



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**VULNERABILIDAD DE LA PRODUCTIVIDAD AGRÍCOLA
DE TEMPORAL AL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL EN
MÉXICO**

MARCIAL CASTILLO ÁLVAREZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

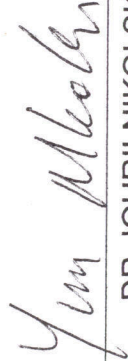
2007

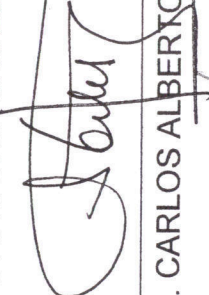
La presente tesis, titulada: **Vulnerabilidad de la Productividad Agrícola de Temporal al Cambio Climático Global en México**, realizada por el alumno: **Marcial Castillo Álvarez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS


CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:  _____
DR. IOURII NIKOLSKII GAVRILOV

ASESOR:  _____
DR. CARLOS ALBERTO ORTIZ SOLORIO

ASESOR:  _____
DR. HUMBERTO VAQUERA HUERTA

ASESOR:  _____
DR. ENRIQUE MEJÍA SÁENZ

ASESOR:  _____
DR. GUSTAVO MANUEL CRUZ BELLO

Montecillo, Texcoco, México, 5 de noviembre de 2007.

VULNERABILIDAD DE LA PRODUCTIVIDAD AGRÍCOLA DE TEMPORAL AL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL EN MÉXICO

Marcial Castillo Álvarez, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2007

RESUMEN

El cambio climático global que se espera durante el siglo XXI inevitablemente va a afectar la productividad de los terrenos agrícolas. Los pronósticos de vulnerabilidad del rendimiento de cultivos en relación con los escenarios existentes del cambio climático durante el siglo XXI se realizan, generalmente, sin considerar la alteración de la fertilidad del suelo atribuible al cambio climático. El objetivo del presente trabajo fue desarrollar una metodología para estimar el papel de ese factor en el pronóstico del cambio en la productividad del maíz (C4) y trigo (C3) de temporal en varias zonas de referencia de México, utilizando los pronósticos desarrollados por el Centro de Ciencias de la Atmósfera, de la Universidad Nacional Autónoma de México, para el escenario de duplicación del CO₂ en la atmósfera, al final del siglo XXI. 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 denominado índice hidrotérmico local. Se pronosticaron 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. Los resultados muestran 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 indican incrementos en el rendimiento hasta de 463 kg·ha⁻¹ en las zonas áridas y semiáridas, y disminuciones hasta de 392 kg·ha⁻¹ en las zonas húmedas y semi-húmedas, para el caso del maíz; y, en general, incrementos en la producción del trigo de hasta 1100 kg·ha⁻¹.

Palabras clave: Índice Hidrotérmico Local, Índice Integral de Fertilidad del Suelo, maíz, trigo.

VULNERABILITY OF RAINFED AGRICULTURAL PRODUCTIVITY IN MEXICO TO THE GLOBAL CLIMATIC CHANGE

Marcial Castillo Álvarez, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2007

ABSTRACT

The global climate change that is expected during XXI century inevitably should affect the agricultural crop productivity. The predictions of vulnerability of agricultural crops productivity in relation with existing scenarios of climate change during the 21st century are usually carried out without taking into account the alteration in soil fertility due to climate change. The goal of the present work is to assess the role of such factor in the rainfed maize (C4) and wheat (C3) productivities in different reference sites of Mexico, using the climate change scenarios developed by the Center for Atmospheric Sciences, Universidad Nacional Autónoma de México, for the case of atmospheric CO₂ doