 1991):

- GFDL del Laboratorio Geofísico de Dinámica de Fluidos de Princeton, EUA;
- GISS del Instituto Goddard para Estudios Espaciales, EUA;
- NCAR del Centro Nacional para la Investigación Atmosférica, México;
- OSU de la Universidad Estatal de Oregon, EUA; y
- UKMO de la Oficina Meteorológica del Reino Unido.

Estos escenarios del calentamiento global aún son inciertos, debido a que las proyecciones de los modelos varían ampliamente, principalmente en la representación de la precipitación, la cual difiere en algunos casos hasta en el signo. Sin embargo, los modelos climáticos sugieren que las condiciones climáticas futuras de México podrían ser más calientes y secas. Lo anterior, podría tener serias consecuencias para la agricultura de temporal y de riego, pues aunque la precipitación se incrementa como proyectan algunos modelos en la mayoría de los casos, no se compensan los incrementos con la evaporación potencial.

Aunque la mayoría de los modelos anteriores producen un incremento total en la temperatura, ellos difieren en sus proyecciones regionales sobre la magnitud del calentamiento y con frecuencia no coinciden en la magnitud y dirección de los cambios en la precipitación. Este estudio ha mostrado que los modelos tienen serias dificultades para reproducir el clima y su variabilidad actual. Por ejemplo, en una comparación entre las salidas de los modelos climáticos y la información de la estación de Puebla (representativa de las tierras altas de México) se encontró que la mayor parte de los modelos sobreestimó la temperatura media anual, algunos en más de 10 °C. Lo anterior, probablemente se debe al bajo detalle topográfico de los modelos.

Para la lluvia la situación se complica, pues algunos modelos sólo obtienen la mitad de la lluvia anual observada en Puebla, mientras otros modelos sobrestiman por arriba de cuatro veces. Para Mérida los modelos sobrestiman ligeramente la temperatura, mientras el modelo que mejor predijo la temperatura en Puebla sobreestima por mucho la precipitación en Mérida. Otro problema serio es la imposibilidad de los modelos para reproducir la estacionalidad de la lluvia en el norte de México. Es importante mencionar que los nuevos modelos y las nuevas versiones están mejorando constantemente en estos aspectos, por esto es conveniente afinar los pronósticos de vulnerabilidad a medida que se generen nuevos escenarios de cambio climático (Liverman y O'Brien, 1991).

Hulme y Sheard (1999) presentaron cuatro escenarios climáticos para México (para mediados y final del siglo XXI, respectivamente: 2050 y 2080), resultado del valor mediano de los resultados de 10 modelos climáticos de 7 laboratorios de 6 países del mundo. Pero los escenarios únicamente proporcionan información sobre los valores medios anuales de precipitación y temperatura, y carece de pronósticos relacionados con la radiación. Con estos modelos se pronostican disminuciones en la precipitación en el sur de México y para el norte se carece de información sobre cambios en la precipitación. Sobre la temperatura se pronostican incrementos de unos 2.5 °C en promedio para el escenario medio, con mayores incrementos en el norte del país.

En forma similar, el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, desarrolló pronósticos de cambio climático en diferentes regiones de México (Magaña, *et al.*, 1997; Gay, 2003). Estos autores presentan los cambios climáticos regionales para México, obtenidos de la interpolación de las salidas de los Modelos de Circulación General (MCG) para experimentos numéricos de 1xCO<sub>2</sub> (concentración actual de CO<sub>2</sub>) y 2xCO<sub>2</sub> (duplicación de la concentración actual de CO<sub>2</sub>) considerando que, según los escenarios de emisiones futuras, la duplicación en la concentración de este gas podría manifestarse para mediados o finales del siglo XXI, provocando un calentamiento global.

Los Modelos de Circulación General de la Atmósfera (*MCG*) utilizados por Gay (2003) para el pronóstico, fueron el *GFDL-R30* (Laboratorio Geofísico de Dinámica de Fluidos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, Princeton, EEUU) y el CCC (Centro Climático del Servicio Meteorológico de Canadá). La finalidad de haber generado los escenarios de cambio climático regionales anteriores empleando las salidas de *MCG*, fue contar con información útil en los estudios de vulnerabilidad de cultivos al cambio climático en México (Gay, 2003). Los pronósticos se realizaron para 18 zonas climáticas, comúnmente conocidas como “zonas de Douglas”, distribuidas en la República Mexicana ([ftp: hurricane.ncdc.noaa.gov](ftp://hurricane.ncdc.noaa.gov)). Los límites de las zonas fueron establecidos por Arthur Douglas de la Universidad de Creighton, Nebraska, con base en información de la Red Nacional de Estaciones Meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional de México, correspondientes al periodo 1948-1988; para lo cual, utilizó técnicas de control de calidad para regionalizar los datos. Los criterios utilizados fueron la coherencia entre datos pertenecientes a las estaciones climatológicas y las características geográficas de cada estación.

No obstante, para la generación de los escenarios se utilizó la información meteorológica de la base de datos de Douglas únicamente del periodo 1951-1980, para obtener así un escenario base compatible con los otros grupos de trabajo del proyecto Estudio de País. Se considera que en ese lapso hubo para la localidad ó región de estudio, una amplia gama de años con condiciones climáticas muy variadas (Gay, 2003).

Las salidas de cada uno de los modelos de Circulación General de la Atmósfera están condensadas en el **anexo A y B** donde para cada zona climática (de un total de 18) se tiene el valor mensual normal de cambio de la temperatura (°C), cambio en la precipitación (adimensional) y cambio en la radiación (adimensional). El modelo *GFDL-R30* arroja un incremento en la temperatura promedio de +4°C, si hubiera un calentamiento global. El modelo CCC pronostica un incremento global promedio de 3.5 °C en la temperatura. En general, estos estudios sobre cambio climático en

México (Gay, 2003) concluyen que el país podría experimentar temperaturas más altas y aun más altas tasas de evaporación con una duplicación del CO<sub>2</sub>. También indican que la precipitación del verano podría decrecer en la mayor parte del país e incrementarse durante el invierno en la región norte, en forma similar a las experimentadas durante un evento fuerte de El Niño (Magaña, *et al.*, 1997).

Las salidas de los modelos para condiciones actuales ó de una duplicación de bióxido de carbono se obtienen suponiendo que esas condiciones prevalecen de 10 a 15 años. Así, por ejemplo, la temperatura en condiciones de 2xCO<sub>2</sub> en algún punto de la malla en el mes de enero se obtiene de promediar los 10 ó 15 valores de las respectivas simulaciones para ese mes. La anomalía de temperatura se obtendría de restar el valor promedio de enero bajo condiciones de 2xCO<sub>2</sub> menos el valor promedio correspondiente, bajo condiciones de 1xCO<sub>2</sub>. Las anomalías para la precipitación (o radiación) resultan de efectuar el cociente de esa variable bajo los dos escenarios (2xCO<sub>2</sub> entre 1xCO<sub>2</sub>) (Gay, 2003).

Para el caso de México, al comparar las anomalías climáticas en temperatura y precipitación proyectadas, por los dos modelos, se advierte que difieren tanto en magnitud como en estructura espacial cuando se analiza el caso de México. El modelo *GFDL-R30* predice grandes cambios positivos en temperatura y precipitación, especialmente para el verano. Esta tendencia en cambios del clima también se observa en radiación. El modelo CCC pronostica menores incrementos en temperatura y radiación y, en general, decrementos en precipitación, pero en ambos modelos se aprecian cambios en la magnitud de las anomalías con la latitud, principalmente en la temperatura.

Considerando que los estudios de vulnerabilidad de la productividad agrícola dependen del escenario de cambio climático propuesto, un escenario de incrementos en precipitación diferirá de aquél cuyo pronóstico indique decrementos en la precipitación. Dado que la precipitación en la mayor parte del país es superior en verano que en invierno, el modelo *GFDL-R30* presenta un escenario más optimista en cuanto a la disponibilidad de agua, sobre todo al compararlo con el CCC que pronostica un decremento en la precipitación de verano e invierno.

El análisis de todos los escenarios climáticos al final del siglo XXI para México señala que no existe gran diferencia en los valores pronosticados de temperatura del aire. El problema principal es la contradicción en los pronósticos de la precipitación mensual y anual con la diferencia entre diferentes modelos hasta en el signo (Castillo, *et al.*, 2007).

Las probables explicaciones del por qué diferentes *MCG* proporcionan resultados opuestos en la predicción de la precipitación están relacionadas con las diferencias en los esquemas de parametrización de procesos como la formación de nubes *cúmulus*, diseño de los experimentos, métodos de solución, etc. Si se considera que el análisis del cambio climático se realiza sobre una base regional, la metodología seguida para interpretar las salidas de los *MCG* también resulta ser parte de esta explicación (Magaña, *et al.*, 1997, Gay, 2003).

Recientemente, en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, se está trabajando con nuevos escenarios de cambio climático para la República Mexicana utilizando los Modelos de Circulación General: HADLEY, ECHAM, *GFDL* (Conde, *et al.*, 2003). Estos Modelos de Circulación General (*MCG*) fueron seleccionados porque se cree que representan mejor el clima regional, esperado además de que están siendo usados por otros países de la misma región geográfica de México.

En el estado de Veracruz, se han elaborado escenarios regionales de cambio climático como parte del Plan Estatal de Acción Climática, planteado por el Instituto Nacional de Ecología (INE) y financiado por el gobierno de la Gran Bretaña e Irlanda del Norte a través de Global Opportunities Fund para abordar la contribución del estado en cuestión de cambio climático, y los posibles escenarios futuros de las emisiones de gases de efecto invernadero (*GEI*), así como la vulnerabilidad ante este fenómeno.

Los *MCG* empleados en este estudio fueron: *GFDLR*, Echam y Hadley. Se tienen escenarios futuros por los *MCG* para las proyecciones de 2020, 2050 y 2080. Sus resultados incluyen la siguiente información para cada estación climatológica del estado: (a) Escenarios futuros de temperatura media mensual (°C) y (b) Escenarios futuros de precipitación (mm/mes).

### **3.2. Impacto directo del incremento en la concentración del CO<sub>2</sub> en la atmósfera sobre la productividad agrícola**

En México se han realizado también investigaciones de campo relacionadas con el estudio de la respuesta de plantas de maíz (C<sub>4</sub>) y frijol (C<sub>3</sub>) al crecimiento de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera. Sánchez-Espino, *et al.* (2000) encontraron que, como respuesta a la duplicación artificial de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> en condiciones de invernadero, aumentó el área foliar del frijol y la densidad estomática disminuyó. Otro efecto fue el crecimiento del frijol en todo su ciclo de desarrollo, lo cual se reflejó en el incremento de la acumulación de biomasa y en el rendimiento (en un 20%). Estos incrementos estuvieron relacionados con el aumento del número de vainas y no con el aumento de peso ó tamaño de éstas. En contraste, en el caso del maíz, ni el área foliar, ni la densidad estomática fueron afectadas por el cambio de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, por el contrario, la alta concentración de CO<sub>2</sub> estimuló la acumulación de biomasa sólo durante las primeras etapas de desarrollo, y en mayor medida se reflejó más en el crecimiento de la raíz que de la parte aérea, y por tanto, el rendimiento no fue afectado de manera significativa.

Los resultados anteriores son relevantes para la definición de los parámetros considerados en los modelos de simulación de cultivos. Los trabajos existentes señalan que en caso de duplicación de la concentración de CO<sub>2</sub>, y los cambios climáticos correspondientes, se espera para cultivos de grano con mecanismo fotosintético C<sub>3</sub> como el trigo y frijol desarrollados en las condiciones de temporal, un incremento promedio en el rendimiento de ~20-30% (Allen, 1990) y un decremento de 6-60% para plantas C<sub>4</sub> como el maíz (Liverman y O'Brien, 1991; IPCC, 2001), dependiendo de la región.

Finalmente, debe mencionarse que los modelos complejos de simulación de la productividad potencial tienen dificultades para su aplicación por la escasa disponibilidad de información confiable sobre sus parámetros. Por otra parte, los modelos relativamente sencillos basados en un mayor grado de empirismo, tampoco tienen confiabilidad cuando se aplican a condiciones distintas a las de los sitios donde se han desarrollado (Boote, *et al.*, 1996).



### 3.3. Pronósticos de los rendimientos de algunos cultivos agrícolas de temporal en función de los escenarios del cambio climático

El Grupo de Trabajo II de el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001, IPCC, 2007b) concluyó con un alto nivel de confianza (90 a 99% de confianza), que la productividad agrícola en América Latina es altamente vulnerable al cambio climático, dada su baja capacidad adaptativa, particularmente a eventos extremos. En este contexto, es altamente probable que los rendimientos de los cultivos agrícolas puedan disminuirse significativamente, que las enfermedades de los cultivos se dispersen más y que la biodiversidad natural sea altamente amenazada (Porter, *et al.*, 1991; IPCC, 2007b).

La mayoría de los escenarios existentes del cambio climático, generados mediante los Modelos de Circulación General (MCG), corresponden al caso de duplicación en la concentración del bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera (Hansen, 2004). La respuesta de los cultivos agrícolas a la acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera por lo general es variable, pero varios experimentos de campo y simulaciones han mostrado un probable efecto fisiológico benéfico (Bhatti, *et al.*, 2006 y Newton, *et al.*, 2007).

En los cultivos con ruta fotosintética C<sub>3</sub>, por ejemplo el trigo y el arroz, que requieren mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> para iniciar la síntesis de materia orgánica, se puede esperar una respuesta positiva promedio de 30% en caso de duplicación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Por el contrario, en los cultivos de plantas C<sub>4</sub>, como serían el maíz y la caña de azúcar, que actualmente son los más eficientes en la fijación del CO<sub>2</sub>, se estima un efecto positivo promedio de 5% (Parry, 1993).

Los estudios relacionados con pronósticos de cambios en los rendimientos para diferentes escenarios del cambio climático global se han realizado basándose en dos enfoques metodológicos principales:

1. Correlaciones estadísticas entre rendimientos de cultivos y variables climáticas, sociales y económicas (O-Brian, *et al.*, 2000; Kaufmann y Snell, 1997; Chang, 2002; Lobell, *et al.*, 2005; Gay, *et al.*, 2006b); y
2. Modelos de simulación de desarrollo de los cultivos en función de las condiciones climáticas y edáficas. Ejemplos de estos modelos son CERES-Maize y CERES-Wheat (Conde, *et al.*, 2003; Lobell, *et al.*, 2005).

Los estudios de vulnerabilidad basados en correlaciones estadísticas son útiles y varios autores han realizado investigaciones al respecto en varias partes del mundo y con diferentes cultivos. Kaufmann y Snell (1997) propusieron una metodología para estimar el rendimiento de maíz en los Estados Unidos integrando variables climáticas con algunas variables de tipo social. Chang (2002) también estimó el impacto potencial del cambio climático en 59 cultivos en 15 regiones de Taiwan utilizando modelos econométricos para el conjunto de datos integrado por variables climáticas y económicas. Otros estudios sobre adaptación agrícola han utilizado también factores climáticos y no climáticos (O-Brian, *et al.*, 2000).

Las evaluaciones de vulnerabilidad de cultivos en México se han realizado cuando menos para tres cultivos (maíz, café y trigo); en el caso del café en el estado de Veracruz, la investigación tuvo un enfoque estadístico, explorando correlaciones entre la producción de café y variables climáticas y econométricas. El modelo fue validado por medio de análisis estadísticos y se utilizó para proyectar la producción de café bajo diferentes condiciones climáticas. Los resultados para las condiciones proyectadas de cambio climático para el 2020 indican que la producción de café podría reducirse hasta 43% y dejar de ser económicamente viable para los productores. El modelo mostró que la temperatura es el elemento climático más relevante para la producción de café, ya que la producción responde significativamente a los patrones estacionales de temperatura (Gay, *et al.*, 2006b).

El enfoque de evaluación de la vulnerabilidad por medio de modelos determinísticos se basa en la fisiología del cultivo. Este enfoque se ha utilizado mucho a nivel mundial y probablemente se prefiere para el modelado del efecto del cambio climático en la productividad de los cultivos.

El modelo de simulación CERES-Wheat, forma parte de este tipo de modelos determinísticos y estadísticos, y permitió concluir que el incremento en el rendimiento del 25%, para el trigo en los estados del noroeste, se debe principalmente a la naturaleza de las tendencias climáticas en esta zona, las cuales se relacionan con temperaturas nocturnas más bajas durante la estación de crecimiento en las últimas dos décadas. Este incremento en los rendimientos desde 1980 atribuido al mejoramiento de las condiciones climáticas, implica que los cambios tecnológicos relacionados con el mejoramiento de variedades y manejo del cultivo probablemente han sido más pequeños que los asumidos en estudios previos. En realidad, el impacto positivo de la reciente disminución de la temperatura nocturna en los Valles del Yaqui y Mayo puede explicar el  $85\pm 27\%$  del incremento en el rendimiento (Lobell, *et al.*, 2005).

En la publicación de Gay (2003) se reporta el uso del modelo CERES-Maize para estimar la vulnerabilidad del maíz de temporal de México, simulando los efectos del clima y los cambios en el manejo del cultivo. En la mayoría de los sitios seleccionados en este estudio, los efectos de un cambio climático en los rendimientos de maíz de temporal resultaron 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 altitud mayor de los 2000m 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 observaron que, en todos los casos, un incremento de precipitación de 20% implicaba una disminución en los rendimientos del cultivo de maíz de temporal. De acuerdo con los autores, este efecto se debe al lavado de nutrientes del suelo, sin especificar detalles (Gay, 2003).

Lo anterior, muestra que para las condiciones de México hay pocas publicaciones relacionadas con la vulnerabilidad de los cultivos al cambio climático en México (Liverman y O'Brien, 1991; Conde, *et al.*, 1998; Gay, 2003; Gay, *et al.*, 2006b.). En esos trabajos se analiza la vulnerabilidad de los rendimientos de cultivos agrícolas de temporal en función de la concentración de CO<sub>2</sub> y el cambio climático sin considerar el efecto de la alteración de la fertilidad natural.

Durante los últimos años se ha desarrollado la metodología para pronosticar la alteración de la fertilidad del suelo agrícola atribuible al cambio climático y su papel en los pronósticos de rendimientos de los cultivos agrícolas (Tetumo, *et al.*, 2001; Contreras, *et al.*, 2002; Nikolskii, *et al.*, 2001; Nikolskii, *et al.*, 2006. Castillo, *et al.* (2007), aplicaron esta metodología para elaborar escenarios de cambio en la productividad del maíz (C<sub>4</sub>) y trigo (C<sub>3</sub>) de temporal en varias zonas de referencia de México, utilizando los escenarios climáticos desarrollados por el Centro de Ciencias de la Atmósfera, de la Universidad Nacional Autónoma de México, para el escenario de duplicación del CO<sub>2</sub> en la atmósfera, al final del siglo XXI (Gay, 2003).

Para estimar la alteración de la fertilidad del suelo se estableció una relación cuantitativa entre el índice integral de fertilidad del suelo (*F*), para suelos con la misma génesis, y el índice climático *IHT*. Este autor presenta escenarios de cambios en las productividades real y potencial, en el índice *F* y en la disponibilidad hídrica para los cultivos en función de los escenarios existentes del cambio climático. Se demostró que la alteración de la fertilidad del suelo puede causar cambios en los rendimientos hasta de 20%, lo que indica su importancia en los pronósticos de rendimientos. Los resultados de su trabajo indicaron incrementos en el rendimiento hasta de 463 kg ha<sup>-1</sup> en las zonas áridas y semiáridas, y disminuciones hasta de 392 kg ha<sup>-1</sup> en las zonas húmedas y semihúmedas, para el caso del maíz; y, en general, incrementos en la producción del trigo de hasta 1100 kg ha<sup>-1</sup>.

### **3.4. Método para evaluar alteración de fertilidad del suelo agrícola debido al cambio climático y su impacto sobre la productividad agrícola**

Uno de los principales recursos naturales con que se cuenta es el suelo, el cual forma parte fundamental de todo el ciclo de la vida y junto con el clima son de los principales insumos para la agricultura. De acuerdo con Buol, *et al.* (1989), las características físicas, químicas y biológicas, de los suelos, estarán en función de los siguientes factores:

- clima,
- topografía,
- geología,
- material parental,
- profundidad del nivel freático,
- tiempo de formación y de su uso.

Algunas variaciones climáticas locales (microclimas) proporcionan suelos, dentro de zonas relativamente pequeñas. Sin embargo, la magnitud del control del clima sobre la formación del suelo se puede apreciar mejor mediante comparaciones de alcance global. (Contreras, *et al.*, 2002).

La pedósfera es la membrana de la tierra, a través de la cual se reproducen los cambios de sustancias y energía con la hidrosfera, atmósfera y biosfera. Por lo tanto, el suelo resulta a su vez el regulador de tales intercambios, quedando registrados en sus propiedades. Derivado de lo anterior, el suelo es un bloque de memoria del sistema geósfera-biosfera y cada uno de sus cuerpos (tipo genético, subtipo, etc.) es un registrador de las interacciones pasadas y presentes de la atmo-hidro-bio y litosfera.

Estas interacciones provocan cambios que pueden ser lentos ó rápidos (años, décadas y/o siglos) y conllevan en los diferentes ecosistemas a etapas de evolución y desarrollo de los suelos que resultan en los llamados procesos de formación del suelo (Hernández, *et al.*, 2006).

Actualmente han surgido diferentes criterios para enfocar los estudios sobre los Cambios Globales en los Suelos. De acuerdo con Ingram (1996) los cambios del suelo debidos al cambio climático son:

- a. los cambios que se originan en las propiedades de los suelos por influencia del cambio climático,
- b. cambios en los suelos que tienen lugar en sus propiedades por influencia del aumento de la concentración de gases de invernadero.

No obstante, la claridad sobre los enfoques de estudio del suelo relacionados con los cambios en sus propiedades por el cambio climático, aun no se ha definido a los indicadores apropiados para evaluar la calidad de los suelos a escala regional, por lo anterior, es importante conocer cuáles son los indicadores que presentan variaciones significativas con el cambio de uso del suelo y los atributos dentro de estos factores que pueden utilizarse a esta escala regional (Arshad y Coen, 1992).

De acuerdo con Doran y Parkin (1994), las condiciones para utilizar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo como indicadores de su calidad, son las siguientes:

- Describir los procesos del ecosistema;
- Integrar propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo;
- Reflejar los atributos de sostenibilidad que se quieren medir;
- Ser sensitivas a variaciones de clima y manejo;
- Ser accesibles a muchos usuarios y aplicables a condiciones de campo;
- Ser reproducibles; ser fáciles de entender;
- Ser sensitivas a los cambios en el suelo que ocurren como resultado de la degradación antropogénica; y, cuando sea posible,
- Ser componentes de una base de datos del suelo ya existente.

Por otra parte, las investigaciones realizadas, relacionadas con el estudio de los cambios globales de los suelos, se han desarrollado enfocando el estudio de la fertilidad de los suelos con base en el entendimiento de ciertos procesos clave en el ciclo de los nutrientes, los cuales son accesibles desde el punto de vista experimental. Así, se ha creído que es posible desarrollar la evidencia experimental de cómo estos responden a los cambios climáticos simulados, e inclusive, analizar desde el punto de vista teórico como pueden ser afectados, directa ó indirectamente, por elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub>, elevadas temperaturas y alteraciones en las precipitaciones.

Arnold, *et al.* (1990), menciona que las principales propiedades responsables de la fertilidad del suelo (contenido de elementos nutritivos, materia orgánica, pH, etc.) llegan al equilibrio con las nuevas condiciones de formación del suelo durante varios años ó decenas de años. De acuerdo con Castillo, *et al.* (2007), esto significa que si se consideran cambios climáticos relativamente lentos y realizados durante un siglo, entonces se puede suponer que al final del siglo XXI los suelos vírgenes y agrícolas de temporal van a llegar a un nuevo equilibrio con las nuevas condiciones climáticas. Ésta consideración forma parte de las bases de este trabajo.

A pesar del empeño y grandes avances en el estudio de la fertilidad de los suelos bajo condiciones de cambio climático global, no ha sido posible ir más allá de los estudios de los efectos del cambio climático global sobre el ciclo del nitrógeno. Los datos sobre el ciclo de otros elementos son virtualmente inexistentes. Esto es desafortunado debido a que otros elementos, frecuentemente limitan ó co-limitan la producción de plantas, por ejemplo, P y K (Bhatti, *et al.*, 2006; Newton, *et al.*, 2007).

El estado de la investigación actual parece dejar claro que los efectos indirectos del aumento en la concentración de CO<sub>2</sub>, junto con el aumento de las temperaturas, vía alteración del balance de agua en los agroecosistemas, pueden ser más importantes que el impacto directo de estos cambios sobre los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes en los agroecosistemas (Newton, *et al.*, 2007). Lo anterior, permite asumir

que la componente de cambio de la materia orgánica del suelo (propiedad biológica de gran relevancia en la fertilidad integral), debida a un enriquecimiento de la atmósfera con CO<sub>2</sub> puede ser no significativa.

Lo antes mencionado confirma la conveniencia de utilizar el enfoque basado en la *ley geográfica de zonificación de los recursos naturales*, que consiste en estimar los cambios en la fertilidad de los suelos (caracterizada por un índice integral de fertilidad) debidos al cambio climático global en función únicamente del índice de aridez de Budyko (*IHT*), para definir en forma coherente con un enfoque regional las probables alteraciones de la fertilidad de los suelos debidas al cambio climático global en México.

Durante los últimos años en el Colegio de Postgraduados se ha desarrollado un método para pronosticar la alteración de la fertilidad del suelo por el cambio de las condiciones microclimáticas de su formación, el que posiblemente se puede emplear para nuestros objetivos relacionados con el cambio climático global. Este método se basa en los conceptos de la ley geográfica de zonificación de suelos y otros recursos naturales (Dokuchaev, 1898; Grigoriev, 1954; Buol, *et al.*, 1989) y en la teoría de formación de suelos en función de la energía solar y la precipitación (Budyko, 1974; Volobuyev, 1974).

Según Volobuyev (1974) a nivel mundial algunas propiedades químicas, biológicas y físicas de los suelos vírgenes no usados en agricultura en áreas grandes (mayores a 10 km<sup>2</sup>) y geomorfológicamente similares, dependen del índice climático *IHT* cuya expresión se presentó en las fórmulas (1) y (2). Este índice en algunas publicaciones también se llama índice hidrotérmico local ó el índice de aridez de Budyko. El índice *IHT* es una característica climática integral muy importante para analizar la influencia del régimen hidrotérmico sobre los procesos de formación de los suelos.



Por lo general, los suelos agrícolas sufren dos tipos de cambios en sus propiedades:

- Directos, como resultado del manejo de plantas, suelo y agua, e
- Indirectos, causados por la modificación de las condiciones climáticas.

Nikolskii, *et al.* (2001) y Contreras, *et al.* (2002) establecieron relaciones cuantitativas entre algunas propiedades químicas y físicas de los suelos de México no usados en la agricultura, ubicados en terrenos planos, con pendientes menores de 3% con altitudes de 0 hasta 2500 m, y el índice *IHT*. En los trabajos mencionados el índice *IHT* se ha considerado como índice microclimático. Los autores consideraron que en las tierras agrícolas se cambia la cobertura vegetal causando un cambio en el albedo y por tanto en la radiación neta. Por esta razón, el índice *IHT<sub>v</sub>* que corresponde a los terrenos vírgenes (no usados en agricultura) se cambia a *IHT<sub>t</sub>* ó *IHT<sub>r</sub>* en los terrenos agrícolas de temporal ó de riego respectivamente.

Si se ignora el escurrimiento superficial el índice *IHT<sub>v</sub>* para las condiciones naturales se puede calcular así:

$$IHT_v = \frac{Rn_v}{\lambda Pr_v} \quad (3)$$

El establecimiento de los cultivos agrícolas, la labranza, el barbecho, la nivelación del suelo y la formación de surcos, entre otras, causan cambio de albedo de la superficie de los terrenos y de la radiación neta de *Rn<sub>v</sub>* a *Rn<sub>t</sub>* ó *Rn<sub>r</sub>*, lo que corresponde a las condiciones naturales, agrícolas de temporal ó riego respectivamente. Además, cambia la cantidad de agua que se infiltra anualmente al suelo: de *Pr<sub>v</sub>* a *Pr<sub>t</sub>* a *Pr<sub>r</sub>* respectivamente. En los terrenos irrigados, a la cantidad del agua infiltrada por las lluvias (*Pr<sub>r</sub>*) se agrega la lámina neta promedio anual *Lr*. Entonces, los índices *IHT<sub>t</sub>* e *IHT<sub>r</sub>* se calculan así:

$$IHT_t = \frac{Rn_t}{\lambda Pr_t} \text{ e } IHT_r = \frac{Rn_r}{\lambda (Pr_r + Lr)} \quad (4)$$

Calculando los índices *IHT<sub>v</sub>*, *IHT<sub>t</sub>* e *IHT<sub>r</sub>* y usando las gráficas de la relación entre el *IHT<sub>v</sub>* y los valores modales de las propiedades regionales de los suelos vírgenes se evaluaron los cambios indirectos paulatinos de los suelos al ser sometidos al uso

agrícola. Sus resultados indican que estas modificaciones del régimen hidrotérmico de los terrenos agrícolas pueden implicar un mejoramiento ó un decremento de la calidad (fertilidad) de los suelos.

Los resultados de Nikolskii, *et al.* (2001) y Contreras, *et al.* (2002) muestran que valores de  $IHT_v$  en el intervalo (1.2 a 1.6) corresponden en México a los suelos más fértiles con vegetación natural. Así, la práctica agrícola debe intentar mantener el índice  $IHT_i$  ó  $IHT_r$  en este intervalo; ya sea a través del manejo de la radiación neta o/y cantidad de agua infiltrada anualmente al suelo. De esta manera se puede propiciar el mejoramiento ó conservación del suelo, en favor de una agricultura sustentable.

Las gráficas Propiedades del suelo –  $IHT_v$  obtenidas en México confirman las relaciones similares establecidas para los suelos de la Ex-URSS (Aydarov, 1985). Esta confirmación por un lado expresa en forma cuantitativa la ley geográfica de zonificación del suelo, y por otro lado, posiblemente señala que tales gráficas son universales para el mundo dentro de los grupos de los terrenos geomorfológicamente homogéneos. En el caso de México, éstas gráficas fueron elaboradas utilizando la información cartográfica proveniente de las cartas edafológicas del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática con cobertura nacional de 40%.

La comparación de distribución de los datos puntuales, (correspondientes a los pozos edafológicos) de las 12 propiedades mencionadas del suelo virgen y agrícola de temporal en México, no permitió diferenciar los valores modales de cada propiedad, típicas para las regiones con los mismos índices hidrotérmicos (Nikolskii, *et al.*, 2001; Contreras, *et al.*, 2002; Cruz, 2005). Esto se explica posiblemente por el uso extensivo de los terrenos de temporal en México con relativamente baja productividad agrícola. Entonces, se supone que las gráficas Propiedades del suelo –  $IHT$  para los suelos mexicanos se pueden utilizar directamente para pronosticar el cambio de fertilidad del suelo agrícola debido al cambio climático durante el siglo XXI en México.

### 3.5. Cálculo del índice integral de fertilidad del suelo

De acuerdo con Halvorson, *et al.* (1996), para valorar la calidad del suelo es preferible contar con algún sistema que combine la información de diferentes propiedades cuantitativas ó indicadores y generar un índice de fácil cálculo e interpretación, integrado en un solo valor de la calidad del suelo. Vergara y Etchevers (2004), consideran que al ser variados los enfoques para generar los índices de calidad cualitativos y cuantitativos, no poseen el mismo grado de exactitud.

Existen varias formas de estimar la fertilidad de los suelos, sin embargo, no siempre se tiene una base empírica que soporte su aplicación con enfoque geográfico ó la información necesaria no siempre se encuentra disponible y bajo criterios uniformes de muestreo y de análisis químicos, por lo tanto, los enfoques mencionados no se pueden aplicar directamente para diferentes zonas climáticas con diferente grado de fertilidad del suelo (Castillo, *et al.*, 2007).

La propuesta de Vergara y Etchevers (2004) identifica y selecciona un número mínimo de propiedades físicas, químicas y biológicas y las usa como indicadores de calidad del suelo en áreas de ladera. Su método tiene dificultades para su generalización y uso a escala geográfica, además de ser poco aplicado por la poca disponibilidad de datos. Aun cuando este método pudiera ser útil a escala geográfica para calcular el índice integral de fertilidad, la información sobre el suelo, no está disponible en las bases de datos existentes en México.

Otro de los enfoques de la valoración de la calidad de suelos, es la de Pegov y Jomyakov (1991), quienes consideran suficiente que las propiedades de los suelos reflejen los procesos fundamentales, para que a una escala geográfica se pueda concluir sobre la calidad. Estos autores, proponen un enfoque para estimar el índice integral de la fertilidad del suelo basándose en datos bibliográficos y seleccionando 5

principales propiedades del suelo, responsables de su fertilidad: Contenido y composición de materia orgánica ( $MO$ ); contenido de los componentes principales de  $MO$ : ácidos húmicos ( $AH$ ) y fúlvicos ( $AF$ ); contenido de los elementos nutritivos básicos ó macronutrientes  $N$ ,  $P$  y  $K$  en formas accesibles y semiaccesibles para la vegetación natural (y agrícola) y el valor de  $pH_{KCl}$ .

Los análisis relacionados con la distribución espacial de estas propiedades demostraron que tienen cierta zonalidad. Además, estas propiedades en una forma indirecta reflejan algunas otras propiedades químico-físicas tales como: capacidad de intercambio catiónico ( $C/C$ ), textura del suelo (contenido de partículas de arcilla, limo y arena), etc. La selección de las 5 propiedades seleccionadas fue justificada a través de un análisis estadístico de los datos experimentales para diferentes zonas climáticas tales como África del Norte, Asia Central, Rusia (Pegov y Jomyakov, 1991), dentro del cual eran verificadas correlaciones entre diferentes propiedades del suelo y rendimientos de los cultivos de grano (principalmente de avena, pero se analizaron también los cultivos de trigo, maíz, cebada y algunos otros).

Según estos autores, el cálculo de  $F$  se recomienda realizar con la ecuación siguiente:

$$F = C_{MO} f(MO) + C_{N,P,K} f(N, P, K) + C_{pH} f(pH) \quad (5)$$

Donde:  $C_{MO}$ ,  $C_{N, P, K}$  y  $C_{pH}$  son los coeficientes de “peso” de cada propiedad (ó más bien de grupo de propiedades);  $f(MO)$ ,  $f(N, P, K)$  y  $f(pH)$  son algunas funciones, las cuales reflejan en una forma general el carácter de la influencia de estas propiedades sobre la fertilidad del suelo. Los valores de  $f(MO)$ ,  $f(N, P, K)$  y  $f(pH)$  varían entre 0 y 1.

Con base en el análisis estadístico de la relación entre las 5 propiedades del suelo virgen seleccionados anteriormente, la productividad primaria neta de los cultivos agrícolas mencionados y la vegetación natural en las condiciones climáticas favorables (es decir cuando las condiciones climáticas no limitan la productividad primaria neta) se han obtenido las siguientes funciones  $f(MO)$ ,  $f(N, P, K)$  y  $f(pH)$ :

$$f(MO) = \frac{AH + 0.2AF}{(AH + 0.2AF)_{\max}} \quad (6)$$

$$f(N, P, K) = \sqrt[3]{\frac{N}{N_{\max}} \frac{P}{P_{\max}} \frac{K}{K_{\max}}} \quad (7)$$

Donde:  $AH$ ,  $AF$ ,  $P$  y  $K$  representan, respectivamente, los contenidos de materia orgánica en forma de los ácidos húmicos ( $AH$ ) y fúlvico ( $AF$ ), de fósforo ( $P$ ) y potasio ( $K$ ) en el estrato superior de suelo virgen en cada punto de determinación en diferentes zonas climáticas;  $(AH + AF)_{\max}$ ,  $P_{\max}$  y  $K_{\max}$  representan los valores máximos observados de los componentes de materia orgánica ( $MO$ ),  $P$  y  $K$  en todo el conjunto de los puntos de muestreo de suelo en todas las zonas climáticas analizadas.

$$f(pH) = e^{-\left(\frac{pH-7}{2}\right)^2} \quad (8)$$

Donde:  $pH$  representa el valor de  $pH$  de suelo virgen en el estrato superior en cada punto de determinación en diferentes zonas climáticas. La Ecuación 8 refleja en una forma general la respuesta, al cambio de  $pH$ , del crecimiento de la vegetación natural y cultivos con tolerancia moderada a la acidez y alcalinidad de suelos.

En el caso de la ausencia de los datos sobre el contenido  $AH$ ,  $AF$  y  $N$  se recomienda ignorar estas variables, considerando además que  $N$  depende significativamente de los contenidos de  $MO$ , y se recomienda calcular  $F$  con base en las cuatro propiedades restantes ( $MO, P, K, pH$ ) con la siguiente ecuación:

$$F = C_{MO} f(MO) + C_{P,K} f(P, K) + C_{pH} f(pH) \quad (9)$$

Donde:  $C_{MO} + C_{P, K} + C_{pH} = 1$  y  $C_{MO} = 0.32$ ,  $C_{P, K} = 0.42$ ,  $C_{pH} = 0.25$ . Los autores proponen expresar las funciones  $f(MO)$ ,  $f(P, K)$  y  $f(pH)$  en la forma siguiente:

$$f(MO) = \frac{MO}{MO_{\max}} \quad (10)$$

$$f(P, K) = \sqrt{\frac{P}{P_{\max}} * \frac{K}{K_{\max}}} \quad (11)$$

Donde:  $MO$ ,  $P$  y  $K$  – representan los contenidos de materia orgánica, fósforo y potasio en el estrato superior de suelo virgen en cada punto de determinación en diferentes zonas climáticas;  $MO_{\max}$ ,  $P_{\max}$  y  $K_{\max}$  – representan los valores máximos observados de  $MO$ ,  $P$  y  $K$  en todo el conjunto de los puntos de muestreo de suelo en todas las zonas climáticas analizadas.

La ecuación final se presenta como sigue:

$$F = 0.46 \frac{MO}{MO_{\max}} + 0.28 \sqrt{\frac{P}{P_{\max}} \frac{K}{K_{\max}}} + 0.26 e^{-\left(\frac{pH-7}{2}\right)^2} \quad (12)$$

$$F = 0.32 \frac{MO}{MO_{\max}} + 0.42 \sqrt{\frac{N^{fert}}{N_{\max}^{fert}} \frac{P + P_{\max}^{fert}}{P_{\max} + P_{\max}^{fert}} \frac{K + K_{\max}^{fert}}{K_{\max} + K_{\max}^{fert}}} + 0.26 e^{-\left(\frac{pH-7}{2}\right)^2}$$

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. Materiales

Para realizar este trabajo fue necesario tener la distribución de las zonas bajo riego que cultivan maíz y trigo en el país, para lo cual se usó la cobertura de los distritos de riego generado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua – IMTA (CONAGUA, 1990-2005), también se trabajó con datos de las Normales Climatológicas e información climatológica más detallada de toda la República Mexicana (<http://smn.cna.gob.mx/>), los escenarios existentes del cambio climático para el siglo XXI en diferentes partes del país, así como el conjunto de los datos edáficos y de uso del suelo.

La información sobre datos de los suelos de la capa superior (ó a 20 cm) fue la siguiente:

- Contenido de materia orgánica, *MO* (%)
- Fósforo, *P* (ppm)
- Potasio, *K* (ppm)
- Valor de  $pH_{KCl}$  - logaritmo negativo de la actividad del ión hidrógeno (adimensional).

Para calcular el índice *IHT*, fue necesario contar con información relacionada con los valores mensuales de precipitación, radiación y láminas de riego netas para cada uno de los distritos. La lámina de riego fue proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2008<sup>1</sup>).

En el cálculo de la radiación neta se utilizaron los valores promedios mensuales de los siguientes datos: número de días nublados, número de días medio nublados, número de días despejados, temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura media del aire.

---

<sup>1</sup> Subgerencia de Distritos de Riego, 2008. Comunicación personal

La información meteorológica se obtuvo de la publicación del Servicio Meteorológico Nacional denominada Normales Climatológicas (Crespo, 2005). Aunque ya existe la publicación de las Normales Climatológicas del año 1971-2000, en el presente trabajo se utilizan las del periodo 1951-1980, con el propósito de buscar congruencia entre los datos utilizados en esta investigación y los utilizados por los investigadores que generaron los escenarios de cambio climático en México.

Los pronósticos de la temperatura, precipitación y radiación global al final del siglo XXI se tomaron de la publicación Gay (2003). Esta publicación contiene los valores pronosticados promedio mensuales de la temperatura, precipitación y radiación global correspondiente a los escenarios climáticos desarrollados los modelos climáticos del Geophysical Fluids Dynamics Laboratory (*GFDL-R30*) y el Canadian Climate Center (*CCC*) para el caso de duplicación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

La información relacionada con las propiedades físicas y químicas de los suelos se obtuvo de la base de datos perfil 1.2, la cual está conformada por un archivo de datos alfanumérico con la información de campo y laboratorio recopilada de los perfiles de suelo descritos y clasificados por el Departamento de Edafología del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2004).

#### **4.2. Metodología**

La estimación del cambio en la productividad agrícola atribuible al cambio climático global se realiza considerando las siguientes etapas:

- Selección de los distritos de riego representativos para los cultivos de maíz y trigo de riego, ubicados en diferentes zonas climáticas de México.
- Recopilación y tratamiento de los datos sobre propiedades de los suelos de los distritos que cultivan trigo y maíz bajo el régimen de riego.
- Establecimiento de las dependencias cuantitativas de los valores modales de algunas propiedades biológicas y químicas del suelo irrigado con cultivo de maíz y trigo y del índice integral de fertilidad de los suelos en función del *IHT*





#### **4.2.1. Selección de los sitios de referencia para pronosticar vulnerabilidad de los rendimientos**

Finalmente, los criterios principales utilizados en la elección del maíz y trigo como cultivos de referencia son los siguientes:

- La importancia de estos cultivos en la alimentación humana en nuestro país;
- La situación de ser cultivos ampliamente estudiados a nivel mundial, y de amplia distribución en la geografía nacional.

La selección del maíz se explica también por la razón de que existen escenarios de cambio de rendimiento para maíz de temporal realizados por Castillo, *et al.* (2007), por lo tanto, existe la posibilidad de comparar los resultados de esta investigación con los datos publicados y de esta manera validar los resultados de este análisis.

Los distritos de riego seleccionados para el presente trabajo, se caracterizan por incluir dentro de su patrón de cultivos al maíz y al trigo, por lo menos en los últimos 10 años. Otro aspecto considerado, fue la ubicación dentro de las zonas climáticas Douglas y la existencia de la información de la lámina de riego aplicada.

La presente investigación se fundamenta en la necesidad de todo distrito de riego de tener pendientes < 3% para el buen funcionamiento de sus sistemas de irrigación, por otra parte, estas zonas tienen suelos con una formación in situ. Lo anterior, permite que las áreas irrigadas sean consideradas para realizar escenarios de rendimientos para maíz y trigo utilizando el índice de aridez de Budyko para incorporar el factor suelo.

#### 4.2.2. Cálculo del índice $IHT_r$ para los terrenos bajo riego

En el presente trabajo el cálculo del  $IHT_r$  tiene dos objetivos principales:

- Estimación de la alteración de fertilidad del suelo agrícola atribuible al cambio climático utilizando los datos de  $IHT_v$  e  $IHT_r$  promedio anuales y
- Determinación del índice hídrico  $K_{hídric}$  del ciclo de cada cultivo, utilizando los valores promedio mensuales durante estación de los cultivos.

Como uno de los primeros tratamientos de datos se han realizado los cálculos del  $IHT_v$  e  $IHT_r$ , utilizando las ecuaciones (3) y (4). Para calcular la radiación neta  $Rn$  promedio anual para los terrenos vírgenes y agrícolas bajo riego se ha utilizado valores de albedo diferentes según el tipo de vegetación natural e igual a 0.22 para maíz y trigo (Contreras, *et al.*, 2002). Para calcular la radiación neta promedio mensual para terrenos con estos cultivos se han utilizado diferentes valores de albedo tomados de la misma fuente.

Las láminas mensuales de precipitación  $Pr_t^{j=2000}$  y  $Pr_t^{j=2100}$ , respectivamente, al final del siglo XX y al final del siglo XXI se obtuvieron a partir de la estadística climatológica Crespo (2005) y de los cambios en la precipitación obtenidos de las salidas de los Modelos de Circulación General (Gay, 2003).

En la fórmula, se incorpora la lámina de riego, la cual fue proporcionada por la CONAGUA (2008<sup>1</sup>) con datos promedios de un periodo de 15 años (1990-2005), para fines prácticos se trabajó con una lámina general donde se incorporó la lámina aplicada en el ciclo primavera-verano más la lámina aplicada en otoño-invierno.

Los valores de la radiación neta fue obtenida de la publicación de Contreras, *et al.* (2000). Para pronosticar cambio del índice integral de fertilidad del suelo agrícola de temporal se han utilizado los valores promedio anuales de  $IHT$  también para inicio y final del siglo XXI.

---

<sup>1</sup> Subgerencia de Distritos de Riego, 2008. Comunicación personal

Para la determinación del índice hídrico ( $K_{hídr}$ ) del ciclo del cultivo, el  $IHT_r$  se dividió por ciclos generándose un  $IHT_r$  para primavera-verano (PV) y otro para otoño-invierno (OI). Para este caso, la lámina de riego fue el promedio de los datos proporcionados por la CONAGUA para el periodo 1990-2005, para cada uno de los ciclos. Una vez determinado el ciclo del cultivo, con datos de los últimos años en los reportes anuales de los planes de riego (CONAGUA, 2008), se fraccionó la lámina de riego dividiéndola entre el total de meses de cada ciclo. Los valores de  $IHT_r$  se calculan con la ecuación (4) para cada uno de los meses correspondientes al ciclo de cada cultivo y finalmente se obtiene un  $IHT_r$  promedio estacional.

En todos los cálculos del  $IHT$ , fue ignorado el efecto de escurrimiento superficial considerando los resultados de los análisis previos y sugerencias hechas en las publicaciones (Nikolskii, *et al.*, 2001; Contreras, *et al.*, 2002; Castillo, *et al.*, 2007, etc.).

#### 4.2.3. Pronóstico de los rendimientos de maíz y trigo en función de los escenarios del cambio climático global

Los rendimientos de maíz y trigo se calcularon con la ecuación propuesta por FAO-IIASA (2000) y Pegov y Jomyakov (1991):

$$Y^j = Y_{max}^j K_{hídr}^j F_a^j \quad (13)$$

Donde:

$Y^j$  = productividad agrícola (en  $\text{kg ha}^{-1}$ ) de los distritos de riego para los escenarios climáticos al inicio del siglo XXI ( $j=2000$ ) ó en su final ( $j=2100$ ), para el cual se considera el caso de duplicación de la concentración de  $\text{CO}_2$ ;

$Y_{max}^j$  = rendimiento potencial máximo dependiente de los valores mensuales de la temperatura del aire, radiación global (o más bien, radiación fotosintéticamente activa) y características propias del cultivo como el índice de cosecha, el índice de área foliar y la ruta fotosintética (en  $\text{kg ha}^{-1}$ );

$K_{hidr}^j$  = índice hídrico (adimensional), el cual caracteriza la disponibilidad de agua del suelo para los cultivos durante su estación de crecimiento, y el cual depende de la relación entre los valores mensuales de precipitación y la evapotranspiración potencial, y varía de cero a uno;

$F_a^j$  = índice integral de fertilidad del suelo agrícola (adimensional), varía de cero a uno.

Para calcular los rendimientos  $Y^{2000}$  en los distritos de riego para las condiciones climáticas existentes ó escenario base (1xCO<sub>2</sub>) al final del siglo XX se utilizaron las normales climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (Crespo, 2005). Para pronosticar los rendimientos  $Y^{2100}$  para finales del siglo XXI se utilizaron las salidas interpoladas de dos Modelos de Circulación General de la atmósfera *GFDL-R30* y CCC con los cuales en México se realizaron los pronósticos de cambio climático para fines del siglo XXI en el caso de duplicación de la concentración de CO<sub>2</sub> (2xCO<sub>2</sub>) en la atmósfera (Gay, 2003).

Con la Ecuación 13 se calcularon los rendimientos de cada cultivo para el inicio ( $Y^{2000}$ ) y el fin del siglo XXI ( $Y^{2100}$ ).

La estimación de los cambios relativos en el rendimiento de los cultivos de maíz y trigo de temporal ( $\Delta Y$ , en %), producidos durante un siglo en algunos distritos de riego del país se realizó con la siguiente ecuación:

$$\Delta Y = \left( \frac{Y^{2100} - Y^{2000}}{Y^{2000}} \right) 100 = \left( \frac{Y_{max}^{2100} K_{hidr}^{2100} F_a^{2100}}{Y_{max}^{2000} K_{hidr}^{2000} F_a^{2000}} - 1 \right) 100 \quad (14)$$

Donde:

$Y_{max}^{2100}$  y  $Y_{max}^{2000}$  = rendimientos de los cultivos, calculados para las condiciones climáticas pronosticadas para el final del siglo XXI (2xCO<sub>2</sub>) y existentes en el final del siglo XX (1xCO<sub>2</sub>), respectivamente;

$(Y_{max}^{2100})/(Y_{max}^{2000})$  = relación entre estos rendimientos;

$(K_{hidr}^{2100})/(K_{hidr}^{2000})$  = relación entre los índices hídricos  $K_{hidr}^{2100}$  y  $K_{hidr}^{2000}$  calculados para los ciclos de los cultivos en el final del siglo XXI ( $2xCO_2$ ) y existentes en el final del siglo XX ( $1xCO_2$ );

$(F_a^{2100})/(F_a^{2000})$  = relación entre los índices integrales de fertilidad del suelo agrícola  $F_a^{2100}$  y  $F_a^{2000}$  estimados para el final del siglo XXI ( $2xCO_2$ ) y existentes en el final del siglo XX ( $1xCO_2$ ), respectivamente. Esta relación se estima en función únicamente del escenario del cambio climático, ignorando el impacto del posible cambio de la tecnología agrícola, variedades de los cultivos y riesgo de pérdida de cosecha por plagas, enfermedades, etc. en cada distrito de riego.

#### 4.2.3.1. Cálculo del rendimiento potencial

El cálculo de la biomasa y el rendimiento potencial ó máximo  $Y_{max}^j$  (en  $kg\ ha^{-1}$ ) de maíz y trigo de riego se realizó utilizando un modelo basado en principios ecofisiológicos (FAO-IIASA, 2000). El rendimiento está estimado en función del régimen de las variables climáticas de temperatura y radiación solar. Para calcular el rendimiento máximo  $Y_{max}^j$  se utilizó la ecuación siguiente:

$$Y_{max}^j = Bn * IC \quad (15)$$

Donde:

$Y_{max}^j$  = rendimiento potencial máximo ó agroclimático de la materia seca económicamente aprovechable que pueden producir plantas sanas con un suministro adecuado de agua y nutrientes (en  $kg\ ha^{-1}$ ) en las condiciones del escenario climático actual ( $j = 2000$ ) y para el escenario de duplicación de  $CO_2$  ( $j = 2100$ );  $Bn$  es la biomasa neta de la materia seca total (en  $kg\ ha^{-1}$ );  $IC$  es el índice de cosecha ó la fracción de  $Bn$  correspondiente al producto agrícola (adimensional).

El valor de  $Bn$  (en  $\text{kg ha}^{-1}$ ) se calcula con la siguiente ecuación:

$$Bn = \frac{0.36 b_{gm} L}{(1/n) + 0.25 C_t} \quad (16)$$

Donde:

$b_{gm}$  = tasa máxima de producción de biomasa bruta de un cultivo de referencia con el índice de área foliar ( $IAF$ ) igual a 5 (en  $\text{kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ );  $b_{gm}$  depende principalmente de la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera y de la radiación fotosintéticamente activa;

$n$  = duración en días del ciclo normal del cultivo, para determinarlo se utilizaron las fechas de siembra y cosecha proporcionadas por la CONAGUA (2008) en sus reportes anuales de los planes de riego (**anexo C**);

$C_t$  = fracción de la tasa de producción de biomasa bruta (como  $\text{CH}_2\text{O}$ ) que se pierde por la respiración de mantenimiento, la cual depende de tipo de cultivo (leguminosa ó no leguminosa) y de la temperatura media del aire ( $\text{kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$ );

$L$  = fracción de la tasa máxima de crecimiento del cultivo, por cobertura incompleta del terreno cuando  $IAF < 5$  (adimensional).

Los valores de  $C_t$  se pueden calcular con la ecuación siguiente:

$$C_t = C_{30}(0.044 + 0.0019T + 0.001T^2) \quad (17)$$

Donde:

$T$  Es la temperatura media mensual del aire durante el ciclo del cultivo;

$C_{30}$  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).

El factor de corrección por cobertura incompleta del terreno ( $L$ ) se calcula así:

$$L = 0.3424 + 0.9051 \text{Log}_{10}(IAF) \text{ Si } IAF < 5 \text{ y } L = 1 \text{ Si } IAF \geq 5 \quad (18)$$

Para calcular los valores de  $b_{gm}$  se estimó la tasa máxima de producción de biomasa,  $P_m$  (en kg CH<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>). Los valores de  $b_{gm}$  se calcularon con las expresiones siguientes:

Para  $P_m \geq 20$  kg CH<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>:

$$b_{gm} = N(0.8 + 0.01P_m)b_o + (1 - N)(0.5 + 0.025P_m)b_c \quad (19)$$

Para  $P_m < 20$  kg CH<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>:

$$b_{gm} = N(0.5 + 0.025P_m)b_o + (1 - N)0.05P_mb_c \quad (20)$$

Donde:

$b_o$  ó  $b_c$  = tasas brutas de producción de materia seca para un cultivo de referencia hipotético (kg CH<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) en días completamente nublados y días completamente despejados, respectivamente, con dosel cubriendo completamente el terreno y una tasa máxima de producción de biomasa de 20 kg ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>;

$N$  = parámetro adimensional dependiente de la radiación fotosintéticamente activa teórica ó potencial diaria con el cielo totalmente despejado  $Ac$  (en MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>) y de la radiación global de onda corta  $Rg$  (en MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>):

$$N = \frac{Ac - 0.5Rg}{0.8Ac} \quad (21)$$

Esta ecuación asume que la radiación fotosintéticamente activa real ( $RFA$ ) es la mitad de la radiación global y que en un día nublado la  $RFA$  es el 20% de la teórica ( $Ac$ ).



La estimación de  $Y_{max}^{2000}$  se realizó utilizando la información del **anexo D** de la publicación FAO-IIASA (2000) y la publicación de Driessen y Konijn (1992) sobre *IC*, *IAF*, ruta fotosintética,  $P_m$ ,  $b_o$ ,  $b_c$ . La información sobre inicio y duración del ciclo de los cultivos de maíz y trigo bajo riego en México fueron proporcionados por la CONAGUA (2008).

Para la estimación de  $Y_{max}^{2100}$  se consideró lo argumentado por Cure y Acock (1986) y Anthony y Ziska (2000), que el *IC* prácticamente no depende del cambio climático, por lo que en este trabajo no se considera el cambio del *IC* en función del cambio de concentración de  $CO_2$  en la atmósfera. El *IAF* también se considera sin cambio. No se consideran cambios en la fenología, por lo tanto, la duración del ciclo del cultivo (*n*) se considera sin cambio. La razón es que resulta muy complicado en un estudio de este tipo establecer modelos fenológicos aceptables basados en el concepto de grados días desarrollo, cuando se tiene en el país una gran diversidad de genotipos y carencia de resultados de investigación que indiquen los valores de Grados Días Desarrollo para éstos. Los valores de  $P_m$  para maíz y trigo para el escenario de duplicación de  $CO_2$  se obtuvieron de la literatura (Acock, 1990; Allen, 1990). Se asumió que la transmisividad de la atmósfera no cambia de modo significativo debido a su propiedad diatérmica, por tanto, los parámetros  $b_o$ ,  $b_c$  permanecieron sin cambio.

Finalmente, se calcula la diferencia entre los rendimientos máximos al final y principio del siglo XXI:

$$\Delta Y_{max} = \left( \frac{Y_{max}^{2100} - Y_{max}^{2000}}{Y_{max}^{2000}} \right) 100 = \left( \frac{Y_{max}^{2100}}{Y_{max}^{2000}} - 1 \right) 100 \quad (22)$$

Donde:

$\Delta Y_{max}$  se expresa en %.

#### 4.2.3.2. Cálculo de los componentes de la radiación neta promedio mensual

A partir de las normales climatológicas se seleccionaron las estaciones meteorológicas (shape estaciones meteorológicas) que se ubicaban dentro del área de los distritos de riego seleccionados y las de un radio de aproximadamente 1Km (**anexo E**), lo anterior, se realizó con arccgis 9.2.

Dentro de los aspectos considerados para la selección de las estaciones se consideró disponibilidad de información promedio mensual de temperatura, precipitación y que formaran parte de la información reportada en la publicación de Contreras (2000), quien estimó la radiación neta y sus componentes para finales del siglo XX  $R_j^{j=2000}$  tanto para superficies con vegetación natural y con cultivo de temporal, este autor hizo uso de las fórmulas de Burman y Pochop (1994).

Los datos mensuales de la radiación neta para finales del siglo  $Rn^{2100}$  se estimaron con la metodología propuesta por Tejeda y Vargas (1996). Los valores  $Rg_j^{j=2100}$  se obtuvieron multiplicado  $Rg_j^{j=2000}$  por el valor correspondiente a la razón de cambio de la radiación global, obtenida de la publicación de Gay (2003) para el escenario de duplicación de  $CO_2$  y para los modelos climáticos *GFDL* y *CCC*.

#### 4.2.3.3. Cálculo del índice hídrico

El Índice hídrico ( $K_{hidr}$ ) se definió como el inverso del *IHT* (ver capítulo 4.2.2). Lo anterior, se fundamenta en el hecho de que la radiación neta es proporcional y prácticamente lineal a la evapotranspiración potencial ( $ET_{pot}$ ) de acuerdo con Martín, *et al.* (1993); De Santa Olalla, *et al.* (2005). De esta manera, el valor  $K_{hidr} = 1/IHT_r$ , donde *IHT<sub>r</sub>*, el índice climático durante la estación del cultivo, se puede considerar como un índice de disponibilidad de agua en el suelo.

En nuestro caso se hace la comparación entre los rendimientos e índices hídricos en los años 2000 y 2100 ( $Y^{2100}/Y^{2000}$  y  $K_{hidr}^{2100} / K_{hidr}^{2000}$ , respectivamente). Por esta razón, se consideró apropiado aplicar la siguiente aproximación:

$$K_{hidr} = \frac{(Pr + Lr)}{ET_{pot}} \approx \frac{(Pr + Lr)}{\lambda Rn} = \frac{1}{IHT_r^j} \quad (23)$$

Donde  $IHT_r^j$  = índice climático en el sitio de referencia de la producción del cultivo durante todo el periodo de su desarrollo en las condiciones bajo riego en el año  $j = 2000$  ó 2100.

Para calcular los valores  $K_{hidr}$  correspondientes al periodo de crecimiento del cultivo con una duración de  $m$  meses, se ha utilizado la ecuación siguiente:

$$K_{hidr}^j = \frac{m}{\sum_{i=1}^m IHT_{r,i}^j} \quad (24)$$

Donde  $IHT_{r,i}^j$  corresponde al índice climático en el mes con número  $m$  durante estación del cultivo en el año  $j = 2000$  ó 2100.

El índice  $IHT_{r,i}^j$  se calcula así:

$$IHT_{r,i}^j = \frac{Rn_{r,i}^j}{\left( Pr_i^j + \frac{Lr^j}{m} \right)} \quad (25)$$

Donde:

$1 \leq i < m$ ;

$Rn_i^j$  = radiación neta en el mes  $m$  durante estación del cultivo en el año  $j = 2000$  ó 2100.

$Pr_i^j$  = precipitación efectiva en el mes  $m$  durante estación del cultivo en el año  $j = 2000$  ó 2100.

$Lr / m$  = fracción de la lámina neta aplicada durante el mes  $m$ . Considerando cierta incertidumbre en los periodos de aplicación de riegos a nivel promedio anual al inicio y final del siglo XXI, la lámina neta promedio anual aplicada durante la estación de cultivo  $Lr^j$  fue distribuida en este análisis preliminar en forma homogénea entre todos los meses  $m$ .

Las láminas netas de riego para el principio del siglo XXI ( $Lr^{2000}$ ) se han obtenido de los bases de datos de la CONAGUA (2008). Las láminas netas de riego para finales del siglo XXI ( $Lr^{2100}$ ) se han estimado en función de los pronósticos de la precipitación anual ( $Pr^{2100}$ ):

$$Lr^{2100} = Lr^{2000} \frac{Pr^{2100}}{Pr^{2000}} \quad (26)$$

Donde  $Pr^{2000}$  es la precipitación promedio anual al principio del siglo XXI en el sitio de referencia.

En los casos en los que el mes que antecede al mes de inicio de la siembra presenta una precipitación  $Pr_i^j$  mayor a la fracción de la lámina de riego aplicada, entonces la ecuación usada es la siguiente:

$$IHT_0^j = \frac{Rn_0^j}{\lambda Pr_0^j} \leq 1 \quad (27)$$

Donde el subíndice 0 corresponde al mes anterior de la siembra, para considerar la humedad residual, por lo tanto, el  $K_{hid}^j$  se calcula para  $m + 1$  meses, es decir, para  $m$  meses de la estación del cultivo más un mes anterior de la siembra:

$$K_{hid}^j = \frac{m + 1}{\sum_{i=1}^{m+1} IHT_{r,i}^j} \quad (28)$$

Donde  $IHT_0^j \leq 1$  es el índice climático correspondiente al primer mes (antes de siembra).

Los índices climáticos  $IHT_{r,i}^j$  para los meses posteriores se calculan con la fórmula (25).

En estas ecuaciones, si se calcula  $K_{hid}^j > 1$  se considera  $K_{hid}^j = 1$ .

La condición  $K_{hid}^j > 1$  corresponde al exceso de agua en el terreno agrícola, en este caso se ha considerado como  $K_{hid}^j = 1$ , lo que supone que con medidas agrotécnicas se evitan los casos de exceso de humedad en el suelo y los daños correspondientes al cultivo.

Finalmente, se calcula la diferencia entre los índices  $K_{hidr}$  al final e inicio del siglo XXI como sigue:

$$\Delta K_{hidr} = \left( \frac{K_{hidr}^{2100} - K_{hidr}^{2000}}{K_{hidr}^{2000}} \right) 100 = \left( \frac{K_{hidr}^{2100}}{K_{hidr}^{2000}} - 1 \right) 100 \quad (29)$$

Donde  $\Delta K_{hidr}$  se expresa en %.

#### 4.2.3.4. Tratamiento de los datos sobre algunas propiedades de los suelos agrícolas de temporal y suelos irrigados

Para establecer las gráficas  $\varphi(IHT_V^{2000})$  se consideraron los valores modales de las propiedades de los suelos bajo temporal de México (MO, P, K, pH), los cuales ya se tienen en publicaciones anteriores, en función del  $IHT_V$  para fines del siglo XX (Castillo, *et al.*, 2007).

Los principios de la metodología de selección y tratamiento de los datos sobre propiedades de suelos bajo riego se realizó con base en el siguiente procedimiento (Tetumo, *et al.*, 2001; Nikolskii, *et al.* 2001; Contreras, *et al.* 2002; Castillo, *et al.*, 2007):

- a) Se seleccionaron los distritos de riego a trabajar considerando su pertenencia a una de las 18 zonas Douglas, partiendo de la información del shape de distritos de riego de México. En esta etapa se trabajo con el software de arcgis 9.2.
- b) De la base de datos de perfiles de suelos se seleccionaron aquellos pozos edafológicos que estuvieran dentro de las áreas de los distritos de riego, y se tomaron los valores de las propiedades del estrato superior del perfil de suelo (0-20 cm), lo cual coincide con la profundidad de la capa arable. Este proceso se realizó con el programa arcgis 9.2 y el shape de distritos de riego de México.
- c) La base de datos obtenida en el punto anterior, se filtró para eliminar aquellos perfiles clasificados por INEGI como tipo fluvisol e histosol, según la clasificación de la FAO.

- d) Se construyeron gráficas de dispersión de los datos para cada propiedad en función del  $IHT_v$ , para datos con altitud de 0 a 2500 m.
- e) Se realizó un análisis estadístico de los datos sobre propiedades físicas y químicas de suelos para eliminar datos no representativos y determinar su distribución estadística por intervalos de  $IHT_v$ .
- f) Considerando la distribución estadística de los datos, se determinaron los valores modales para cada propiedad en cada intervalo de  $IHT_v$ .
- g) Finalmente, se construyeron gráficas que muestran la dependencia de los valores modales de las propiedades físicas y químicas de los suelos bajo riego geomorfológicamente homogéneos, en función del índice climático  $IHT_v$  (índice de aridez de Budyko).

La metodología para obtener los intervalos de confianza [ $X_{min}^{riego}$ ;  $X_{max}^{riego}$ ] de las propiedades  $X^{riego}$  de los suelos vírgenes y bajo riego es la siguiente:

- a) Según las investigaciones anteriores (Tetumo, 1999; Contreras, 2000; Tetumo, *et al.*, 2001; Contreras, *et al.*, 2002) no había diferencia estadísticamente significativa en estas propiedades entre los suelos vírgenes ( $X^{virg}$ ) y agrícolas de temporal ( $X^{temp}$ ). Por esta razón, en estos trabajos se han establecido las gráficas comunes para los de temporal y bajo riego  $MO^{riego}(IHT)$ ,  $pH^{riego}(IHT)$ ,  $K^{riego}(IHT)$ ,  $P^{riego}(IHT)$ ,  $F^{riego}(IHT)$ . Para determinar los valores modales  $F_{modal}^{riego}$  y límites de confianza [ $F_{min}^{riego}$ ;  $F_{max}^{riego}$ ] del índice integral de fertilidad de los suelos bajo riego, los valores modales  $X_{modal}^{riego}$ , así como los límites de confianza de algunas propiedades se han utilizado para calcular los valores modales  $F_{modal}^{riego}$  y los intervalos de confianza correspondientes a estos índices dentro de cada intervalo del  $IHT_v$  establecido, utilizando la ecuación (12) del cálculo del índice integral de fertilidad de los suelos  $F^{riego}$ .
- b) Según las investigaciones mencionadas anteriormente, la distribución estadística de las propiedades de estos suelos vírgenes y de suelos de temporal es lognormal, lo cual aplica también para las comparaciones con los suelos bajo

riego. Para obtener los límites de confianza de variación de cada propiedad  $[X_{min}^{riego}, X_{max}^{riego}]$  se han utilizado los intervalos de incremento del  $IHT_v$  establecidos en los trabajos ya mencionados: 0.25-0.75; 0.75-1.25; 1.25-1.75; 1.75-2.25; 2.25-2.75; 2.75-3.25; 3.25-4.5; 4.5-5.5; 5.5-6.5; 6.5-7.5; 7.5-8.5. En cada uno de estos intervalos se han utilizado los datos publicados sobre los valores adimensionales de cada propiedad:  $X/X_{medio}$ , donde  $X$  es el valor de la propiedad en cada pozo de la base de datos de INEGI para el estrato superior del perfil de suelo (0-20 cm) dentro del intervalo establecido del  $IHT_v$ ,  $X_{medio}$  es el valor medio aritmético de esta propiedad en cada intervalo del  $IHT_v$ . El conjunto de datos de  $X/X_{medio}$  correspondientes a todos los intervalos del  $IHT_v$  se ha considerado perteneciente a una generalidad estadísticamente homogénea.

c) Se tomaron los logaritmos naturales del conjunto de estos valores  $\ln(X/X_{medio})$ , valor medio  $[\ln(X/X_{medio})]_{medio}$  y la desviación estándar  $\sigma \ln(X/X_{medio})$  de variación de los valores de  $\ln(X/X_{medio})$  en todo el intervalo de cambio del índice  $IHT_v$  de 0.25 hasta 8.5 y en cada intervalo del  $IHT_v$  mencionado arriba.

d) En cada intervalo del  $IHT_v$  se han utilizado los valores de  $\sigma \ln(X/X_{medio})$  correspondientes a cada uno de estos intervalos siempre y cuando existan más de 30 datos de  $\ln(X/X_{medio})$  en estos intervalos del  $IHT_v$ . En los casos en que había significativamente menos cantidad de datos de  $\ln(X/X_{medio})$ , se ha utilizado el valor de  $\sigma \ln(X/X_{medio})$  correspondiente a todo el intervalo del  $IHT_v$  de 0.25 a 8.5.

e) Con la probabilidad de 95% se han determinado los límites de confianza  $\ln(X_{min}^{riego}/ X_{medio}) = [\ln(X/X_{medio})]_{medio} - \sigma \ln(X/X_{medio})$  y  $\ln(X_{max}^{riego}/ X_{medio}) = [\ln(X/X_{medio})]_{medio} + \sigma \ln(X/X_{medio})$

f) Finalmente, se tomaron los antilogaritmos de los valores de  $\ln(X_{min}^{riego}/ X_{medio})$  y  $\ln(X_{max}^{riego}/ X_{medio})$  en cada intervalo del  $IHT_v$  y se han multiplicado estos antilogaritmos por los valores medios  $X_{medio}$  de cada propiedad correspondientes a cada intervalo del  $IHT_v$ . Así se han obtenido los intervalos de confianza de cambio de cada propiedad  $X$  en cada intervalo del  $IHT_v$ . Considerando la distribución real de los valores reales de cada propiedad, se han corregido los intervalos  $[X_{min}^{riego}, X_{max}^{riego}]_{calc}$  calculados estadísticamente comparando los

valores existentes en la base de datos [ $X_{min}^{riego}$ ,  $X_{max}^{riego}$ ] $^{dat}$ . El límite  $X_{min}^{riego}$  dentro de cada intervalo del  $IHT_v$  fue establecido como máximo entre [ $X_{min}^{riego}$ ] $^{calc}$  y [ $X_{min}^{riego}$ ] $^{datos}$ . El límite  $X_{max}^{riego}$  dentro de cada intervalo del  $IHT_v$  fue establecido como mínimo entre [ $X_{max}^{riego}$ ] $^{calc}$  y [ $X_{max}^{riego}$ ] $^{datos}$ .

#### **4.2.3.5. Evaluación de la alteración de algunas propiedades del suelo y del índice integral de fertilidad del suelo causado por el cambio climático**

En nuestro análisis se ha aplicado el método del  $IHT$  para los escenarios de vulnerabilidad del cultivo de maíz y de trigo. Para aplicar este método se establecieron las gráficas de dependencia de las propiedades  $\phi$  de los suelos vírgenes y de los suelos agrícolas bajo riego en función del índice climático  $IHT_v^{2000}$  para las condiciones climáticas promedio anuales del inicio del siglo XXI. En el trabajo presente, las gráficas  $\phi(IHT_v^{2000})$  fueron basadas en la información publicada por Castillo (2007), quien estableció gráficas para los terrenos vírgenes y de temporal con pendientes menores de 3% y para el grupo geomorfológico de los suelos automorfos formados in situ (es decir, de los suelos cuya formación no depende del manto freático ó los suelos ubicados en los terrenos con profundidades de los niveles freáticos mayores de 5 m aproximadamente). En este análisis se parte del supuesto de que la mayor parte del área dedicada a la agricultura bajo riego, posee pendientes menores al 3% y que además estos suelos tienen una formación similar a la comentada por Castillo, *et al.* (2007). Para fines del presente trabajo y en base a los principios descritos en el capítulo 3.5, se analizaron las propiedades que intervienen en el cálculo del índice integral de fertilidad del suelo: cantidad de materia orgánica, fósforo, potasio y  $pH$ .

Los pronósticos del cambio del índice integral de fertilidad del suelo agrícola bajo riego ( $F_I$ ) en función de los escenarios del cambio del índice climático  $IHT_v$  (del  $IHT_v^{2000}$  al  $IHT_v^{2100}$ ) se realizaron de la siguiente manera:



- Se seleccionaron sitios representativos de condiciones climáticas contrastantes, donde existen pronósticos de cambio climático por Gay (2003). La idea general es que estos sitios constituyan sitios de referencia de las zonas áridas, zonas frías de altura ó templadas, y tropicales húmedas y secas.
- Se utilizaron los valores de albedo promedio anuales definidos por Castillo (2007) para la vegetación natural en los sitios seleccionados, suponiendo que este valor no debe cambiarse significativamente por el cambio climático. (si va a cambiar poco la vegetación natural).
- Estos valores de albedo, así como los datos existentes y pronosticados sobre la radiación global y la temperatura del aire promedio anuales para inicio y finales del siglo XXI, se han utilizado para calcular la radiación neta y los índices climáticos  $IHT_v^{2000}$  y  $IHT_v^{2100}$  para los años 2000 y 2100 en cada sitio seleccionado.
- Se recolectó la información sobre contenido de materia orgánica ( $MO_r$ ), fósforo ( $P_r$ ), potasio ( $K_r$ ) y  $pH_r$  en la capa arable (0-20cm) de los suelos irrigados de los distritos de riego del país ubicados en diferentes zonas climáticas. Se tomaron en cuenta las partes de los distritos de riego con producción de maíz de grano y trigo. También se tomaron en cuenta las pendientes de los terrenos menores de 3% y seleccionando los suelos no ensalitrados (cuya salinidad es menor de 2 mmhos  $cm^{-1}$ ) posiblemente por la ubicación somera del nivel freático.
- Utilizando estos datos, con la fórmula (12) se han calculado los valores del índice integral de fertilidad de estos suelos  $F_r^{2000}$ .
- A través del tratamiento estadístico de los valores  $F_r^{2000}$  descrito por Contreras, *et al.* (2002) se han obtenido sus valores modales de  $F_r^{2000}$  representativos para las regiones con los mismos valores del índice climático  $IHT_v^{2000}$ .
- Se calcularon los valores del índice climático  $IHT_v^{2000}$  correspondiente a la ubicación de las estaciones meteorológicas existentes posiblemente cercana a los terrenos agrícolas bajo riego, donde se tomaron los datos sobre las propiedades de suelos,

- A través de interpolación con el método del inverso del cuadrado de la distancia, se han asignado los valores de  $IHT_v^{2000}$  a los sitios de toma de datos sobre las propiedades de suelos,
- Se estableció la gráfica  $F_r^{2000}(IHT_v^{2000})$  que relaciona la dependencia del índice integral de fertilidad del suelo bajo riego  $F_r^{2000}$  en función del índice climático  $IHT_v^{2000}$  representativo para cada sitio geográfico con la vegetación natural pero con las coordenadas iguales al terreno agrícola seleccionado bajo riego.
- A través de los escenarios del cambio climático al final del siglo XXI se han calculado los índices climáticos  $IHT_v^{2100}$  correspondientes a la ubicación de cada sitio agrícola seleccionado bajo riego pero considerando abstractamente la existencia de la vegetación natural (no agrícola).
- Para cada sitio geográfico de referencia (por ejemplo, indicado con subíndice 1), de la gráfica  $F_r^{2000}(IHT_v^{2000})$  se ha tomado un valor del índice de fertilidad del suelo agrícola bajo riego  $F_{r,1}^{2000}$  correspondiente al índice climático local  $IHT_{v,1}^{2000}$  representativo para este sitio.
- Para cada sitio geográfico de referencia (con subíndice 1), de la gráfica existente  $F_v^{2000}(IHT_v^{2000})$  (Contreras, *et al.*, 2002) se han tomado los valores de los índices de fertilidad del suelo virgen  $F_{v,1}^{2000}$  y  $F_{v,1}^{2000}$  correspondientes a los índices climáticos locales  $IHT_{v,1}^{2000}$  y  $IHT_{v,1}^{2100}$  para inicio y finales del siglo XXI respectivamente.
- De la gráfica  $F_v^{2000}(IHT_v^{2000})$  se ha tomado el valor máximo del índice de fertilidad del suelo virgen a nivel regional ( $F_{v,max}^{2000}$ ).

Finalmente, se calcularon los valores  $F_{r,1}^{2100}$  correspondientes a nivel regional al sitio agrícola bajo riego 1 donde según los pronósticos climáticos, el índice climático en el transcurso del siglo XXI se cambia del  $IHT_{v,1}^{2000}$  al  $IHT_{v,1}^{2100}$ . Los cálculos se han hecho con la fórmula:

$$F_{r,1}^{2100} = F_{r,1}^{2000} + F_{r,max}^{2000} \left[ 1 + \frac{F_{v,1}^{2100} - F_{v,1}^{2000}}{F_{v,max}^{2000}} \right] \quad (30)$$

Donde  $F_{v,max}^{2000}$  = valor máximo regional del índice de fertilidad del suelo agrícola bajo riego.

La formula (27) considera que la gráfica  $F_v^{2000}(IHT_v^{2000})$  refleja la dependencia del índice de fertilidad del suelo virgen únicamente del índice climático  $IHT_v^{2000}$  al principio del siglo XXI, mientras que la gráfica  $F_v^{2000}(IHT_v^{2000})$  refleja la dependencia del índice de fertilidad del suelo agrícola bajo riego  $F_r^{2000}$  de la condiciones zonales climáticas ( $IHT_v^{2000}$ ) y de las actividades agrícolas, las cuales no son zonales. Se supone que sólo por el cambio climático (sin otros factores que pudieran afectar el suelo) el cambio relativo del índice de fertilidad del suelo agrícola es igual al cambio del suelo virgen:

$$\frac{F_{r,1}^{2100} - F_{r,1}^{2000}}{F_{r,max}^{2000}} = \frac{F_{v,1}^{2100} - F_{v,1}^{2000}}{F_{v,max}^{2000}} \quad (31)$$

En la Figura 2, en forma gráfica se explica el procedimiento del pronóstico de cambio del índice de fertilidad del suelo agrícola bajo riego atribuible al cambio climático.

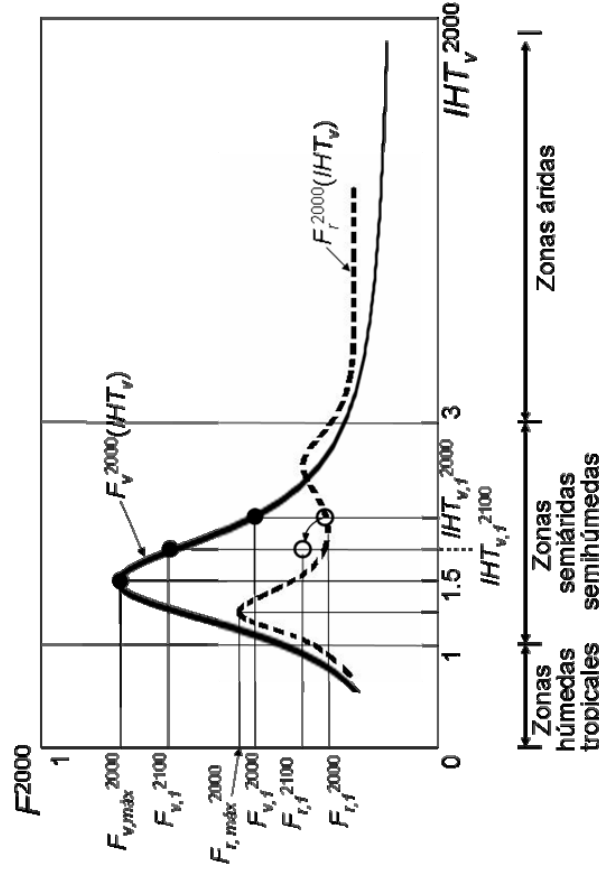


Figura 2. Esquema de pronóstico de cambio del índice integral de fertilidad del suelo agrícola bajo riego en el sitio marcado con subíndice 1, en el transcurso del siglo XXI del valor  $F_{r,f}^{2000}$  hasta  $F_{r,f}^{2100}$ .  $IHT_{v,1}^{2000}$  y  $IHT_{v,1}^{2100}$  son los índices climáticos en el sitio 1 en el caso de su cobertura con la vegetación natural al principio y final del siglo XXI respectivamente.  $F_{v,1}^{2000}$  y  $F_{v,1}^{2000}$  son los índices integrales de fertilidad en el mismo sitio al principio y final del siglo XXI respectivamente.  $F_{v,max}^{2000}$  y  $F_{r,max}^{2000}$  son valores máximos a nivel regional del índice de fertilidad del suelo virgen y agrícola bajo riego respectivamente.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Rendimiento potencial del cultivo de maíz y trigo bajo riego

Se calculó el rendimiento potencial para los cultivos de maíz y trigo de riego con alto nivel de insumos para los ciclos primavera-verano *PV* y otoño-invierno *OI*, utilizando el conjunto de Ecuaciones (13-28), para diferentes distritos de riego de México (Cuadro 1 y Figura 3). Los distritos de riego se distribuyen estratégicamente para cubrir una amplia variedad de condiciones ambientales que van desde las zonas tropicales subhúmedas y húmedas de la vertiente del Golfo de México, cruzando por las tierras frías del centro del país, hasta llegar a la vertiente del Océano Pacífico que corresponde a la zona tropical seca. También se consideraron las zonas áridas y semiáridas hacia el noroeste del país.

Los distritos de riego seleccionado se ubican en altitudes de de 8 a 2075 m. El rango latitudinal va de 20.03° a 32.55°. Las precipitaciones van de 58.83 mm de lámina de agua anual a 1118.40 mm. La temperatura media anual de 19.88 °C en el distrito de riego 034 Estado de Zacatecas a 28.11 °C en el distrito de riego 063 Guasave Sin.

**Cuadro 1.** Valores promedio anuales de la temperatura del aire ( $T^{2000}$ ), precipitación ( $P^{2000}$ ) del índice climático ( $IHT^{2000}$ ) para el inicio del siglo XXI típicos para los distritos de riego seleccionados con la producción de maíz de grano y trigo

DISTRITO DE RIEGO	ESTADO	Altitud (m)	Cultivos	$T^{2000}$ (°C)	$P^{2000}$ (mm)	$IHT^{2000}$ (adim)	$Rn^{2000}$ (MJ m <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup> )
4 Don Martín	N.L	187	Maíz y trigo	24.62	528.5	1.16	6829.23
10 Culiacán-Humaya-San Lorenzo	Sin.	340	Maíz y trigo	25.89	583.7	1.16	6916.62
11 Alto Río Lerma	Gto.	1755	Maíz y trigo	21.33	735.37	0.99	5928.83
13 Estado de Jalisco	Jal.	1800	Maíz y trigo	20.92	760.7	1.01	6071.55
14 Río Colorado	B.C.N	51	Maíz	25.62	58.83	0.97	6135.65
17 Región Lagunera	Coah. - Dgo.	1112	Trigo	24.6	204.68	0.78	6376.08
34 Estado de Zacatecas	Zac.	1980	Maíz y trigo	19.88	398.13	0.95	5420.01
48 Ticul	Yuc.	8	Maíz	28.00	1114.40	1.83	7491.42
52 Estado de Durango	Dgo.	1607	Maíz y trigo	21.84	417.60	1.31	5231.01
63 Guasave	Sin.	9	Maíz y trigo	28.11	423.80	1.15	7106.10
66 Santo Domingo	B.C.S	30	Maíz y trigo	23.30	107.75	1.47	6698.49
75 Río fuerte	Sin.	235	Maíz y trigo	27.58	344.58	1.37	6901.25
76 Valle del carrizo	Sin.	84	Maíz y trigo	27.88	413.03	1.31	6879.02
89 El Carmen	Chih.	1205	Maíz	20.80	250.8	1.14	4633.28

Nota: El índice climático  $IHT^{2000}$  corresponde al caso si la superficie del sitio seleccionado tenía la vegetación natural representativa par la región climática a la cual pertenece el distrito de riego.

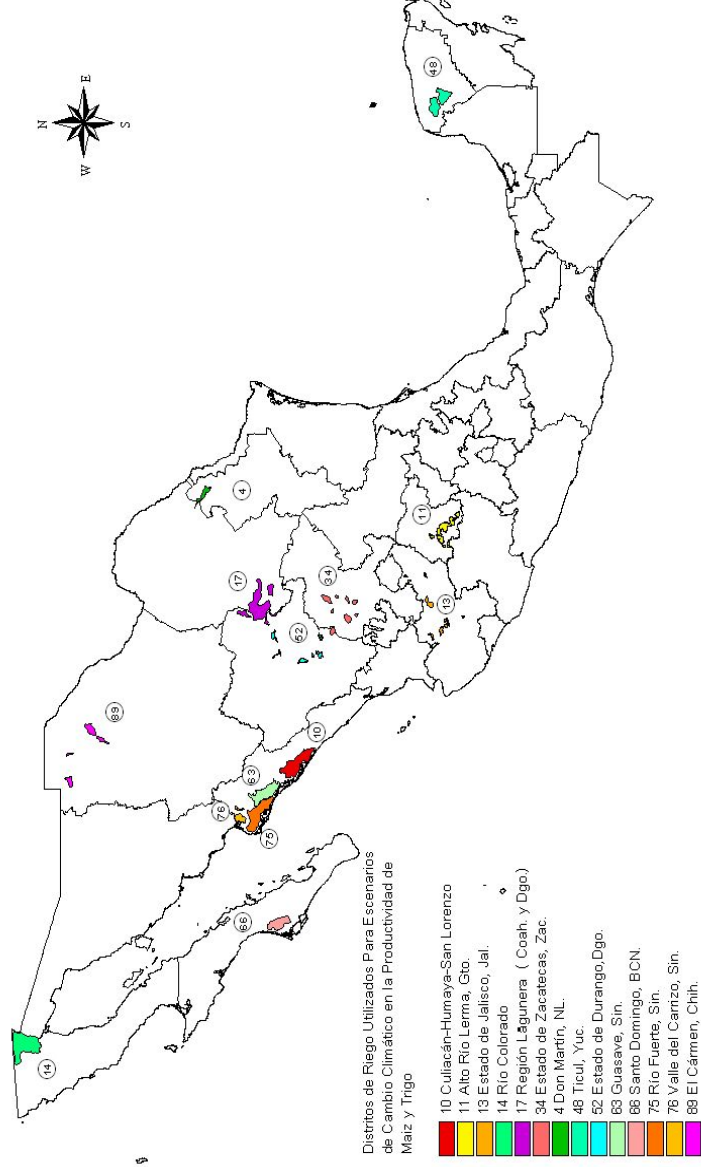


Figura 3. Ubicación de los distritos de riego seleccionados para escenarios de cambio en el rendimiento del maíz de riego y las condiciones climáticas anuales al inicio del siglo XXI

Se calculó el índice climático de estos sitios (distritos de riego) para finales del siglo XXI durante la estación de crecimiento de los cultivos considerando los dos escenarios climáticos correspondientes al caso de duplicación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y obtenidos por los dos Modelos de Circulación General (MCG): el Geophysical Fluids Dynamics Laboratory (*GFDL-R30*) y el Canadian Climate Center (*CCC*).

El pronóstico de cambio en los rendimientos máximos se realizó utilizando el modelo FAO-IIASA (2000). Las fechas de siembra y cosecha, índice de área foliar, e índice de cosecha se muestran en el **anexo C**. Los resultados del cálculo de los cambios en los rendimientos máximos para maíz y trigo, se muestran en los cuadros 2, 3 y 4.

Los cambios en los rendimientos máximos están relacionados con las contribuciones individuales relacionadas con una mayor concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, y consecuentemente con una mayor fotosíntesis máxima, ( $P_m$ ) cambios en la radiación global, y con los incrementos en las temperaturas ambientales; estas últimas, generalmente, relacionadas con disminuciones en la productividad potencial debido a las pérdidas de biomasa por respiración de mantenimiento durante el proceso de acumulación de biomasa.

**Cuadro 2.** Cambios en la respuesta fisiológica y productiva del cultivo de maíz del ciclo (PV) bajo riego con alto nivel de insumos en condiciones de cambio climático durante el siglo XXI

DISTRITO DE RIEGO	ESTADO	Cambios en la respuesta del maíz PV en función de los escenarios climáticos					
		$\Delta b_{gm}$ (%)			$\Delta b_{rm}$ (%)		
		GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC
004 Don Martín	N.L.	-0.3	-1.2	24.2	21.6	-0.29	-1.24
010 Cuiliacán-Humaya-San Lorenzo	Sin.	-1.3	-0.4	18.7	17.2	-3.89	-3.02
011 Alto Río Lerma	Gto.	-0.5	2.5	27.5	21.8	-0.49	2.53
014 Río Colbrado	B.C.N	3.4	3.9	34.4	26.6	2.21	2.11
034 Estado de Zacatecas	Zac.	-0.2	1.1	29.2	30.2	-0.20	1.10
48 Ticul	Yuc.	3.5	-0.4	23.7	15.0	3.51	-0.39
066 Santo Domingo	B.C.S	-2.6	-3.5	21.4	19.9	-2.61	-3.49
076 Valle del Carrizo	Sin.	6.5	7.0	6.5	-0.5	6.59	7.00
089 El Carmen chihuahua	Chih.	-2.4	-2.8	27.3	23.8	-2.36	-2.83

Nota:  $\Delta b_{gm}$  = cambios relativos en la tasa máxima de producción de biomasa bruta de un cultivo de referencia;  $\Delta b_{gm} = (b_{gm}^{2100} - b_{gm}^{2000})/100$ ;  $b_{gm}$  = tasa promedio de pérdida de asimilados por respiración de mantenimiento durante el ciclo de crecimiento ( $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$ );  $\Delta Y_{max}$  = cambios relativos en el rendimiento del cultivo de maíz (en %), GFDL-R30 y CCC son modelos de la circulación atmosférica.



**Cuadro 3.** Cambios en la respuesta fisiológica y productiva del cultivo de maíz del ciclo O/ bajo riego con alto nivel de insumos en condiciones de cambio climático durante el siglo XXI

DISTRITO DE RIEGO	ESTADO	Cambios en la respuesta del maíz O/ en función de los escenarios climáticos					
		$\Delta b_{gm}$ (%)		$\Delta b_{rm}$ (%)		$\Delta Y_{max}$ (%)	
		GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC
010 Culiacán-Humaya-San Lorenzo	Sin.	-2.3	-2.1	29.7	20.0	-2.35	-2.14
011 Alto Río Lerma	Gto.	2.5	5.7	57.2	23.4	2.45	5.72
034 Estado de Zacatecas	Zac.	4.5	2.4	14.9	0.9	68.57	65.17
063 Guasave	Sin.	-4.2	0.5	32.6	29.0	-3.75	-3.65
075 Río Fuerte	Sin.	-6.3	-2.1	11.3	7.9	-12.78	-12.14
076 Valle del Carrizo	Sin.	-2.4	-1.4	34.0	27.8	-2.43	-1.36

Nota:  $\Delta b_{gm}$  = cambios relativos en la tasa máxima de producción de biomasa bruta de un cultivo de referencia;  $\Delta b_{gm} = (b_{gm}^{2100} - b_{gm}^{2000})/100/b_{gm}^{2000}$ ;  $b_{rm}$  = tasa promedio de pérdida de asimilados por respiración de mantenimiento durante el ciclo de crecimiento ( $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$ );  $\Delta Y_{max}$  = cambios relativos en el rendimiento del cultivo de maíz (en %), GFDL-R30 y CCC son modelos de la circulación atmosférica.

De acuerdo con (Akita y Moss, 1973; Kimball, *et al.*, 1990), para un escenario 2XCO<sub>2</sub> se considera que la fotosíntesis máxima en la hoja de maíz es pequeña y del orden del 10% del valor actual. Esto explica los pequeños cambios obtenidos de  $b_{gm}$  en el cultivo de maíz para los ciclos PV y O/ de los cuadros anteriores.

Según se muestra en los cuadros 2 y 3, el modelo climático GFDL-R30 permite predecir un aumento en las tasas respiratorias de 6.5 al 34.4% y del 11.3% al 57.2% para otoño-invierno. El modelo CCC predice menores cambios en las tasas respiratorias (del -0.5 al 30.2%) para primavera-verano y (del 0.9% al 29%) en otoño-invierno, muy relacionadas con los menores incrementos en la temperatura pronosticada

Una razón de porque un incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> incrementa la tasa fotosintética, es que aumenta el gradiente de concentración entre la atmósfera próxima a la hoja y la concentración dentro de la cámara estomática. Si además, se asume que la resistencia estomática no cambia, un incremento del flujo de CO<sub>2</sub> se traducirá en un incremento de la tasa fotosintética (Kimball, *et al.*, 1990). No obstante, la respuesta del maíz es pequeña y se relaciona con las diferencias en las reacciones de naturaleza bioquímica que se dan en el interior de los cloroplastos de las plantas que permite clasificarlas en plantas C<sub>4</sub> (como el maíz).

Según investigaciones realizadas (Akita y Moss, 1973; Anthony, *et al.*, 2000; Kimball, *et al.*, 1990) la respuesta del trigo a un doblamiento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera implica un incremento de 30 a 40% en su fotosíntesis máxima, lo cual se ve reflejado en el cuadro 4.

**Cuadro 4.** Cambios en la respuesta fisiológica y productiva del cultivo de trigo del ciclo O/ bajo riego con alto nivel de insumos en condiciones de cambio climático durante el siglo XXI

DISTRITO DE RIEGO	ESTADO	Cambios en la respuesta del trigo O/ en función de los escenarios climáticos					
		$\Delta b_{gm}$ (%)			$\Delta b_{rm}$ (%)		
		GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC
004 Don Martín	B.C.N	9.05	6.45	59.01	41.63	5.02	2.50
010 Culiacán-Humaya-San Lorenzo	N.L	-18.11	-7.11	51.85	47.80	21.47	37.78
011 Alto Río Lerma	Gto	8.27	13.33	25.77	22.37	5.22	10.04
013 Estado de Jalisco	Jal.	15.38	16.84	15.38	3.47	15.39	16.84
017 Región Lagunera	Coah. - Dgo.	11.49	20.07	16.32	5.54	11.49	20.07
034 Estado de Zacatecas	Zac.	13.55	13.49	33.00	18.38	13.56	13.49
052 Estado de Durango	Dgo.	5.69	7.36	49.59	37.20	5.70	7.36
063 Guasave	Sin.	-4.21	0.55	32.62	29.09	-4.21	0.55
066 Santo Domingo	B.C.S	15.16	14.64	22.48	13.95	6.77	6.30
075 Río Fuerte	Sin.	-6.36	-2.12	11.31	7.97	-4.74	-0.43
076 Valle del Carrizo	Sin.	0.00	3.42	37.99	33.38	0.00	3.42

Nota:  $\Delta b_{gm}$  = cambios relativos en la tasa máxima de producción de biomasa bruta de un cultivo de referencia;  $\Delta b_{gm} = (b_{gm}^{2100} - b_{gm}^{2000})/100/b_{gm}^{2000}$ ;  $b_{rm}$  = tasa promedio de pérdida de asimilados por respiración de mantenimiento durante el ciclo de crecimiento ( $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ );  $\Delta Y_{max}$  = cambios relativos en el rendimiento del cultivo del trigo (en %), GFDL-R30 y CCC son modelos de la circulación atmosférica.

Según se muestra en el cuadro anterior, el modelo climático GFDL-R30 permite predecir un aumento en las tasas respiratorias de 11.31 al 59.01%. El modelo CCC predice menores cambios en las tasas respiratorias del 3.47% al 47.8%. Los aumentos promedios en las tasas respiratorias es del 23% para el CCC y del 32% para el GFDL-R30.

De lo anterior, se observa que mientras que la respuesta fotosintética del maíz es muy pequeña a concentraciones de  $\text{CO}_2$ , las plantas como el trigo ( $\text{C}_3$ ) tienen una respuesta fotosintética importante hasta concentraciones de  $\text{CO}_2$  de  $800 \mu\text{mol mol}^{-1}$  (Kimball, *et al.*, 1990).

Esto explica los valores mayores relativos en la tasa máxima de producción de biomasa bruta que se presentan para el caso del trigo en comparación con los del cultivo del maíz, que resulta ser un indicador de la respuesta productiva del trigo a las altas a un escenario  $2\times\text{CO}_2$ .

El cambio climático global parece tener un efecto ligeramente negativo sobre el rendimiento potencial ó máximo del maíz bajo riego. Por ejemplo, en los ciclos primavera-verano los escenarios utilizando el modelo *GFDL-R-30* permite estimar una disminución en los rendimientos en el 54% de los distritos de riego utilizados en el presente trabajo, estas disminuciones van del 0.29% al 3.89%. Utilizando el modelo CCC permite estimar cambios negativos en el 45% de los distritos de riego del rango de 0-39% al 3.49%. Para el distrito 034 se presenta un incremento importante mayor del 50% para ambos modelos. Esto significa que el cambio climático significará un pequeño mejoramiento de estas tierras, desde el punto de vista agroclimático, para el cultivo de maíz. La productividad potencial de los distritos de riego analizados parece ser tener una baja sensibilidad al cambio de las variables temperatura y radiación solar global. Sin embargo, la productividad máxima de un cultivo está limitada por otros factores como el grado de fertilidad del suelo y la disponibilidad de agua.

## 5.2. Cambio del índice hídrico del suelo por el cambio climático en México

Se calcularon los valores actuales del índice hídrico promedio ( $K_{hidr}^{2000}$ ) para cada estación de estudio dentro de los distritos de riego, durante la estación de crecimiento para cada mes de los cultivos, comenzando un mes antes del inicio de la estación de crecimiento para considerar el agua almacenada en el suelo, por lluvias previas, siempre y cuando la precipitación del mes anterior al inicio del ciclo fuera mayor que la lámina de riego mensual aplicada.

El índice hídrico fue el resultado de la media de los valores mensuales durante la estación de crecimiento. De la misma manera se calcularon los índices hídricos a finales de siglo ( $K_{hidr}^{2100}$ ), con la consideración de restarle a la lámina de riego para finales de siglo ( $Lr^{2100}$ ) el valor proporcional al incremento ó decremento de la precipitación futura  $P_r^{2100}$  con respecto a la precipitación actual  $P_r^{2000}$ . Esto se debe a que los valores de  $K_{hidr}$  actuales indican una buena disponibilidad de agua para los cultivos en los distritos de riego ya que la productividad en los últimos 15 años ha ido en aumento (Figura 4). Según las gráficas en la Figura 4 en el transcurso de los últimos 15 años la razón media crecimiento del rendimiento de maíz de grano de los periodos  $PV$  y  $OI$ , fue del orden de  $0.38 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . La productividad de trigo no ha cambiado en transcurso de los últimos 15 años.

Para determinar cambio del índice hídrico durante el siglo XXI se estimaron los cambios en la radiación neta y el índice hidrotérmico local en los distritos de riego con los cultivos de maíz y trigo. Los resultados obtenidos indican que en general los dos modelos climáticos presentan escenarios de cambios negativos en la radiación neta. Como en el caso del distrito de riego 048 Ticul donde los decrementos en la  $Rn$  para el modelo CCC es de 45.0 % para el ciclo  $PV$ .

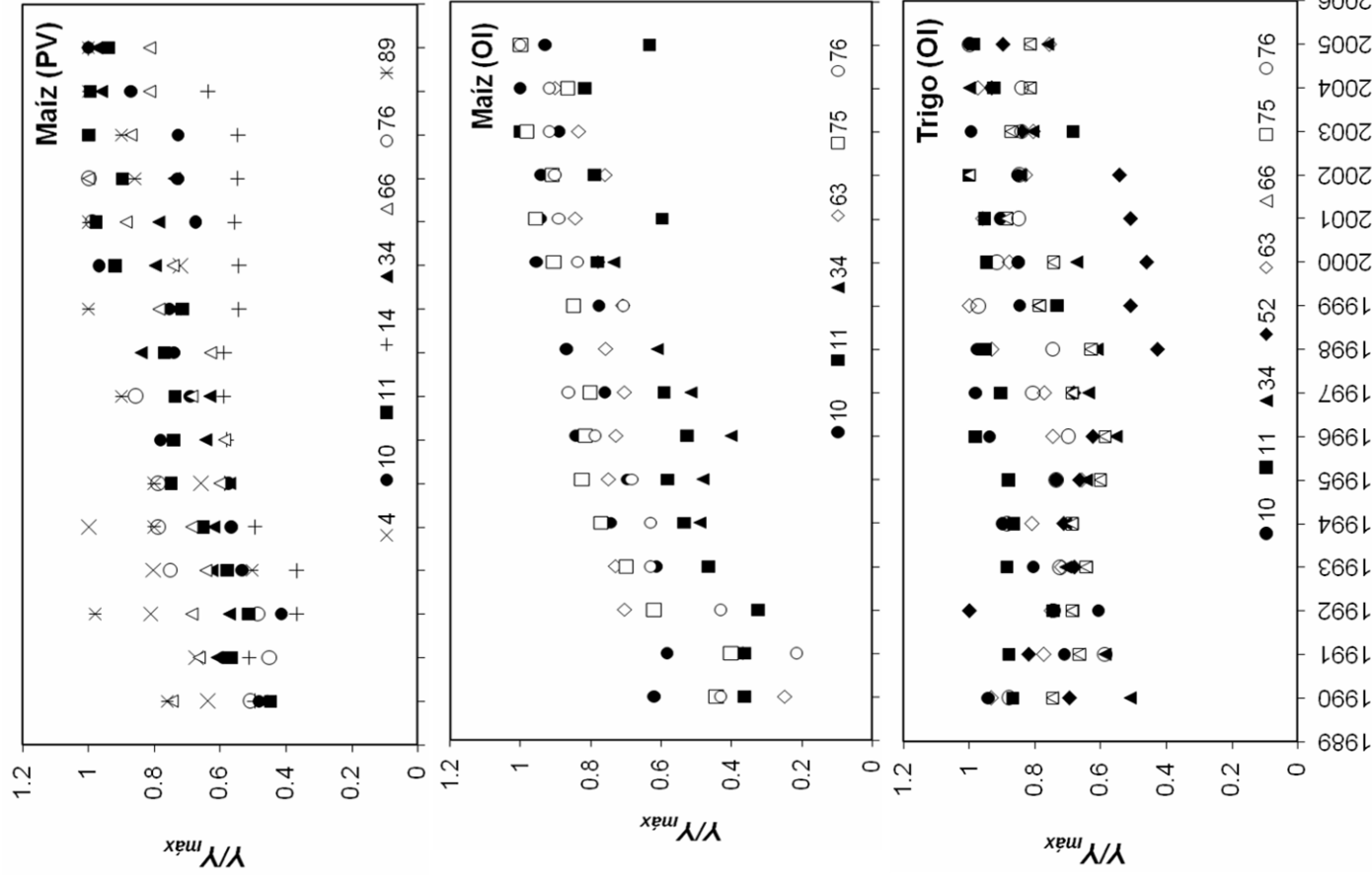


Figura 4.

Cambio de los rendimientos de maíz de grano producido en los periodos primavera – verano (PV), otoño – invierno (OI) y de trigo del periodo otoño – invierno (OI) en algunos distritos de riego del país durante los últimos 15 años. En las gráficas se muestran los números de los distritos de riego.  $Y_{max}$  = los rendimientos máximos durante el periodo analizado del 1990 al 2005: maíz de PV = 4.9, 9.3, 9.1, 6.2, 6.1, 6.0, 6.9, 5.0 en los distritos de riego con números 4, 10, 11, 14, 34, 66, 76 y 86 respectivamente; maíz de OI = 9.7, 11.0, 7.4, 10.4, 10.0, 9.3, 11, 34, 63, 75 y 76; trigo de OI – 10.0, 5.1, 6.8, 6.2, 5.9, 4.8, 7.0, 5.2 y 5.1 en los distritos de riego con números 10, 11, 34, 52, 63, 66, 75 y 76.

Los valores de  $K_{hidr}$  tienen un valor entre 0 y 1.0; valores más cercanos a cero indican condiciones de déficit de agua en las plantas y valores cercanos a 1.0 indican equilibrio entre las láminas de agua precipitada y de riego aplicadas y el agua evapotranspirada por el cultivo. La capacidad del suelo para almacenar agua es un valor limitado por su porosidad y particularidades en la retención del agua. Esto significa que los valores de  $K_{hidr} > 1.0$  deben ser considerados como 1.0 ya que no pueden ser mayor de 1.0; es decir, no pueden retener agua más allá de su capacidad de almacenamiento. Esta situación se observa en los distritos de riego y en las zonas tropicales húmedas de México, donde el balance hídrico mensual indica que los cultivos satisfacen sus necesidades de agua durante la estación de crecimiento ( $IHT_r < 1.0$  ó  $K_{hidr} = 1.0$ ).

**Cuadro 5.** Cambio en las variables climáticas ( $\Delta Rn_r$ ,  $\Delta IHT_r$  y  $\Delta K_{hidr}$ ) durante el ciclo PV del maíz de riego en una atmósfera con concentración de CO<sub>2</sub> duplicada

DISTRITO DE RIEGO	ESTADO	Cambio climático (Gay, 2003)					
		$\Delta Rn_r$ (%)		$\Delta IHT_r$ (%)		$\Delta K_{hidr}$ (%)	
		GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC
004 Don Martin	N.L	-0.2	-2.7	5.6	7.4	-5.3	-6.9
010 Culiacán-Humaya-San Lorenzo	Sin.	-1.7	-1.7	32.9	10.7	-25.0	-9.7
011 Alto Río Lerma	Gto.	-3.1	0.3	15.0	16.3	-13.0	-14.0
014 Río Colorado	B.C.N	-1.9	-1.9	33.7	0.0	-24.7	0.2
034 Estado de Zacatecas	Zac.	-6.5	-3.6	1.2	6.4	-0.7	-6.2
48 Ticul	Yuc.	-40.0	-45.3	1.7	-7.6	-1.6	8.2
066 Santo Domingo	B.C.S	-6.4	-8.3	57.9	38.0	-36.7	-27.0
076 Valle del Carrizo	Sin.	-0.9	-5.2	19.6	1.3	-16.1	-0.8
089 El Carmen chihuahua	Chih.	-3.3	-5.9	17.3	-5.2	-14.8	5.4

Nota:  $Rn =$  radiación neta;  $IHT =$  Índice hidrotérmico local:  $\Delta Rn = (Rn^{2100} - Rn^{2000})100/Rn^{2000}$ ;  $\Delta K_{hidr} = (K_{hidr}^{2100} - K_{hidr}^{2000})100/K_{hidr}^{2000}$ ;  $\Delta IHT_r = (IHT_r^{2100} - IHT_r^{2000})100/IHT_r^{2000}$ .

En general, para el ciclo PV los cambios en  $Rn_r$  y el  $K_{hidr}$  son negativos para ambos modelos, por el contrario el  $IHT_r$  aumenta, esto significa que la región de estudio tiende a volverse más árida debido a la disminución de la precipitación en el ciclo del cultivo.

**Cuadro 6.** Cambio en las variables climáticas ( $\Delta Rn_r$ ,  $\Delta IHT_r$  y  $\Delta K_{hidr}$ ) durante la estación de crecimiento de maíz *OI* de riego con alto nivel de insumos en una atmósfera con concentración de CO<sub>2</sub> duplicada

DISTRITO DE RIEGO	ESTADO	Cambio climático (Gay, 2003)					
		$\Delta Rn_r$ (%)		$\Delta IHT_r$ (%)		$\Delta K_{hidr}$ (%)	
		GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC
010 Culiacán-Humaya-San Lorenzo	Sin.	11.9	-7.8	10.1	15.6	-9.0	-13.3
011 Alto Río Lerma	Gto.	-24.0	-29.6	32.4	-1.9	-24.4	2.0
034 Estado de Zacatecas	Zac.	8.5	7.0	-0.7	-0.2	-30.9	-31.3
063 Guasave	Sin.	-44.5	-45.2	-2.2	20.4	-37.2	-49.0
075 Río Fuerte	Sin.	-2.6	-6.51	-11.4	13.9	-31.3	-46.4
076 Valle del Carrizo	Sin.	1.6	-4.1	-1.6	21.7	-40.1	-50.9

Nota:  $Rn$  = radiación neta;  $IHT$  = índice hidrotérmico local;  $\Delta Rn = (Rn^{2100} - Rn^{2000})100/Rn^{2000}$ ;  $\Delta K_{hidr} = (K_{hidr}^{2100} - K_{hidr}^{2000})100/K_{hidr}^{2000}$ ;  $\Delta IHT_r = (IHT_r^{2100} - IHT_r^{2000})100/IHT_r^{2000}$ .

Para el caso de maíz de *OI*, cuanto mayor sea el incremento de la  $Rn_r$ , más áridas se vuelven las tierras de cultivo, tal como lo refleja el cambio negativo del  $K_{hidr}$ , el cual indica el grado de disponibilidad de agua que tienen los cultivos para su desarrollo.

De acuerdo con la definición del  $K_{hidr}$ , a disminuciones de radiación neta se presenta cambios negativos en los valores de  $IHT$  y consecuentemente un aumento del  $K_{hidr}$ . Sin embargo, en los cuadros 5 y 6 no se alcanza a percibir el comportamiento descrito, lo cual puede explicarse con el hecho de que ambos modelos presentan escenarios de disminución de precipitación.

**Cuadro 7.** Cambio en las variables climáticas ( $\Delta Rn_r$ ,  $\Delta IHT_r$  y  $\Delta K_{hidr}$ ) durante la estación de crecimiento del trigo OI

DISTRITO DE RIEGO	ESTADO	Cambio climático (Gay, 2003)					
		$\Delta Rn_r$ (%)		$\Delta IHT_r$ (%)		$\Delta K_{hidr}$ (%)	
		GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC
004 Don Martín	B.C.N	0.9	-7.3	27.7	14.9	-21.7	-13.0
010 Culiacán-Humaya-San Lorenzo	N.L	2.2	-4.4	21.7	9.2	-17.8	-8.4
011 Alto Río Lerma	Gto.	1.8	-5.8	12.4	-5.8	-11.1	6.1
013 Estado de Jalisco	Jal.	0.5	-66.1	4.8	-0.6	-4.6	0.9
017 Región Lagunera	Coah. - Dgo.	-16.9	-0.88	1.5	3.2	-1.4	-3.4
034 Estado de Zacatecas	Zac.	-2.8	-86.8	3.0	0.7	-3.2	-0.6
052 Estado de Durango	Dgo.	20.0	-1.4	-3.0	31.8	3.1	-24.2
063 Guasave	Sin.	-3.5	-5.1	14.2	18.7	-12.5	-15.8
066 Santo Domingo	B.C.S	-3.3	-4.8	-2.0	31.3	2.1	-23.8
075 Río Fuerte	Sin.	-3.7	-5.4	2.3	41.9	-1.7	-29.1

Nota:  $Rn$  = radiación neta;  $IHT$  = Índice hidrotérmico local;  $\Delta Rn = (Rn^{2100} - Rn^{2000})/100$ ;  $\Delta IHT_r = (IHT_r^{2100} - IHT_r^{2000})/100$ ;  $\Delta K_{hidr} = (K_{hidr}^{2100} - K_{hidr}^{2000})/100$ ;  $\Delta K_{hidr} = (K_{hidr}^{2100} - Rn^{2000})/100$ ;  $\Delta K_{hidr} = (K_{hidr}^{2100} - Rn^{2000})/100$ .

En general, los cambios positivos en la temperatura de las zonas áridas y tópicos seco disminuirán el balance de radiación de onda larga, lo que incrementará los valores de radiación neta anual. Si esto está asociado a un escenario de cambios negativos de la precipitación esto únicamente puede significar incrementos en la aridez.

Los resultados de la estimación de los cambios en el índice hidrotérmico local se muestran altamente dependientes de los pronósticos en la precipitación y de la lámina de riego estimada para finales de siglo. Los cambios negativos del  $IHT_r$  indican un cambio favorable en el balance de humedad, únicamente en las zonas humedad del país puede significar excesos de humedad que serán necesarios retirar de los terrenos de cultivo mediante obras de drenaje agrícola, lo que también probablemente signifiquen pérdidas de fertilidad por lavado de nutrientes.



Ambos modelos con sus pronósticos de cambios positivos en el  $IHT_r$  indica incremento de la aridez por tratarse de un escenario de disminución de la precipitación, junto con aumento de las temperaturas, principalmente en el norte del país.

### 5.3. Dependencia de algunas propiedades químicas y biológicas del suelo y del índice integral de fertilidad del suelo en función del índice climático en diferentes partes de México al principio del siglo XXI

En las Figuras 5 y 6 se presenta dependencia en función del índice climático  $IHT_V^{2000}$  de los valores modales regionales del contenido de materia orgánica ( $MO$ ),  $pH$ , fósforo ( $P$ ) y potasio ( $K$ ) en los suelos vírgenes (no usados en la agricultura), suelos agrícolas de producción de grano de maíz y trigo de temporal y de los suelos irrigados de la misma producción en diferentes zonas climáticas del país. Estas gráficas caracterizan la dependencia entre estas propiedades y el  $IHT_V^{2000}$  al inicio del siglo XXI. Todos los terrenos seleccionados tienen la superficie de poca pendiente (menor de 3%) y los suelos pertenecientes al mismo grupo geomorfológicamente homogéneo (suelos automorfos con la profundidad del nivel freático mayor de 3 m, formados *in situ*). En estas gráficas se muestran los valores modales regionales de estas propiedades así como los rangos de confianza (con la confiabilidad de 95%): valor modal  $\pm$  tres desviaciones estándar.

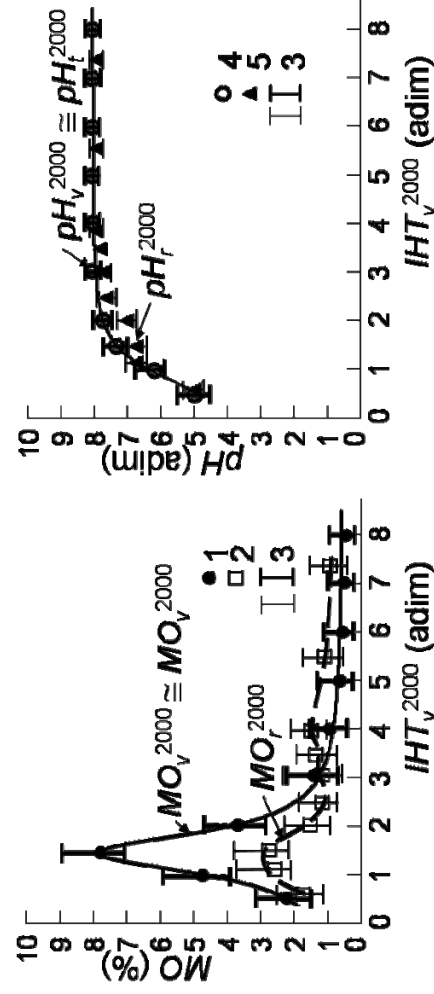


Figura 5. Dependencia de los valores modales regionales del contenido de materia orgánica ( $MO$ ) y  $pH$ , en los suelos vírgenes no usados en la agricultura y suelos agrícolas con la producción de maíz de grano y trigo de temporal y bajo riego en México, ubicados en los terrenos con pendientes  $<3\%$  en altitudes de 0 a 2500 m, en función de los valores promedio anuales del índice climático  $IHT_V^{2000}$  al inicio del siglo XXI. 1 =  $MO_V^{2000} \cong MO_t^{2000}$ , 2 =  $MO_V^{2000}$ , 3 = intervalos de confianza; 4 =  $pH_V^{2000} \cong pH_t^{2000}$ ; 5 =  $pH_r^{2000}$ .

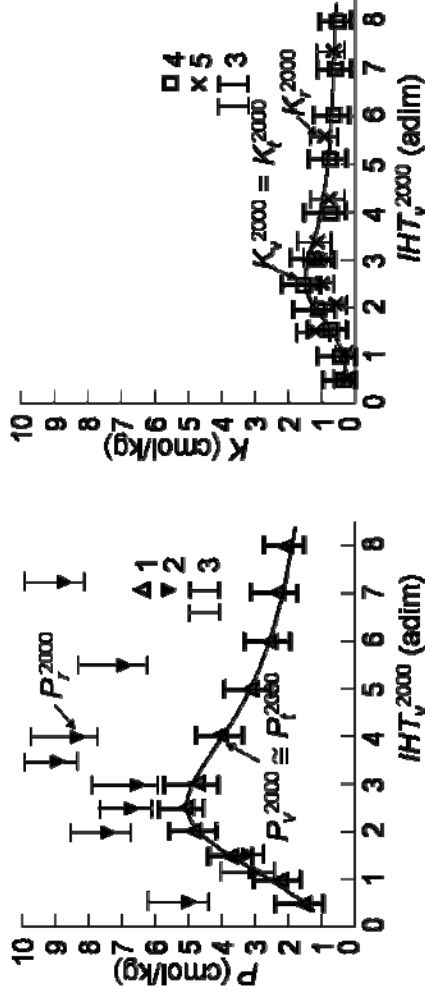


Figura 6. Dependencia de los valores modales regionales del contenido de fósforo ( $P_2O_5$ ) y potasio ( $K_2O$ ), en los suelos vírgenes no usados en la agricultura y suelos agrícolas con producción de grano de maíz y trigo de temporal y bajo riego en México, ubicados en los terrenos con pendientes <3% en altitudes de 0 a 2500 m, en función de los valores promedio anuales del índice climático  $IHT_v^{2000}$  al inicio del siglo XXI. 1 =  $P_v^{2000} \cong P_r^{2000}$ ; 2 =  $P_r^{2000}$ ; 3 = intervalos de confianza; 4 =  $K_v^{2000} \cong K_r^{2000}$ ; 5 =  $K_r^{2000}$ .

Los cálculos del  $IHT_v^{2000}$  a nivel promedio anual señalan que en México este índice varía dentro del intervalo de 0.5 a 8.0. Los valores del  $IHT_v^{2000} < 1$  corresponden a la zona húmeda tropical con precipitación promedio anual  $> 1500$  mm. Los valores de 1 a 2 corresponden a la zona semi-húmeda con  $1000 < Pr \leq 1500$  mm. Valores de 2 a 3.5 pertenecen a la zona semi-árida con  $300 < Pr \leq 1000$  mm, y valores  $> 3.5$ , pertenecen a la zona árida con  $Pr \leq 300$  mm (Contreras, *et al.*, 2002).

Los datos señalan que los valores modales de estas propiedades de los suelos agrícolas de temporal prácticamente coinciden con las propiedades de los suelos vírgenes. Prácticamente, esto se explica por la ausencia de la aplicación de fertilizantes por parte de los campesinos. Entonces, dentro del rango de variación natural de los valores de estas propiedades no se observa diferencia estadística significativa. Por esta razón, las figuras anteriores muestran dependencia de las propiedades de los suelos vírgenes y agrícolas de temporal en función del índice climático  $IHT_v^{2000}$  que corresponden a superficies con vegetación natural.

Según la Figura 5, en los distritos de riego ubicados en las zonas climáticas con  $IHT_v^{2000}$  menor a 3.5 los valores modales del contenido de materia orgánica ( $MO_r^{2000}$ )

son menores que en los terrenos vírgenes no usados en agricultura ( $MO_v^{2000}$ ) y en los terrenos agrícolas de la producción de maíz y trigo de temporal y puede explicarse por dos causas:

- una el exceso de agua, lo que pudiera lavar la materia orgánica, y
- el uso de agua de riego de mala calidad.

Pero como el  $pH^{2000}$  se mantiene casi igual (Figura 5) quiere decir que la calidad de agua de riego no es mala. Si el  $pH$  hubiera subido, indica que hay mayor presencia de Na y este degrada la materia orgánica del suelo.

Como se ve en la Figura 5, en la zona árida del país donde  $IHT_v^{2000} > 3$ , los terrenos irrigados tienen mayor cantidad de materia orgánica ( $MO_r^{2000}$ ) en comparación con los terrenos vírgenes no usados en agricultura ( $MO_v^{2000}$ ) y con los terrenos agrícolas de la producción de maíz y trigo de temporal. Lo anterior, se debe a una mayor actividad microbiológica en el suelo con mayor humedad que en las condiciones de temporal, lo que causa acumulación de materia orgánica.

En las Figuras 5 y 6 no se observan diferencias significativas entre los valores modales regionales de  $pH_r^{2000}$  y del contenido de  $K_r^{2000}$  para los terrenos irrigados, terrenos vírgenes ( $pH_v^{2000}$  y  $K_v^{2000}$ ) y agrícolas de temporal en todas las zonas climáticas estudiadas donde  $0.5 \leq IHT_v^{2000} < 8$ . Esto significa que en los terrenos irrigados para producir maíz de grano y trigo casi no se aplican los fertilizantes de potasio y, que la aplicación de agua de riego modifica relativamente poco el valor de  $pH^{2000}$  del suelo.

Como se observa en la Figura 6, los suelos irrigados contienen mucho más fósforo ( $P_r^{2000}$ ) que los terrenos vírgenes no usados en agricultura ( $P_v^{2000}$ ) y que los terrenos con producción de maíz y trigo de temporal. Como ya se mencionó, esto se explica por la gran aplicación anual de los fertilizantes fosforados en la agricultura de altos insumos y a la acumulación paulatina del fósforo en el suelo debido a su poca

movilidad. Por lo general, el comportamiento irregular de las gráficas  $MO_r^{2000}$ ,  $pH_r^{2000}$ ,  $P_r^{2000}$  y  $K_r^{2000}$  en función del  $IHT_v^{2000}$  en las Figuras 5 y 6, se justifica por la variación en cantidad y tipos de fertilizantes aplicados en los diferentes distritos de riego.

Las gráficas en las Figuras 5 y 6 fueron utilizadas para calcular el índice integral de fertilidad de suelos vírgenes ( $F_v^{2000}$ ), agrícolas de temporal ( $F_t^{2000}$ ) e irrigados ( $F_r^{2000}$ ). En la Figura 7, se presenta la gráfica del cambio de los valores modales regionales de  $F_v^{2000}$ ,  $F_t^{2000}$  y  $F_r^{2000}$  en función del  $IHT_v^{2000}$ . Estas gráficas son similares en su forma a las gráficas de dependencia de la cantidad de materia orgánica en función de  $IHT_v^{2000}$ , lo que se explica por razón del mayor peso de la materia orgánica en el índice de fertilidad en comparación con otros componentes de este índice (ver la Ecuación 12).

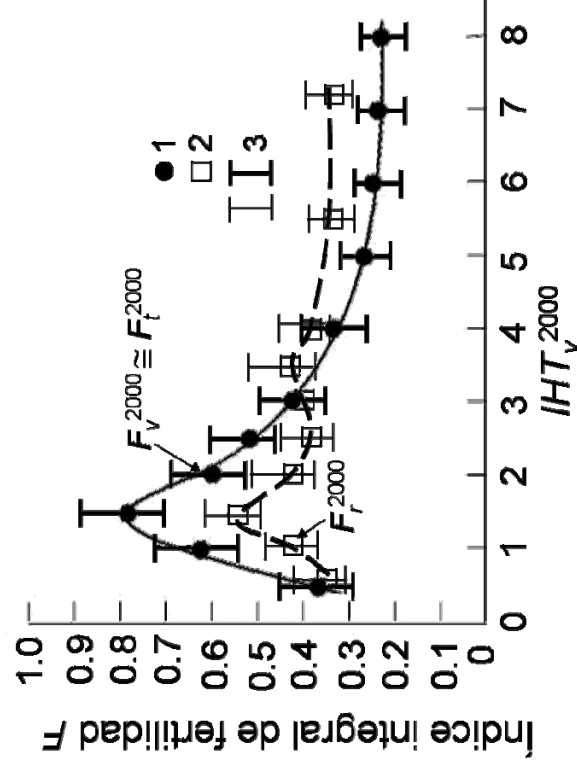


Figura 7. Dependencia del índice integral de fertilidad  $F_v^{2000}$  de suelos agrícolas vírgenes y de temporal y  $F_r^{2000}$  de suelos irrigados, ambos ubicados en los terrenos con pendientes menores 3% en altitudes de 0 a 2500 m en función del  $IHT_v^{2000}$  al inicio del siglo XXI

Los suelos de los terrenos vírgenes y agrícolas de temporal más fértiles en México, se encuentran en las zonas con clima semihúmedo, donde la precipitación promedio anual es alrededor de 1300 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 índice de fertilidad varían de 0.23-0.4 en las zonas áridas donde  $IHT_v^{2000} > 3$  y de 0.35-0.4 en las zonas húmedas donde  $IHT_v^{2000} < 0.75$ . Los suelos regados son un poco más fértiles que los suelos de temporal en las zonas áridas donde  $IHT_v^{2000} > 3$  y menos fértiles que los suelos de temporal en las zonas semiáridas y húmedas donde  $IHT_v^{2000} < 3$ . Los suelos regados más fértiles se ubican en las zonas áridas donde  $3 < IHT_v^{2000} < 4$ . En comparación con los suelos de temporal, la fertilidad de los suelos regados no depende mucho del cambio del índice  $IHT_v^{2000}$ . La ausencia de regularidad en dependencia de los valores modales de las mismas propiedades de los suelos irrigados del índice climático  $IHT^{2000}$ , se puede explicar por la alteración de la actividad agrícola e incorporación al suelo de grandes dosis de fertilizantes, 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 ó de temporal a 0.30 en las zonas áridas y semiáridas bajo riego donde  $IHT_r^{2000} > 4$ . En estas zonas se puede observar que la práctica de riego de maíz y trigo mejora la fertilidad de los suelos irrigados. El índice de fertilidad de estos suelos en estas zonas es  $F_r^{2000} \cong 0.35$  lo que es mayor que de los suelos vírgenes y de temporal ( $F_v^{2000} \cong F_v^{2000} = 0.25$  a 0.30). En las zonas subhúmedas y tropicales húmedas del país donde  $IHT_r^{2000} < 2.5$ , el índice de fertilidad es significativamente menor (0.55-0.33) que de los suelos vírgenes y de temporal, lo que significa un impacto negativo de las prácticas de riego de maíz y trigo sobre el suelo.

Analizando las gráficas  $F_v^{2000}(IHT_r^{2000})$  y  $F_v^{2000}(IHT_r^{2000})$  se puede concluir que los suelos vírgenes y agrícolas de temporal y de riego 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  $0 < IHT_r^{2000} < 2.5$ .

#### 5.4. Evaluación del cambio del índice integral de fertilidad por el cambio climático

Las gráficas  $F_v^{2000}(IHT_v^{2000})$  y  $F_r^{2000}(IHT_r^{2000})$  en la Figura 7, se han utilizado para evaluar los cambios en la fertilidad de los suelos agrícolas bajo riego de México debido al cambio climático global. Con la ecuación (27) se han calculado los índices de fertilidad  $F_r^{2100}$  correspondientes a las nuevas condiciones climáticas con el índice  $IHT_v^{2000}$  a finales del siglo XXI. En los Cuadros 8, 9 y 10 se presentan los resultados de comparación de los índices adimensionales de fertilidad del suelo irrigado al inicio ( $F_r^{2000}$ ) y final ( $F_r^{2100}$ ) del siglo XXI, así como valores de cambio relativo de este índice:  $\Delta F_r = (F_r^{2100} - F_r^{2000})/F_r^{2000}$  (%). Se han utilizado los escenarios climáticos en caso de duplicación del contenido de bióxido de carbono al final del siglo XXI según los modelos de circulación atmosférica GFDL-R30 y CCC.

**Cuadro 8.** Cambio del índice de fertilidad de los suelos irrigados con producción de maíz de grano en el ciclo PV según el escenario climático de los modelos GFDL-R30 y CCC

DISTRITO DE RIEGO	ESTADO	$IHT_r^{2000}$	$IHT_r^{2100}$		$F_r^{2000}$	$F_r^{2100}$		$\Delta F_r$ (%)	
			GFDL-R30	CCC		GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC
004 Don Martín	N.L.	0.98	1.04	1.05	0.44	0.49	0.39	11.22	-10.42
010 Culiacán-Humaya-San Lorenzo	Sin.	1.16	1.55	1.29	0.46	0.46	0.46	0.00	0.00
011 Alto Río Lerma	Gto.	1.26	1.45	1.46	0.49	0.49	0.48	0.86	-0.86
014 Río Colorado	B.C.N	0.83	1.12	0.83	0.38	0.38	0.38	0.00	0.00
034 Estado de Zacatecas	Zac.	0.98	1.00	1.05	0.44	0.44	0.44	0.00	0.00
48 Ticul	Yuc.	0.65	0.66	0.60	0.34	0.33	0.42	-3.11	24.89
066 Santo Domingo	B.C.S	1.48	2.35	2.05	0.55	0.55	0.55	0.00	0.00
076 Valle del Carrizo	Sin.	1.04	1.25	1.05	0.44	0.44	0.44	0.00	0.00
89 El Carmen Chihuahua	Chih.	0.77	0.90	0.73	0.36	0.37	0.40	3.92	13.71

Nota:  $\Delta F_r = (F_r^{2100} - F_r^{2000})/F_r^{2000}$

**Cuadro 9.** Cambio del índice de fertilidad de los suelos irrigados con producción de maíz de grano en el ciclo *O1* según el escenario climático de los modelos *GFDL-R30* y *CCC*

DISTRITO DE RIEGO	ESTADO	$IHT_r^{2000}$		$F_r^{2000}$	$F_r^{2100}$		$\Delta F_r$ (%)	
		<i>GFDL-R30</i>	<i>CCC</i>		<i>GFDL-R30</i>	<i>CCC</i>	<i>GFDL-R30</i>	<i>CCC</i>
010 Culiacan-Humaya-San Lorenzo	Sin.	1.0842	1.2529	0.45	0.45	0.45	0.00	0.00
011 Alto Río Lerma	Gto.	0.7728	0.7580	0.39	0.39	0.39	0.00	0.00
034 Estado de Zacatecas	Zac.	0.8111	0.8093	0.38	0.38	0.38	0.00	0.00
063 Guasave	Sin.	0.9639	1.1609	0.44	0.44	0.44	0.00	0.00
075 Río Fuerte	Sin.	0.8812	1.0036	0.39	0.39	0.39	0.00	0.00
076 Valle del Carrizo	Sin.	0.8568	1.0427	0.39	0.39	0.39	0.00	0.00

Nota:  $\Delta F_r = (F_r^{2100} - F_r^{2000}) / F_r^{2000}$

**Cuadro 10.** Cambio del índice de fertilidad de los suelos irrigados con producción de trigo en el ciclo *O1* según el escenario climático de los modelos *GFDL-R30* y *CCC*

DISTRITO DE RIEGO	ESTADO	$IHT_r^{2000}$		$F_r^{2000}$	$F_r^{2100}$		$\Delta F_r$ (%)	
		<i>GFDL-R30</i>	<i>CCC</i>		<i>GFDL-R30</i>	<i>CCC</i>	<i>GFDL-R30</i>	<i>CCC</i>
004 Don Martín	B.C.N	0.7022	0.8066	0.35	0.31	0.32	-10.07	-8.06
011 Alto Río Lerma	Gto.	0.8276	0.9035	0.38	0.39	0.38	1.48	0.00
013 Estado de Jalisco	Jal.	0.9122	0.8593	0.40	0.40	0.40	0.00	0.00
017 Región Lagunera	Coah. - Dgo.	0.7812	0.7765	0.37	0.37	0.37	0.00	0.00
034 Estado de Zacatecas	Zac.	0.4966	0.5123	0.34	0.34	0.34	0.00	0.00
052 Estado de Durango	Dgo.	0.4804	0.4838	0.33	0.32	0.32	-1.71	-1.71
063 Guasave	Sin.	0.6421	0.8466	0.34	0.34	0.34	0.00	0.00
066 Santo Domingo	B.C.S	1.0983	1.3041	0.46	0.46	0.46	0.00	0.00
075 Río Fuerte	Sin.	0.6664	0.8750	0.34	0.34	0.34	0.00	0.00
076 Valle del Carrizo	Sin.	0.9332	1.3240	0.42	0.42	0.42	0.00	0.00

Nota:  $\Delta F_r = (F_r^{2100} - F_r^{2000}) / F_r^{2000}$

Como se ve en los Cuadros de 8 a 10 el rango de cambio del índice fertilidad ( $\Delta F_r$ ) está dentro del intervalo de -10 hasta + 24%. Por lo general, esto significa que la mayoría de los cambios del índice de fertilidad de los suelos irrigados es poco insignificativa. En estos cuadros predominan los valores de cero, que aparentemente reflejan la inexistencia de cambios en la fertilidad del suelo. Esta conclusión es contradictoria a los resultados del análisis similar hecho para los terrenos con producción de maíz de grano y trigo de temporal, donde se ha concluido la importancia de considerar el cambio del índice de fertilidad en las estimaciones de la vulnerabilidad de los cultivos agrícolas al cambio climático (Castillo, *et al.*, 2007). Nuestra conclusión aplicada a los terrenos irrigados es preliminar y se explica por la siguiente razón:

- Relativamente débil dependencia  $F_r^{2000}(IHT_V^{2000})$  en comparación con la relación  $F_V^{2000}(IHT_V^{2000})$ ;
- Ciertas dificultades en estimación del índice  $F_r^{2100}$  para los valores de  $IHT_V^{2100} > 8$ .

Los valores de  $IHT_V^{2100}$  en la Figura 7 se encuentran en el rango de 0 a 8 y debido a la tendencia asintótica de la curva, los valores de  $F_r^{2100}$  para  $IHT_V^{2100}$  mayores a 8 tienden a ser constantes. En este trabajo este problema se resolvió al asignarle el valor de  $F_r^{2100}$  igual a 0.23 para los  $IHT_V^{2100}$  mayores a 8. Por lo anterior, el cambio de  $F_r^{2000}$  a  $F_r^{2100}$  prácticamente es cero.

### 5.5. Estimación de la vulnerabilidad de maíz y trigo al cambio climático

La estimación de la vulnerabilidad del maíz y trigo de riego con alto nivel de insumos se realizó a través del cálculo de los rendimientos promedio anuales a principios ( $Y^{2000}$ ) y finales de siglo XXI ( $Y^{2100}$ ), para algunas estaciones meteorológicas ubicadas dentro de los distritos de riego de México representativos de las zonas productoras de maíz y trigo.

Para verificar si los cálculos de los rendimientos eran confiables ó no, en la Figura 8 los rendimientos medios reales de maíz y trigo  $Y_{real}$  producidos en los periodos PV y OI durante los últimos 15 años en los distritos de riego (CONAGUA, 1990-2005) se comparan con los rendimientos calculados para el mismo periodo utilizando la



información meteorológica y datos estimados de los componentes de la fórmula del cálculo del rendimiento  $Y_{calc}$ :  $Y_{max}$ ,  $K_{hidr}$  y  $F$ . Los valores de los rendimientos en la Figura 8 son adimensionales. Dentro de cada grupo de los rendimientos medidos y calculados para cada uno de los 15 años concretos (del 1990 al 2005) 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 para cada año se dividieron por los valores máximos medidos y calculados respectivamente. Los valores adimensionales de  $Y_{real} / Y_{real}^{max}$  y  $Y_{calc} / Y_{calc}^{max}$  se colocaron a la gráfica en la Figura 8.

Los distritos de riego de referencia se seleccionaron para abarcar diferentes zonas climáticas del país con mayor intervalo de cambio del  $IHT_V^{2000}$ .

El tratamiento estadístico de la relación  $Y_{calc} / Y_{calc}^{max}(Y_{real} / Y_{real}^{max})$  en la Figura 8a permitió obtener los coeficientes de correlación iguales a 0.26, 0.23 y 0.14 para maíz de los ciclos de primavera – verano y otoño – invierno y para trigo del ciclo otoño – invierno respectivamente.

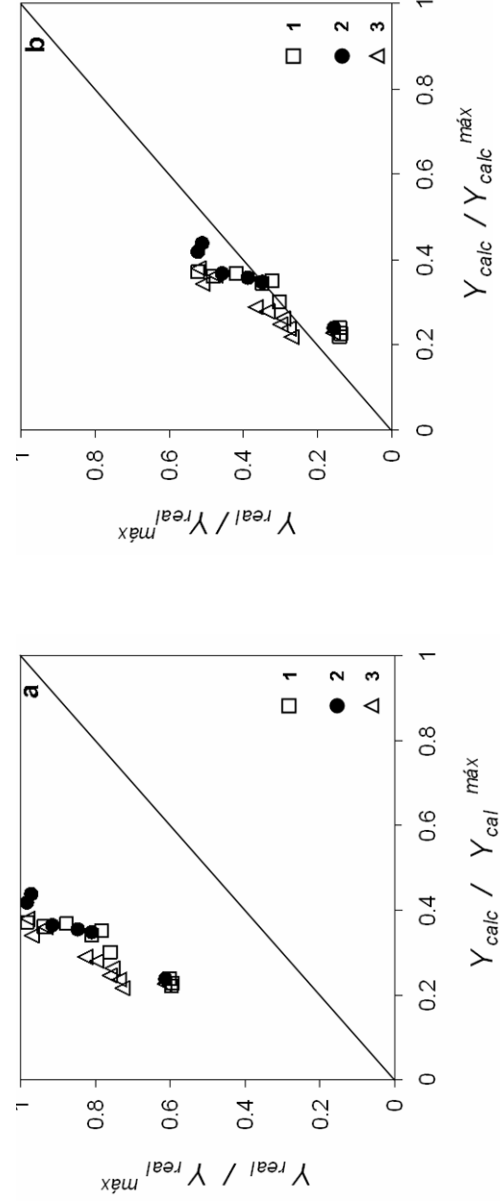


Figura 8. a - Comparación de los rendimientos de maíz de grano y trigo calculados ( $Y_{calc} / Y_{calc}^{max}$ ) y obtenidos en campo ( $Y_{real} / Y_{real}^{max}$ ) en algunos distritos de riego del país. Las cifras en la gráfica corresponden a los cultivos: 1 - maíz del ciclo primavera – verano; 2 - maíz del ciclo otoño – invierno; 3 - trigo del ciclo otoño – invierno. Maíz del ciclo primavera – verano fue calculado y producido en los distritos de riego: 4, 10, 11, 14, 34, 48, 66, 76 y 89; maíz del ciclo otoño – invierno en los distritos de riego: 10, 11, 34, 63, 75 y 76; trigo del ciclo otoño – invierno en los distritos de riego: 4, 11, 13, 17, 34, 52, 63, 66, 75 y 76. a – rendimientos calculados con el índice de fertilidad determinado con la fórmula (12) sin fertilizantes; b - rendimientos calculados con el índice de fertilidad determinado con fertilizantes.

Los coeficientes de correlación tan bajos se explican por la razón de que en los cálculos de los rendimientos se ha tomado en cuenta solamente el índice de fertilidad del suelo  $F$  antes de la siembra. En los terrenos agrícolas se aplican fertilizantes N y P principalmente. La aplicación de fertilizantes según (Pegov y Jomyakov, 1991) se puede considerar en la fórmula (12) de  $F$  así:

$$F = 0.32 \frac{MO}{MO_{max}} + 0.42 \sqrt[3]{\frac{N^{fert}}{N_{max}^{fert}} \frac{P + P^{fert}}{P_{max} + P_{max}^{fert}} \frac{K + K^{fert}}{K_{max} + K_{max}^{fert}}} + 0.26 e^{-\left(\frac{pH-7}{2}\right)^2}$$

Donde:  $N^{fert}$ ,  $P^{fert}$  y  $K^{fert}$  = las dosis promedio anuales de los fertilizantes de N, P y K aplicadas en los distritos de referencia para cada uno de los cultivos;  $N_{max}^{fert}$ ,  $P_{max}^{fert}$  y  $K_{max}^{fert}$ .

En la Figura 8b se presentan los rendimientos  $Y_{calc} / Y_{calc}^{max}$  calculados considerando las dosis promedio anuales de los fertilizantes. Los coeficientes de correlación salieron mucho mayores: 0.837, 0.863 y 0.752 para maíz de los ciclos de primavera – verano y otoño – invierno y para trigo del ciclo otoño – invierno respectivamente. Esto significa que los cálculos de los rendimientos de los mismos cultivos realizados en el presente trabajo son confiables.

Los cambios en la productividad  $\Delta Y$  se estimaron considerando las componentes de cambio individual (cambios en la productividad potencial ó biofísica, cambios en el balance hídrico agroclimático del agua en el suelo y cambios en la fertilidad de los suelos debidos al cambio climático global), previamente calculando la  $Y^{2100}$  con la fórmula 13.

Los escenarios climáticos utilizados para las estimaciones de cambios en la productividad fueron las salidas interpoladas de los modelos *GFDL-30* y *CCC*.

### 5.5.1 Estimación de la vulnerabilidad del maíz

Los cálculos de los cambios en la productividad de maíz se realizaron para 11 distritos de riego del país en los ciclos primavera – verano (PV) y otoño – invierno (O). En el Cuadro 11 se presentan los cambios esperados en las componentes del rendimiento ( $\Delta Y_{max}$ ,  $\Delta K_{hidr}$ ,  $\Delta F_r$  y  $\Delta Y$ ) del maíz bajo riego para el ciclo PV en caso de duplicación de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera al final del siglo XXI según los escenarios climáticos desarrollados con los modelos GFDL-R30 y CCC (Gay, 2003).

**Cuadro 11.** Escenarios de cambios en las componentes del rendimiento para maíz de grano del periodo PV al final del siglo XXI en caso de duplicación del contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

DISTRITO DE RIEGO	ESTADO	Cambio climático (Gay, 2003)							
		$\Delta Y_{max}$ (%)		$\Delta K_{hidr}$ (%)		$\Delta F_r$ (%)			
		GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC		
004 Don Martin	N.L	-0.29	-1.24	-5.3	-6.9	11.22	-10.42	6.8	-16.3
010 Culiacán-Humaya-San Lorenzo	Sin.	-3.89	-3.02	-25.0	-9.7	0.00	0.00	-27.9	-12.4
011 Alto Río Lerma	Gto.	-0.49	2.53	-13.0	-14.0	0.86	-0.86	-12.7	-12.6
014 Río Colorado	B.C.N	2.21	2.11	-24.7	0.2	0.00	0.00	-7.7	2.1
034 Estado de Zacatecas	Zac.	-0.20	1.10	-0.7	-6.2	0.00	0.00	-0.2	-3.8
48 Ticul	Yuc.	3.51	-0.39	-1.6	8.2	-3.11	24.89	0.3	-24.4
066 Santo Domingo	B.C.S	-2.61	-3.49	-36.7	-27.0	0.00	0.00	-38.3	-29.6
076 Valle del Carrizo	Sin.	6.59	7.00	-16.1	-0.8	0.00	0.00	-10.6	6.1
089 El Carmen chihuahua	Chih.	-2.36	-2.83	-14.8	5.4	3.92	13.71	1.5	10.5

Nota:  $\Delta Y_{max} = (Y_{max}^{2100} - Y_{max}^{2000})100/Y_{max}^{2000}$ ,  $\Delta K_{hidr} = (K_{hidr}^{2100} - K_{hidr}^{2000})100/K_{hidr}^{2000}$ ,  $\Delta F_r = (F_r^{2100} - F_r^{2000})100/F_r^{2000}$ ;  $\Delta Y = (Y^{2100} - Y^{2000})100/Y^{2000}$ . Los símbolos 2000 y 2100 corresponden al inicio y final del siglo XXI, respectivamente; GFDL-R30 y CCC son modelos de circulación general de la atmósfera.

El análisis de este cuadro señala que:

- Existe cierta congruencia entre el cambio esperado en los rendimientos potenciales ( $\Delta Y_{max}$ ) para los escenarios climáticos desarrollados con modelos *GFDL-R30* y *CCC*. Este cambio no es significativo y varía entre -4 y +7%.
- Hay una cierta diferencia entre los pronósticos del cambio del rendimiento final de maíz de grano ( $\Delta Y$ ) para los escenarios climáticos desarrollados con modelos *GFDL-R30* y *CCC*. Por lo general, los valores de  $\Delta Y$  varían entre -38 y +10%. En la mayoría de los sitios geográficos del país se espera disminución de la productividad de maíz de grano del periodo primavera – verano. La mayor pérdida de cosecha (hasta 38 y 27%) se espera en los distritos de riego 066 Santo Domingo y 010 Culiacán-Humaya-San Lorenzo respectivamente.
- La aportación del cambio del índice de fertilidad ( $\Delta F_r$ ) debido al cambio climático es relativamente pequeña: de -11 a +24%. El papel de cambio pronosticado del índice de fertilidad en los terrenos irrigados es significativamente menor que en los terrenos de temporal para el mismo cultivo donde el valor de  $\Delta F_r$  en México para los mismos escenarios climáticos fue estimado dentro del rango de -21 a +21% (Castillo, *et al.*, 2007).

En las Figuras 9 y 10 se presentan los mapas de distribución de los distritos de riego de referencia en México para los cuales se han hecho los pronósticos de cambio en la productividad de maíz de grano bajo riego del periodo primavera – verano en caso de duplicación del contenido de  $CO_2$  en la atmósfera.

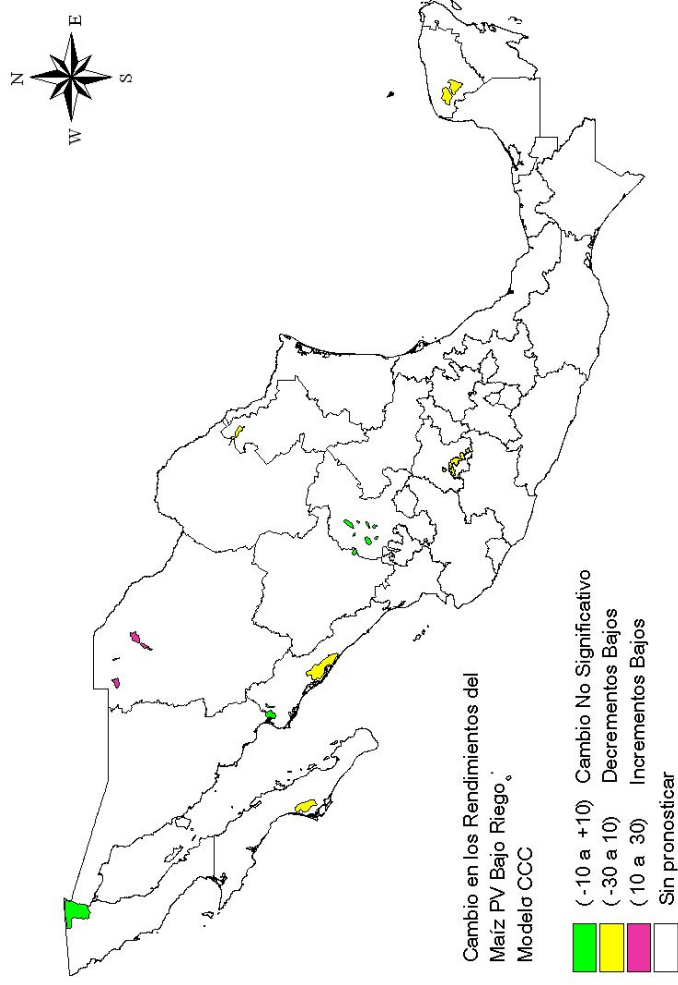


Figura 9. Cambio en la productividad de maíz de grano bajo riego del periodo primavera – verano (PV) en los distritos de riego de México al final del siglo XXI debido al escenario del cambio climático correspondiente al modelo climático CCC en caso de duplicación del contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

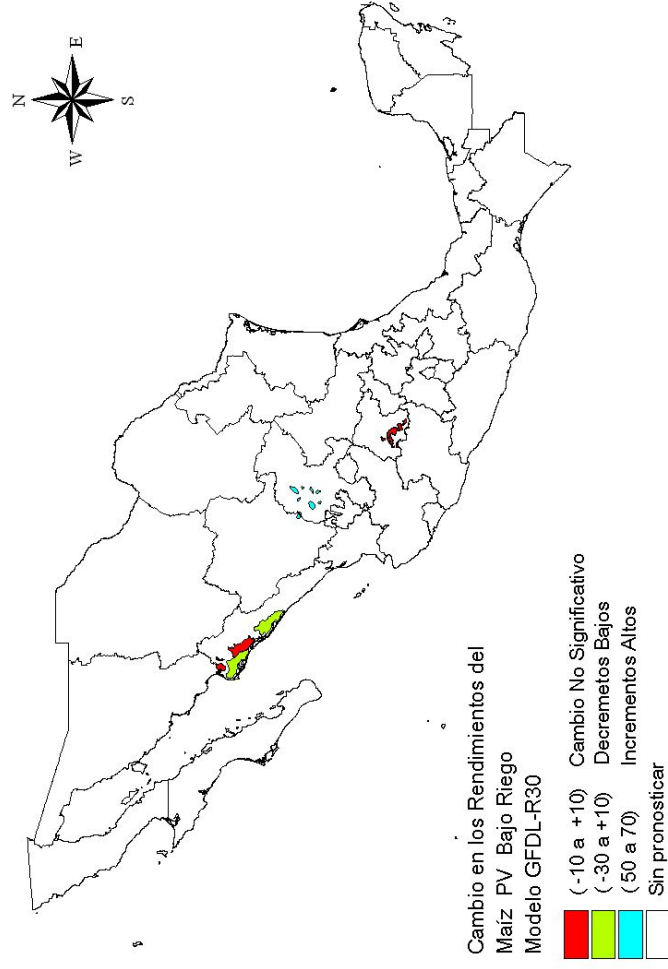


Figura 10. Cambio en la productividad de maíz de grano bajo riego del periodo primavera – verano (PV) en los distritos de riego de México al final del siglo XXI debido al escenario del cambio climático correspondiente al modelo climático GFDL-30 en caso de duplicación del contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

En el Cuadro 12 se presentan los resultados de los pronósticos de los cambios esperados en las componentes del rendimiento ( $\Delta Y_{max}$ ,  $\Delta K_{hidr}$ ,  $\Delta F_r$  y  $\Delta Y$ ) del maíz bajo riego para el ciclo otoño – invierno (O) en el caso de duplicación de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera al final del siglo XXI según los escenarios climáticos desarrollados con los modelos *GFDL-R30* y *CCC* (Gay, 2003).

**Cuadro 12.** Escenarios de cambios en las componentes del rendimiento para el maíz de grano del periodo O/ al final del siglo XXI en caso de duplicación del contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

DISTRITO DE RIEGO	ESTADO	Cambio climático (Gay, 2003)							
		$\Delta Y_{max}$ (%)		$\Delta K_{hidr}$ (%)		$\Delta F_r$ (%)			
		<i>GFDL-R30</i>	<i>CCC</i>	<i>GFDL-R30</i>	<i>CCC</i>	<i>GFDL-R30</i>	<i>CCC</i>		
010 Culiacan-Humaya-San Lorenzo	Sin.	-2.35	-2.14	-9.0	-13.3	0.00	0.00	-11.1	-15.1
011 Alto Río Lerma	Gto.	2.45	5.72	-24.4	2.0	0.00	0.00	0.7	5.7
034 Estado de Zacatecas	Zac.	68.57	65.17	-30.9	-31.3	0.00	0.00	68.6	65.2
063 Guasave	Sin.	-3.75	-3.65	-37.2	-49.0	0.00	0.00	-3.7	-17.0
075 Río Fuerte	Sin.	-12.78	12.14	-31.3	-46.4	0.00	0.00	-12.8	-12.1
076 Valle del Carrizo	Sin.	-2.43	-1.36	-40.1	-50.9	0.00	0.00	-2.4	-2.6

Nota:  $\Delta Y_{max} = (Y_{max}^{2100} - Y_{max}^{2000})/100/Y_{max}^{2000}$ ;  $\Delta K_{hidr} = (K_{hidr}^{2100} - K_{hidr}^{2000})/100/K_{hidr}^{2000}$ ;  $\Delta F_r = (F_r^{2100} - F_r^{2000})/100/F_r^{2000}$ ;  $\Delta Y = (Y^{2100} - Y^{2000})/100/Y^{2000}$ . Los símbolos 2000 y 2100 corresponden al inicio y final del siglo XXI, respectivamente; *GFDL-R30* y *CCC* son modelos de circulación general de la atmósfera.

El análisis de este cuadro señala que:

- Para el periodo otoño – invierno también existe cierta congruencia entre el cambio esperado en los rendimientos potenciales ( $\Delta Y_{max}$ ) para los escenarios climáticos desarrollados con modelos *GFDL-R30* y *CCC*. Este cambio es significativo y varía entre -13 y +69% lo que es mucho mayor que en el periodo primavera – verano (Cuadro 11).
- Hay una cierta congruencia (lo que es diferente al periodo primavera – verano) entre los pronósticos del cambio del rendimiento final del maíz de grano ( $\Delta Y$ ) para los escenarios climáticos desarrollados con modelos *GFDL-R30* y *CCC*. Por lo general, los valores de  $\Delta Y$  varían entre -17 a +69%.

Es decir que se esperan menores pérdidas de cosecha y significativamente mayores crecimientos de cosecha en comparación con el del periodo primavera – verano (hasta 60%, según el Cuadro 11). En la mayoría de los sitios geográficos del país (excepto los estados de Guanajuato y Zacatecas) se espera una disminución de la productividad del maíz de grano del periodo otoño - invierno. La mayor pérdida de cosecha (hasta 15 y 17%) se espera en los distritos de riego 010 Culiacán-Humaya-San Lorenzo y 063 Guasave respectivamente.

- El papel de cambio pronosticado del índice de fertilidad en los terrenos irrigados es insignificante ( $\Delta F_r \cong 0$ ).

La aportación principal al cambio del rendimiento de maíz de grano en sus dos ciclos ( $PV, OI$ ), corresponde al cambio del régimen hídrico del suelo ( $\Delta K_{hidr}$ ) debido a la disminución de precipitación, lo que en su momento causa disminución de la lámina de riego durante la estación del cultivo. El cambio de  $K_{hidr}$  en los terrenos irrigados en los sitios donde se ha pronosticado disminución en la precipitación y aumentos en la temperatura y la demanda del agua (o incremento del índice de aridez  $IHT$ ) es mayor que el cambio del  $K_{hidr}$  en los terrenos de temporal para las mismas regiones climáticas (Castillo, *et al.*, 2007).

En las Figuras 11 y 12 se presentan los mapas de distribución de los distritos de riego de referencia en México para los cuales se han hecho los pronósticos de cambio en la productividad de grano de maíz bajo riego del periodo otoño -invierno en caso de duplicación del contenido de  $CO_2$  en la atmósfera.

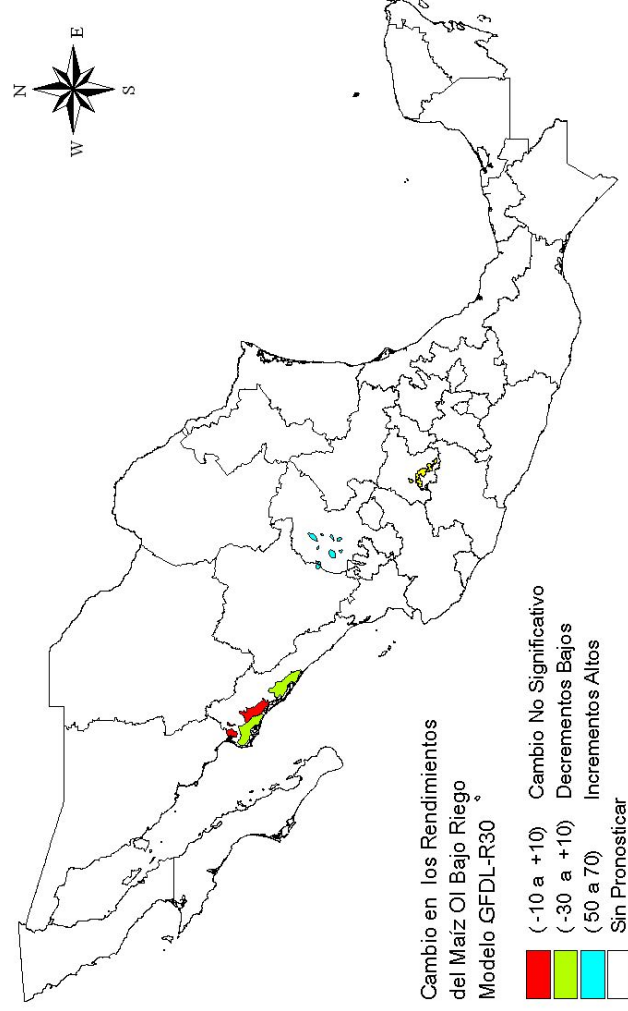


Figura 11. Cambio en la productividad de maíz de grano bajo riego del periodo otoño – invierno (O) en los distritos de riego de México al final del siglo XXI debido al escenario del cambio climático correspondiente al modelo climático GFDL-30 en caso de duplicación del contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

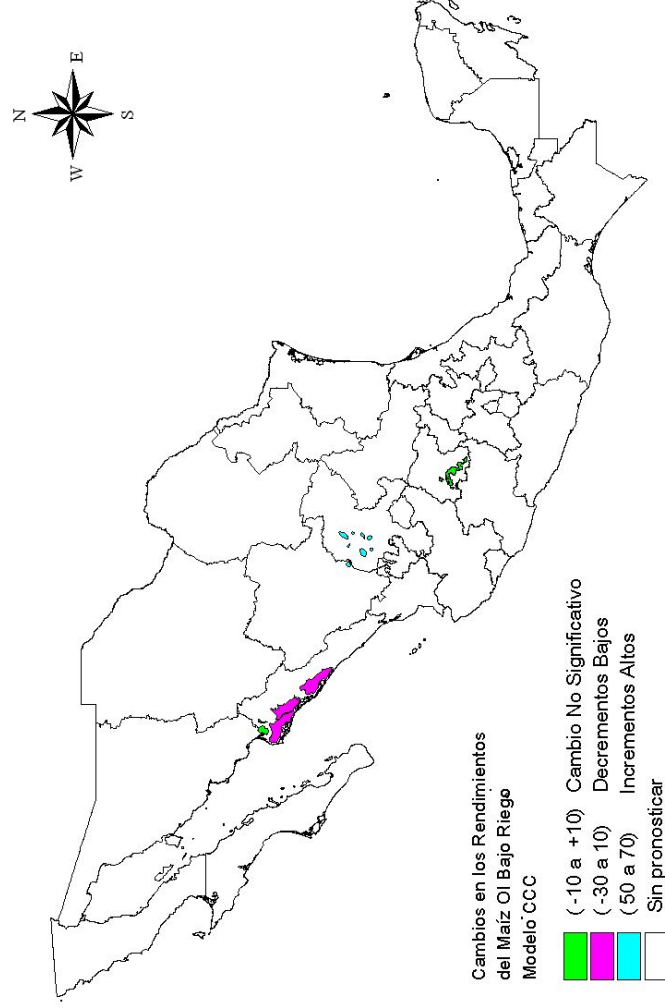


Figura 12. Cambio en la productividad de maíz de grano bajo riego del periodo otoño - invierno (O) en los distritos de riego de México al final del siglo XXI debido al escenario del cambio climático correspondiente al modelo climático CCC en caso de duplicación del contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.



### 5.5.2 Estimación de la vulnerabilidad del trigo

Los cálculos de los cambios en la productividad de grano de trigo se realizaron para el ciclo otoño – invierno en 10 distritos de riego. En el Cuadro 13 se presentan los cambios esperados en las componentes del rendimiento ( $\Delta Y_{max}$ ,  $\Delta K_{hidr}$ ,  $\Delta F_r$  y  $\Delta Y$ ) del maíz bajo riego para el ciclo PV en caso de duplicación de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera al final del siglo XXI según los escenarios climáticos desarrollados con los modelos GFDL-R30 y CCC (Gay, 2003).

**Cuadro 13.** Escenarios de cambios en las componentes del rendimiento para el trigo del periodo OI al final del siglo XXI en caso de duplicación del contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

DISTRITO DE RIEGO	ESTADO	Cambio climático (Gay, 2003)							
		$\Delta Y_{max}$ (%)		$\Delta K_{hidr}$ (%)		$\Delta F_r$ (%)		$\Delta Y$ (%)	
		GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC
004 Don Martín	B.C.N	5.02	2.50	-21.7	-13.0	-10.07	-8.06	-5.6	-5.8
011 Alto Río Lerma	Gto	5.22	10.04	-17.8	-8.4	1.48%	0.00	6.6	10.0
013 Estado de Jalisco	Jal.	15.39	16.84	-11.1	6.1	0.00%	0.00	13.1	16.8
017 Región Lagunera	Coah. - Dgo.	11.49	20.07	-4.6	0.9	0.00%	0.00	11.5	20.1
034 Estado de Zacatecas	Zac.	13.56	13.49	-1.4	-3.4	0.00%	0.00	13.6	13.5
052 Estado de Durango	Dgo.	5.70	7.36	-3.2	-0.6	-1.71%	-1.71	3.9	5.5
063 Guasave	Sin.	-4.21	0.55	3.1	-24.2	0.00%	0.00	-4.2	0.6
066 Santo Domingo	B.C.S	6.77	6.30	-12.5	-15.8	0.00%	0.00	-6.6	-10.5
075 Río Fuerte	Sin.	-4.74	-0.43	2.1	-23.8	0.00%	0.00	-4.7	-0.4
076 Valle del Carrizo	Sin.	0.00	3.42	-1.7	-29.1	0.00%	0.00	0.0	-20.6

Nota:  $\Delta Y_{max} = \frac{(Y_{max}^{2100} - Y_{max}^{2000})100}{Y_{max}^{2000}}$ ,  $\Delta K_{hidr} = \frac{(K_{hidr}^{2100} - K_{hidr}^{2000})100}{K_{hidr}^{2000}}$ ,  $\Delta F_r = (F_r^{2100} - F_r^{2000})100 / F_r^{2000}$ ,  $\Delta Y = (Y^{2100} - Y^{2000})100 / Y^{2000}$ . Los símbolos 2000 y 2100 corresponden al inicio y final del siglo XXI, respectivamente; GFDL-R30 y CCC son modelos de circulación general de la atmósfera.

El análisis de este cuadro señala que:

- Para el periodo otoño – invierno también existe cierta congruencia entre el cambio esperado en los rendimientos potenciales ( $\Delta Y_{max}$ ) para los escenarios climáticos desarrollados con modelos *GFDL-R30* y *CCC*. En la mayoría de los distritos de riego de referencia se espera crecimiento del rendimiento potencial (hasta 20%).
- Hay una cierta congruencia entre los pronósticos del cambio del rendimiento final del trigo ( $\Delta Y$ ) para los escenarios climáticos desarrollados con modelos *GFDL-R30* y *CCC*. Por lo general, los valores de  $\Delta Y$  varían entre -21 a + 20%. En la mayoría de los distritos de riego de referencia se espera crecimiento de la productividad de grano de trigo del periodo otoño – invierno (hasta 20%).
- Para este cultivo, la aportación principal al cambio del rendimiento de grano de trigo corresponde a la disminución del coeficiente hídrico  $K_{hidr}$  hasta 24% debido a la disminución de la precipitación, lo que en su momento causa disminución de la lámina de riego durante la estación del cultivo, y aumento de la demanda de agua (o crecimiento del índice de aridez *IHT*).
- La aportación del cambio del índice de fertilidad ( $\Delta F_f$ ) debido al cambio climático es insignificante: de -10 a +1.5%. Sin embargo, el papel de cambio pronosticado del índice de fertilidad en la mayoría de los distritos de riego analizados, es insignificante ( $\Delta F_f \cong 0$ ).

En las Figuras 13 y 14 se presentan los mapas de distribución de los distritos de riego de referencia en México para los cuales se han hecho los pronósticos de cambio en la productividad de grano de maíz bajo riego del periodo otoño-invierno en caso de duplicación del contenido de  $CO_2$  en la atmósfera.

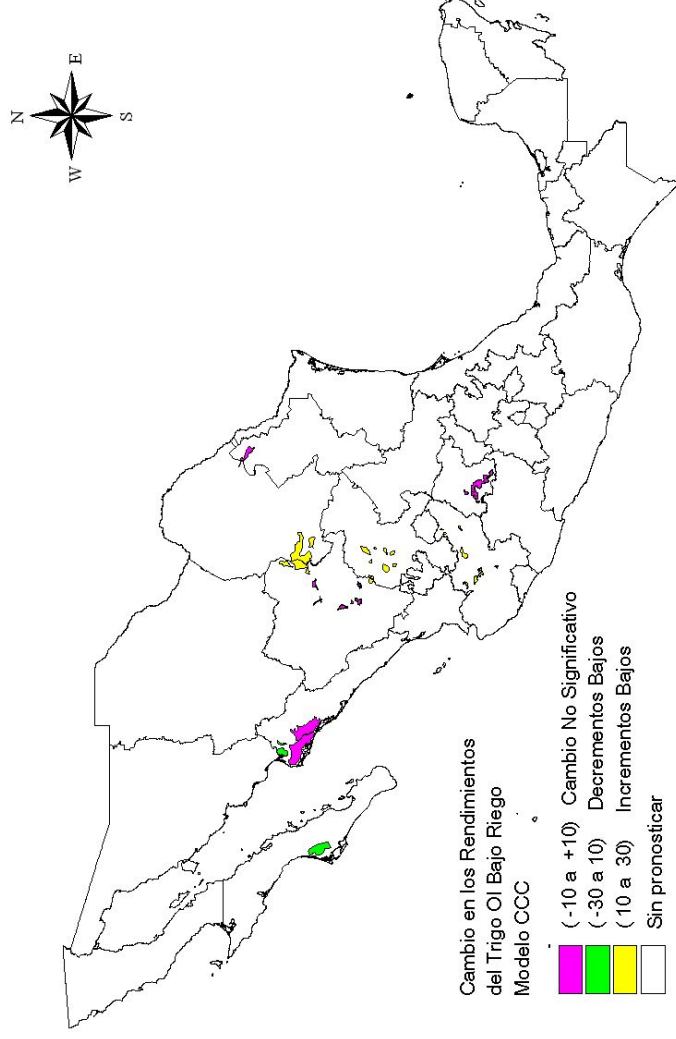


Figura 13. Cambio en la productividad del trigo bajo riego del periodo otoño - invierno (O) en los distritos de riego de México al final del siglo XXI debido al escenario del cambio climático correspondiente al modelo climático CCC en caso de duplicación del contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

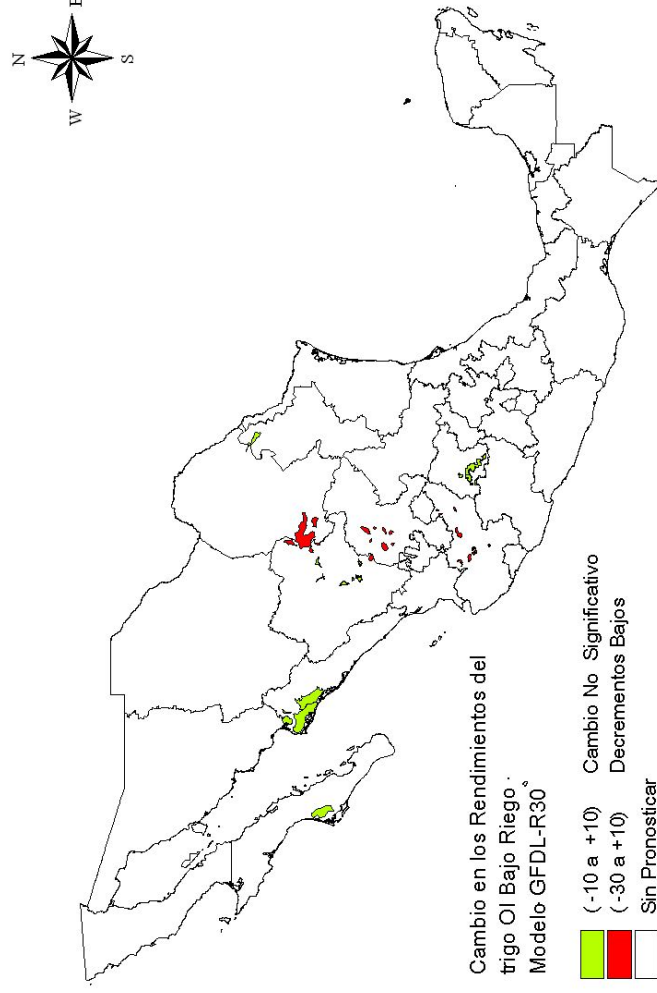


Figura 14. Cambio en la productividad del trigo bajo riego del periodo otoño - invierno (O) en los distritos de riego de México al final del siglo XXI debido al escenario del cambio climático correspondiente al modelo climático GFDL-30 en caso de duplicación del contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

Los resultados obtenidos en este trabajo relacionados con el pronóstico de la vulnerabilidad del maíz de grano y trigo bajo riego en México, tienen como punto de comparación los realizados por (Castillo, 2007) para los sitios de referencia de maíz y trigo de temporal en México. Ambos trabajos se han basado en una metodología útil para diferentes cultivos agrícolas recomendada por la FAO UNESCO y consideran el efecto de duplicación probable de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, así como los cambios en la radiación solar global y en la fertilidad de los suelos.

En el cuadro 14 se hace un análisis comparativo de resultados de estimación de vulnerabilidad del cultivo de maíz de temporal en México al cambio climático global pronosticado con los modelos *GFDL-R30* y *CCC*, en donde se muestran los resultados obtenidos del autor mencionados y los obtenidos en este trabajo.

**Cuadro 14.** Análisis comparativo de los resultados de estimación de vulnerabilidad del cultivo de maíz de riego con los escenarios climáticos al final del siglo XXI desarrollados por Castillo (2007) con los modelos climáticos *GFDL-R30* y *CCC* para dos zonas climáticas de México

Sitio	Castillo (2007) Anuales	Trabajo presente PV		Trabajo presente OI	
		<i>GFDL-R30</i>	<i>CCC</i>	<i>GFDL-R30</i>	<i>CCC</i>
Zonas áridas	463 kg·ha <sup>-1</sup>	-721 kg·ha <sup>-1</sup>	-345 kg ha <sup>-1</sup>	2,300 kg ha <sup>-1</sup>	2,000 kg ha <sup>-1</sup>
Zonas subtropicales	-392 kg·ha <sup>-1</sup>	-1300 kg ha <sup>-1</sup>	-57 kg ha <sup>-1</sup>	-310 kg ha <sup>-1</sup>	-460 kg ha <sup>-1</sup>

De acuerdo con los trabajos de Castillo (2007), la alteración en la fertilidad del suelo, puede causar cambios en los rendimientos hasta del 20% en áreas de temporal, afectando principalmente a las zonas subtropicales, lo que coincide con los resultados del presente trabajo.

## 6. CONCLUSIONES

- Se obtuvieron las relaciones cuantitativas actualizadas entre los valores modales para las propiedades de los suelos irrigados como  $MO$ ,  $P$ ,  $K$  y  $pH$ , y el índice hidrotérmico local ( $IHT_r$ ) para las condiciones climáticas promedio anuales al inicio del siglo XXI.
- Se comprobó la hipótesis de que el índice de aridez de Budyko ( $IHT$ ) se puede utilizar para pronosticar la alteración en la fertilidad de los suelos agrícolas bajo riego atribuible al cambio climático global.
- Se comprobó la funcionalidad de la metodología desarrollada por Castillo (2007), para evaluar la vulnerabilidad de los cultivos agrícolas de riego al cambio climático global durante el siglo XXI en México, considerando también el factor de alteración de la fertilidad de los suelos agrícolas bajo riego atribuible al mismo cambio climático, el cual prácticamente no se ha considerado en las investigaciones realizadas hasta el momento.
- Los suelos agrícolas más sensibles al cambio climático se ubican en las zonas climáticas húmedas, semihúmedas y semiáridas de México, donde el índice climático  $IHT^{2000} \leq 2.5$ .
- El deterioro de la fertilidad natural de los suelos bajo riego afectará negativamente la productividad de los terrenos agrícolas en algunos distritos de riego, causando una disminución en los rendimientos hasta de 38%, para el caso del distrito de riego 066 Santo Domingo en el estado de Baja California Sur, para el cultivo del maíz primavera-verano.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Acock, B. 1990. Effects of carbon dioxide on photosynthesis, plant growth, and other processes. *In*: Kimball BA, Rosenberg N, Allen LH (Eds.). Impact of carbon dioxide, trace gases, and climate change on global agriculture. ASA Special Publ. N° 53. 45-60 p.
- Akita, S. and D.N. Moss. 1973. Photosynthetic responses to CO<sub>2</sub> and light by maize and wheat leaves adjusted for constant stomatal apertures. *Crop Science*, 13:234-237.
- Allen, L. H. 1990. Plant responses to rising carbon dioxide and potential interactions with air pollutants. *Journal of Environmental Quality*. 19:15-34.
- Anthony, E.H., L.H. Ziska. 2000. Crop breeding strategies for the 21st century. *En*: Reddy KR, Hodges HF (Eds.). Climate change and global crop productivity. CABI. Nueva York, EEUU. 407-423 p.
- Arshad, M.A. y G.M. Coen. 1992. Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture* 7: 25-31.
- Aydarov, I.P. 1985. Manejo de los regímenes hídrico, salino y de nutrientes en suelos bajo riego. Ed. Agropromizdat, Moscú, URSS, 204 p. (en ruso)
- Bhatti, J.S., R. Lai, J.M. Apps, and M.A. Price. 2006. Climate change and managed ecosystems. CRC Pres. Taylor & Francis, 446 p.
- Boote, K.J., J.W. Jones, N.B. Pickering. 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal*, 88: 704-716.
- Budyko, M.I. 1974. Climate and life. Academia Press. New York. 508 p.
- Buol S.W., F.D. Hole, R.J. McCracken. 1989. Génesis y clasificación de suelos. Trillas. México. 287 p.
- Burman R, and L.O. Pochop. 1994. Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data. *Developments in Atmospheric Science* 22. Elsevier. Nueva York, EEUU. 278 p.
- Castillo A., M. 2007. Vulnerabilidad de la productividad agrícola de temporal al cambio climático global en México. Tesis de Doctorado en ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx., México.
- Castillo A., M. Nikolskii G., Ortiz S., Vaquera H., Cruz B. Mejía S. González H. 2007. Alteración de la fertilidad del suelo por el cambio climático y su efecto en la productividad agrícola. *Interciencia* 32: 368-376.

- Chang, C. C. 2002. The potential impact of climate change on Taiwan's agriculture. *Agric. Econ.* 27, 51–64.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 1990-2005. Estadísticas Agrícolas de los distritos de riego.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2008. Subgerencia de Distritos de Riego, Comunicación personal.
- Conde C.A.C., D. Liverman, M. Flores, R. Ma. Ferrer, R. Araújo. 1998. Vulnerability of rainfed maize in Mexico to climate change. *Climate Res.* 9: 17-23.
- Conde, C., R. M. Ferrer y D. Liverman. 2003. Estudio de la vulnerabilidad de la agricultura de maíz de temporal mediante el modelo Ceres - Maize. En: Gay C (Ed.). 2003. Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. UNAM. México. 220 p. <http://ccaunam.atmosfcu.unam.mx/cambio/libro.html>
- Contreras B., J. A. 2000. Estimación del índice hidrotérmico local (IHT) en la República Mexicana. Tesis de Maestría en Ciencias. Especialidad de Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. 59 p.
- Contreras B.A., G.I. Nikolskii, N.L. Aceves, R.R. Arteaga, M.M. Escalona, R.D. Fernández. 2002. Pronóstico del cambio en algunas propiedades de los suelos agrícolas al modificarse las condiciones microclimáticas. *Agrociencia* 36: 267-277.
- Cordero, E. (2008, Marzo 31). Tendencias y perspectivas del maíz y trigo en México. Maíz, trigo, sorgo y arroz, Granos básicos en México, situación actual y perspectivas. *Asia agro XXI* pp. 6-11.
- Crespo P., G. 2005. Programa de cómputo Normales Ver. 2.2. (Manejador de la base de datos climáticos: Normales Climatológicas 1951-1980. Servicio Meteorológico Nacional). Colegio de Postgraduados. [www.colpos.mx](http://www.colpos.mx)
- Cruz G., A. 2005. Relación del índice hidrotérmico local y las propiedades del suelo virgen de la República Mexicana para tres intervalos de pendientes. Tesis profesional. Departamento de Manejo de Recursos Naturales. Chapingo, México, México.
- Cure J.D., y B. Acock. 1986. Crop responses to carbon dioxide doubling: a literature survey. *Agricultural and Forest Meteorology*, 38: 127-145.
- De Santa Olalla M., F. M., P. López F. y A. Calera B. (Eds.). 2005. Agua y agronomía. Mundi-Prensa. España. 606 p.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2007. Plan Nacional de Desarrollo. Pag. 240

- Dokuchaev, V.V.1898. Estudio de zonas naturales. Las zonas horizontales y verticales. Sociedad Rusa de Naturalistas. Rusia (en ruso). 210 p.
- Doran, J. W. A., and T. B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. In: J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, and B. A. Stewart. (Eds.). Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. SSSA Spec. Pub. No. 35. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Driessen P. M., and N. T. Konijn. 1992. Land-use systems analysis. Wageningen Agricultural University. 6701 AR Wageningen The Netherlands. 230 p.
- FAO-IIASA. 2000. Global agroecological zones. Methodology and results of the Global Agro-Ecological Zones Model. CD-ROM. Versión: 1.0. <http://www.fao.org>
- Gay C (Ed.). 2003. Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. UNAM, México. 220 pp. <http://ccaunam.atmosfcu.unam.mx/cambio/libro.html>
- Gay, C., C. Conde, O. Sánchez. 2006a. Escenarios de Cambio Climático para México. Temperatura y Precipitación. [http://www.atmosfera.unam.mx/cambio/escenarios/escenarios\\_3A\\_mapas\\_y\\_datos.htm](http://www.atmosfera.unam.mx/cambio/escenarios/escenarios_3A_mapas_y_datos.htm)
- Gay, C., F. Estrada, C. Conde, H. Eakin y L. Villers. 2006b. Potential impacts of climate change on agriculture: a case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. *Climate Change*, 79:259-288.
- Grigoriev A.A. 1954. Zonificación geográfica de los recursos naturales y su aplicación. *Izvestia AN SSSR*, ser. Geogr. 5: 5-17 (en ruso).
- Halvorson, J. J., J. L Smith, and R. I. Papendick. 1996. Integration of multiple soil parameters to evaluate soil quality: a field example. *Biol. Fertil. Soils* 21:207-214.
- Hansen, J. 2004. El calentamiento global. *Investigación y Ciencia*. 332: 23-31.
- Hernández-Jiménez, A., M.O. Ascanio-García, M. Morales-Díaz, J.I. Bojórquez-Serrano, N.E. García-Calderón y J. D. García-Paredes. 2006. El suelo: Fundamentos sobre su formación, los cambios globales y su manejo. Universidad Autónoma de Nayarit. México. 255 p.
- Hulme, M. y N. Sheard. 1999. Climate change scenarios for Mesoamerica. *Climatic Research Unit. University of East Anglia, Norwich, UK*. 6 pág. <http://www.cru.uea.ac.uk>
- INEGI (Instituto Nacional de estadística Geografía e Informática). 2004. Información Nacional sobre Perfiles de Suelo. Ver. 1.2. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. 24 p.
- Ingram, J. 1996. The effects of Global Change on Soils. *Bulletin of the ISSS*. 90(2):63-65.



- IPCC, 2007a. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. www.ipcc.ch
- IPCC. 2001. Cambio climático. La base científica. Tercer informe de evaluación. OMM-PUMA, 83 p.
- IPCC. 2007b. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. Summary for Policymakers. Brussels, April 2007. 22 p.
- Kaufmann, R. and S. Snell. 1997. A biophysical model of corn yield: Integrating climatic and social determinants. American Journal of Agricultural Economics 79, 178–190
- Kimball, B.A., N.J. Rosenberg y L.H. Allen. (Eds.). 1990. Impact of carbon dioxide, trace gases, and climate change on global agriculture. ASA Special Publication Number 53. 133 p.
- Liverman, D.M., K.L. O'Brien. 1991. Global warming and climate change in Mexico. Global Env. Change 1: 351-364.
- Lobell, D. B., J. I. Ortiz-Monasterio, G. P. Asner, P. A. Matson, R. L. Naylor y W. P. Falcón. 2005. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. Field Crops Research 94:250-256.
- Magaña, V., C. Conde, O. Sánchez., C. Gay. 1997. Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico. Climate Res. 9: 107-114.
- Martin, D.L., J.R. Gilley, O.W. Baumer. 1993. Water requirements for irrigation. En National Engineering Handbook. Chapter 2, part 623 (section 15). USDA. Washington, EEUU. 405 p.
- Newton, P. C. D., R. Andre C., G. R. Edwards y P. A. Niklaus. 2007. Agroecosystems in a changing climate. CRC Taylor & Francis. New York. 364 p.
- Nikolskii G., I., O. Bakhtlaeva E., A. Contreras B., y Ch. V. Ordaz. 2001. Assessment of changes in soil properties as dependent on hydrotermic conditions of plowlands (by the example of Mexico). Eurasian Soil Science, 35: 1031-1036.
- Nikolskii Y.N., M. Castillo-Alvares y O.S. Bakhtlaeva. 2006. The Influence of the possible global climate change on the properties of Mexican soils. Eurasian Soil Science, 39 (11):1164-1169; etc.).

- Normales climatológicas de la República Mexicana [en línea: citado el 10 de diciembre de 2007]. Disponible para Internet <http://smn.cna.gob.mx/productos/productos.html>
- O'Brian, K. L. and R. M. Leichenko. 2000. Double Exposure: assessing the impacts of climate change within the context of economic globalization. *Global Environ. Change*. Elsevier Science 10: 221–232.
- Parry, M., 1993. Climate change and the future of Agriculture. *International Journal of Environment and Pollution*, Vol. 3, Nos. 1 - 3, pp. 13-30.
- Pegov, C.A., P.M. Jomyakov. 1991. Modelación del desarrollo de los sistemas ecológicos. *Gidrometeoizdat*. San Petersburgo, Rusia. 223 pp. (en ruso).
- Porter, J.H., M.L. Parry and T.R. Carter. 1991. The potential effects of climatic change on agricultural insects pests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 57:221-240.
- Ruelle, D. 1989. Chaotic evolution and strange attractors. *The statistical analysis of time series for deterministic nonlinear systems*. Cambridge University Press. Cambridge, RU. 96 pp.
- Sánchez-Espino, P., A. Larqué-Saavedra, T. Nava-Sánchez y C. Trejo. 2000. Respuesta de plantas de maíz y frijol al enriquecimiento de dióxido de carbono. *Agrociencia*, 34:311-320.
- Tetumo G., J. 1999. Pronóstico de los cambios en las propiedades de los suelos agrícolas bajo riego al modificarse las condiciones hidrotérmicas de su formación. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx., México.
- Tetumo G., J., I. Nikolskii G., C. Ortiz, S., L. Tijerina C, R. Arteaga R. 2001. Evaluación del impacto del riego sobre algunas propiedades de suelos a través del índice hidrotérmico. *Agrociencia* 35: 137-147.
- Vergara S., M.A., J. Etchevers B. 2004. Indicadores de calidad del suelo en laderas de la sierra norte de Oaxaca. En García-Mendoza AJ, Ordóñez MJ, Briones-Salas YM (Eds.). *Biodiversidad en Oaxaca*. Instituto de Biología, UNAM. México. pp. 585-602.
- Volobuev, V. R. 1974. Introducción a la energía de formación de suelos. *Nauka Publ.*, Moscú, URSS. 127 p. (en ruso).
- Young, A, 1994. Modelling changes in soil properties. En: *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. CABI. Bristol, RU. pp. 423-447.

## 8. ANEXOS

### ANEXO A

Pronósticos climáticos del Modelo de Circulación General (MCG): Geophysical Fluids Dynamics Laboratory (GFDL-R30)

Cambio la temperatura mensual por región (°C)												
Región	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1	4.1	3.8	4.4	3.0	3.3	3.5	2.8	2.7	3.3	3.6	2.7	3.2
2	3.9	3.5	4.1	2.6	2.6	2.9	2.2	2.0	2.5	2.8	2.7	3.6
3	4.3	3.9	5.5	4.0	4.0	3.5	3.3	2.2	2.8	3.8	3.4	3.5
4	4.1	3.7	5.0	3.6	3.3	3.1	2.4	2.0	2.5	3.2	3.2	3.5
5	4.1	4.0	5.6	4.8	4.2	3.4	3.0	1.9	2.6	3.8	3.6	3.5
6	3.8	3.8	4.7	4.0	3.2	2.8	2.6	2.0	2.6	3.1	3.5	3.6
7	3.4	4.1	4.4	4.7	3.5	2.9	3.2	2.4	3.0	3.2	3.7	4.1
8	2.9	3.7	3.6	3.7	3.0	2.7	3.2	2.9	3.2	3.0	3.6	4.0
9	3.9	3.6	4.0	2.9	2.5	2.5	2.0	2.2	2.4	2.7	2.7	3.7
10	3.7	3.3	3.5	2.7	2.4	2.6	2.2	2.3	2.5	2.7	2.5	3.7
11	3.6	3.3	3.7	3.1	2.5	2.6	2.2	2.4	2.6	2.7	2.7	3.8
12	2.9	3.1	3.3	3.1	2.3	2.7	2.4	2.5	2.7	2.6	0.7	3.5
13	2.7	2.9	3.2	3.0	2.1	2.6	2.4	2.4	2.6	2.5	2.5	3.3
14	2.6	3.2	3.2	3.2	2.5	2.7	2.8	3.0	3.1	2.9	3.2	3.5
15	2.3	2.9	2.9	2.4	2.1	2.5	2.6	2.4	2.6	2.6	2.5	2.9
16	2.2	2.8	2.7	2.0	2.1	2.4	2.6	2.3	2.5	2.6	2.5	2.7
17	2.1	2.9	2.6	1.5	2.3	2.5	2.8	2.4	2.5	2.7	2.8	2.6
18	2.4	3.3	2.6	1.2	2.9	2.4	3.3	2.8	3.0	2.9	2.9	2.7

Cambio en la precipitación mensual por región (razón de cambio)												
Región	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1	0.7	0.7	1.1	0.8	1.1	1.1	1.3	1.6	2.7	0.5	0.8	1.0
2	0.9	0.5	0.8	1.0	2.0	1.0	1.5	1.4	1.5	0.9	1.0	1.0
3	0.8	0.8	1.0	0.9	1.3	0.8	1.1	1.8	1.1	0.9	0.9	1.2
4	0.9	0.7	0.9	1.0	1.5	0.8	1.3	1.6	1.3	1.0	1.1	1.2
5	0.8	0.7	0.9	0.9	1.3	0.6	1.2	1.8	1.0	1.3	1.0	1.3
6	1.0	0.8	1.0	0.9	1.3	0.9	1.3	1.5	1.2	1.1	1.3	1.1
7	1.0	0.9	0.9	0.8	1.0	0.8	1.3	1.6	1.1	1.3	1.2	1.1
8	1.1	1.0	1.1	0.9	1.1	1.0	1.3	1.4	1.2	1.1	1.2	1.0
9	1.1	0.8	1.1	1.1	1.4	1.2	1.4	1.3	1.3	1.0	1.3	0.9
10	1.2	0.8	1.1	1.1	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.1	1.3	0.8
11	1.3	0.9	1.3	1.1	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.0	1.2	1.0
12	1.5	0.9	1.3	1.1	1.1	1.4	1.2	1.3	1.3	1.1	1.2	1.1
13	1.6	0.8	1.2	1.0	1.0	1.5	1.1	1.3	1.4	1.2	1.1	1.1
14	1.4	0.9	1.3	1.0	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.0	1.2	1.1
15	1.6	0.8	1.2	1.0	0.9	1.5	1.0	1.3	1.5	1.3	1.1	1.2
16	1.6	0.9	1.2	1.0	0.9	1.5	0.9	1.2	1.7	1.6	1.2	1.3
17	1.5	1.0	1.3	1.1	0.9	1.3	0.8	1.1	1.7	1.5	1.4	1.4
18	0.9	0.8	1.3	1.3	1.1	1.0	0.6	1.0	1.4	1.1	1.2	1.1

Cambio en la radiación mensual por región (razón de cambio)												
Región	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1
3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
4	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
5	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.1	1.0
6	1.1	1.1	1.1	1.0	0.9	1.1	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
7	1.1	1.1	1.1	1.3	1.1	1.1	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0
8	1.1	1.2	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0	0.9	1.0	1.0	0.8	1.0
9	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
10	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1
11	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
12	0.9	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
13	0.9	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
14	0.9	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0
15	0.9	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
16	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	1.1	1.1	1.0	0.9	1.0	0.9
17	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9
18	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9

## ANEXO B

Pronósticos climáticos el Modelo de Circulación General (MCG): Modelo del Centro Climático del Servicio Meteorológico de Canadá (CCC).

Cambio de la temperatura mensual por región (°C)												
Región	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agosto.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1	3.5	3.7	3.7	3.5	3.3	3.2	3.4	3.3	3.0	3.0	3.2	3.3
2	2.5	2.5	2.7	2.7	2.6	2.6	2.7	2.7	2.6	2.4	2.4	2.4
3	2.2	2.8	3.1	3.2	3.3	2.5	3.3	2.9	2.6	3.4	2.9	2.4
4	2.2	3.0	3.4	3.3	3.7	2.5	3.4	3.1	2.6	3.3	3.0	2.5
5	2.1	3.7	4.3	4.2	4.7	2.9	4.2	3.7	3.0	4.0	3.5	2.7
6	1.4	2.6	2.8	3.0	3.5	2.3	2.6	2.8	2.6	3.2	2.9	2.2
7	2.2	3.6	3.2	3.4	3.2	2.4	2.6	3.0	3.0	3.7	2.8	2.3
8	1.9	2.2	2.1	2.4	2.3	2.1	2.0	2.1	2.2	2.7	2.4	2.0
9	1.8	1.9	2.1	2.2	2.3	2.0	2.2	2.4	2.3	2.3	2.2	1.9
10	1.8	1.9	2.0	2.1	2.1	2.0	2.1	2.3	2.3	2.2	2.1	1.9
11	1.7	1.9	2.0	2.3	2.2	1.9	2.1	2.3	2.3	2.5	2.2	1.8
12	1.5	1.8	1.8	2.4	2.2	1.7	1.9	2.2	2.3	2.6	2.2	1.7
13	1.6	1.7	1.7	2.2	2.1	1.7	1.9	2.1	2.2	2.5	2.2	1.7
14	1.5	1.9	2.0	2.7	2.4	1.8	2.0	2.3	2.4	2.9	2.3	1.7
15	1.6	1.8	1.7	2.1	2.1	1.8	1.9	2.1	2.1	2.4	2.3	1.9
16	1.8	2.0	1.8	2.1	2.1	1.9	2.0	2.2	2.2	2.5	2.4	2.1
17	1.9	2.2	1.9	2.3	2.2	2.0	2.1	2.3	2.3	2.6	2.4	2.2
18	1.8	2.0	1.8	2.1	2.1	2.0	2.0	1.9	2.0	2.3	2.4	2.1

Cambio en la precipitación mensual por región (razón de cambio)												
Región	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agosto.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1	0.6	1.0	1.0	1.4	1.0	1.6	1.2	1.1	1.8	0.6	0.6	0.4
2	0.9	0.8	0.7	0.8	1.1	1.7	1.4	1.1	1.6	1.0	1.1	0.6
3	0.5	1.1	0.9	1.3	1.6	1.3	0.9	1.0	1.2	0.9	0.7	0.4
4	0.5	0.9	0.7	0.9	1.5	1.2	0.9	1.0	1.2	1.4	0.9	0.5
5	0.5	1.0	0.7	1.1	1.6	1.1	0.7	0.9	1.0	1.4	0.9	0.4
6	0.5	0.8	0.7	0.7	1.5	0.9	0.7	0.9	1.0	1.9	1.0	0.7
7	0.5	0.9	0.8	1.0	0.9	0.8	0.6	0.9	0.9	1.6	1.2	0.7
8	0.5	0.8	0.8	1.3	1.0	0.8	0.7	0.9	0.9	1.5	1.0	0.7
9	0.6	0.9	0.7	0.8	1.4	1.0	0.8	1.1	0.9	1.3	0.8	1.2
10	0.7	1.0	0.7	1.0	1.3	1.0	0.8	1.0	0.9	1.2	0.8	1.0
11	0.7	1.0	0.7	1.1	1.3	0.9	0.7	1.0	0.8	1.3	0.8	1.0
12	0.8	0.9	0.8	1.3	1.2	0.8	0.6	1.0	0.7	1.2	0.9	0.9
13	0.9	0.9	0.9	1.4	1.1	0.7	0.6	0.9	0.7	1.2	1.0	0.9
14	0.7	0.8	0.8	1.3	1.2	0.8	0.7	1.0	0.7	1.2	0.9	0.8
15	0.9	0.9	1.0	1.3	1.0	0.7	0.7	0.9	0.7	1.3	1.1	1.0
16	1.0	1.0	1.1	1.3	0.9	0.7	0.6	0.9	0.8	1.4	1.2	1.2
17	0.9	1.1	1.0	1.2	0.8	0.7	0.7	1.0	0.8	1.5	1.4	1.4
18	1.4	1.4	1.0	1.5	0.8	0.8	1.0	1.1	0.9	1.4	1.3	1.4

Cambio en la radiación mensual por región (razón de cambio)												
Región	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0
3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0
5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0
6	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.1	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0
7	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0
8	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.1
9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0
10	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0
11	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.1	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0
12	1.1	1.0	1.1	1.0	0.9	1.0	1.1	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0
13	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.1	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0
14	1.1	1.0	1.1	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.1
15	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0
16	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0
17	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0
18	1.0	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0

## ANEXO C

### Fechas de siembra

#### Maíz ciclo primavera - verano

D.R	Siembra	Cosecha	Días	IC	IAF	Grupo
10	01/03/2008	30/09/2008	213	0.45	5.5	Tierras altas
11	01/02/2008	30/08/2008	180	0.45	5.5	Subtropical
14	01/05/2008	13/09/2008	135	0.45	4.5	Tierras bajas
34	15/04/2008	15/09/2008	150	0.45	4.5	Tierras altas
48	01/02/2008	31/05/2008	120	0.45	4.0	Tierras bajas
66	01/03/2008	01/09/2008	180	0.45	5.5	Tierras altas
76	01/02/2008	30/07/2008	180	0.45	5.5	Tierras altas
89	15/05/2008	15/11/2008	180	0.45	5.5	Tierras altas

D.R: Distritos de Riego

#### Maíz ciclo otoño - invierno

D.R	Siembra	Cosecha	Días	IC	IAF	Grupo
10	01/11/2008	30/06/2009	241	0.45	5.5	Tierras altas
11	01/12/2008	30/05/2009	180	0.45	5.5	Tierras altas
34	01/11/2008	01/06/2009	180	0.35	4	Tierras altas
63	01/11/2008	30/06/2009	227	0.45	5.5	Tierras altas
75	15/11/2008	15/05/2009	180	0.45	5.5	Tierras altas
76	01/11/2008	15/05/2009	198	0.45	5.5	Tierras altas

D.R: Distritos de Riego

#### Trigo ciclo otoño - invierno

D.R	Siembra	Cosecha	Días	IC	IAF	Grupo
4	20/12/2008	10/05/2009	150	0.5	5.5	Invierno
10	10/12/2008	01/05/2009	140	0.45	5	Invierno
11	01/11/2008	30/06/2009	241	0.5	5.5	Invierno
13	01/11/2008	15/05/2009	241	0.45	5.5	Invierno
17	01/12/2008	01/06/2009	182	0.5	5.5	Invierno
34	30/12/2008	30/06/2009	182	0.5	5.5	Invierno
52	20/12/2008	30/06/2009	192	0.5	5.5	Invierno
63	01/12/2008	30/04/2009	160	0.5	5.5	Invierno
66	01/12/2008	30/06/2009	180	0.5	5.5	Invierno
75	01/11/2008	30/04/2009	180	0.5	5.5	Invierno
76	01/12/2008	01/05/2009	151	0.45	5	Subtropical

## ANEXO D

Parámetros de Biomasa y producción FAO-IIASA (2000) para los cultivos de Maíz y Trigo

Cultivo	Ciclo del cultivo en días (GC)	Adaptabilidad		Índices	
		grupo	IC	IC	IAF
Trigo de Invierno	30+90	C3/I	0.45	4.5	4.5
Trigo de Invierno	35+105	C3/I	0.45	5	5
Trigo de Invierno	40+120	C3/I	0.5	5.5	5.5
Trigo de Invierno	45+135	C3/I	0.5	5.5	5.5
Trigo de Invierno	105	C3/I	0.4	3.5	3.5
Trigo de Invierno	120	C3/I	0.4	4	4
Trigo de Invierno	135	C3/I	0.4	4.5	4.5
Trigo de Invierno	150	C3/I	0.4	5	5
Trigo subtropical	105	C3/I	0.45	4	4
Trigo subtropical	120	C3/I	0.45	4.5	4.5
Trigo subtropical	135	C3/I	0.45	5	5
Trigo subtropical	150	C3/I	0.45	5	5
Trigo subtropical	100	C3/I	0.4	3.5	3.5
Trigo subtropical	130	C3/I	0.4	4.5	4.5
Trigo subtropical	160	C3/I	0.4	5	5
Trigo subtropical	190	C3/I	0.4	5	5



Cultivo	Ciclo del cultivo en días (GC)	Adaptabilidad		Índices	
		grupo	IC	IC	IAF
Maíz (grano) (tierras bajas)	90	C4/III	0.4	0.4	3
Maíz (grano) (tierras bajas)	105	C4/III	0.4	0.4	3.5
Maíz (grano) (tierras bajas)	120	C4/III	0.45	0.45	4
Maíz (grano) (tierras bajas)	135	C4/III	0.45	0.45	4.5
Maíz (grano) (tierras altas)	105	C4/IV	0.35	0.35	3.5
Maíz (grano) (tierras altas)	180	C4/IV	0.35	0.35	4
Maíz (grano) (tierras altas)	300	C4/IV	0.35	0.35	4
Maíz (grano) (subtropical)	105	C4/IV	0.4	0.4	3
Maíz (grano) (subtropical)	120	C4/IV	0.4	0.4	3.5
Maíz (grano) (subtropical)	135	C4/IV	0.45	0.45	4
Maíz (grano) (sub-tropical)	150	C4/IV	0.45	0.45	4.5
Maíz (grano) (subtropical)	165	C4/IV	0.45	0.45	5
Maíz (grano) (subtropical)	180	C4/IV	0.45	0.45	5.5

## ANEXO E

Distritos de riego y sus estaciones analizadas para el ciclo primavera – verano del cultivo de maíz bajo riego

D.R	Nombre	Estado	Latitud	Longitud
4	Don Martín	N.L	27.2300	-100.1500
10	Culiacán-Humaya-San Lorenzo	Sin.		
	Pericos, Mocorito		25.0700	-107.7000
	Quila Culiacán		24.4200	-107.2200
11	Alto Río Lerma	Gto.		
	Acámbaro, Acámbaro		20.0300	-100.7200
	El Sabino Salvatierra		20.2800	-101.0200
	Pericos Salamanca		20.5200	-101.1000
	Salvatierra		20.2000	-100.8800
	Santa Rita Jaral Del Progreso		20.2800	-101.0500
	Valle De Santiago		20.3800	-101.1800
	Pueblo Nuevo		20.5200	-101.3700
14	Río Colorado	B.C.N		
	Bataques Mexicali		32.5500	-115.0700
	Delta Mexicali		32.3500	-115.1800
	Colonia Juárez		32.3000	-115.0700
34	Estado de Zacatecas	Zac.		
	Cazadero, Río Grande		23.6700	-103.1200
	Río Grande, Río Grande		23.8300	-103.0300
	Santa Rosa Fresnillo		22.9300	-103.1200
	Súchil, Súchil		23.6200	-103.9200
48	Ticul	Yuc.	20.5000	-89.4200
66	Santo Domingo	B.C.S		
	Buenavista de Loreto		25.1200	-111.8200
	Villa Insurgentes		25.2300	-111.7700
76	Valle del Carrizo	Sin.		
	El Carrizo, Ahome		26.2700	-109.0300
	Las Estacas, el Fuerte		26.2700	-108.7800
	Llano de los López		26.3700	-108.7200
89	El Carmen	Chih.	30.6200	-106.5200

D.R: Distritos de Riego

Districts of irrigation and its seasons analyzed for the autumn cycle – winter of the maize crop

D.R	Nombre	Estado	Latitud	Longitud
10	Culiacán-Humaya-San Lorenzo Pericos, Mocerito Quila Culiacán	Sin.	25.0700 24.4200	-107.7000 -107.2200
11	Alto Río Lerma Acámbaro, Acámbaro El Sabino Salvatierra Pericos Salamanca Salvatierra Santa Rita Jaral Del Progreso Valle De Santiago Pueblo Nuevo	Gto.	20.0300 20.2800 20.5200 20.2000 20.2800 20.3800 20.5200	-100.7200 -101.0200 -101.1000 -100.8800 -101.0500 -101.1800 -101.3700
34	Estado de Zacatecas Cazadero, Río Grande Río Grande, Río Grande Santa Rosa Fresnillo Súchil, Súchil	Zac.	23.6700 23.8300 22.9300 23.6200 25.5800	-103.1200 -103.0300 -103.1200 -103.9200 -108.4700
63	Guasave	Sin.	25.5800	-108.4700
75	Río Fuerte Ahome, Ahome Corerepe, Corerepe Higuera de Zaragoza Juan José Ríos Guasave Mochicahui, el Fuerte Ruiz Cortines	Sin.	25.9000 25.6700 25.9500 25.7500 25.9700 25.7000 25.9300 25.9000	-109.1700 -108.6200 -109.3000 -108.8000 -108.9300 -108.7300 -109.0500 -108.7700
76	San Miguel Zapotitlán Santa Rosa, el Fuerte Valle del Carrizo El Carrizo, Ahome Las Estacas el Fuerte Llano de los López	Sin.	26.2700 26.2700 26.3700	-109.0300 -108.7800 -108.7200

D.R: Districts of Irrigation

Districtos de riego y sus estaciones analizadas para el ciclo otoño – invierno del cultivo de trigo bajo riego

D.R	Nombre	Estado	Latitud	Longitud
4	Don Martín	N.L	27.2300	-100.1500
11	Alto Río Lerma	Gto.		
	Acámbaro, Acámbaro		20.2800	-101.0200
	El Sabino Salvatierra		20.5200	-101.1000
	Pericos Salamanca		20.2000	-100.8800
	Salvatierra		20.2800	-101.0500
	Santa Rita Jaral Del Progreso		20.3800	-101.1800
	Valle De Santiago		20.5200	-101.3700
	Pueblo Nuevo		20.0300	-100.7200
13	Estado de Jalisco	Jal		
	Cuquío		20.9500	-103.0500
	Teocaltiche		21.4500	-102.5800
17	Región Lagunera	Coah. - Dgo.		
	Concordia San Pedro		25.7800	-103.1200
	Pres a Coyote Torreón		25.5300	-103.4700
	Pres a Guadalupe San Pedro		25.7500	-103.3000
	Pres a Cuije Matamoros		25.7000	-103.3000
	Viesca		25.3500	-102.8000
34	Estado de Zacatecas	Zac		
	Cazadero, Río Grande		23.6700	-103.1200
	Río Grande, Río Grande		23.8300	-103.0300
	Santa Rosa, Fresnillo		22.9300	-103.1200
	Súchil, Súchil		23.6200	-103.9200
52	Estado de Durango	Dgo.		
	Canatlán		24.5000	-104.7500
	Nazas		25.2300	-104.1200
63	Guasave	Sin.	25.5800	-108.4700
66	Santo Domingo			
	Buenavista de Loreto Comondo	B.C.S.	25.1200	-111.8200
	Villa Insurgentes Comondu		25.2300	-111.7700
75	Río Fuerte	Sin.		
	Ahome, Ahome		25.9000	-109.1700
	Corerepe, Corerepe		25.6700	-108.6200
	Higuera De Zaragoza		25.9500	-109.3000
	Juan José Ríos Guasave		25.7500	-108.8000
	Mochicahui El Fuerte		25.9700	-108.9300
	Ruiz Cortines		25.7000	-108.7300
	San Miguel Zapotitlán		25.9300	-109.0500
	Santa Rosa, el Fuerte		25.9000	-108.7700
76	Valle del Carrizo	Sin.		
	El Carrizo Ahome		26.2700	-109.0300
	Las Estacas el Fuerte		26.2700	-108.7800
	Llano de los López		26.3700	-108.7200

D.R: Districtos de Riego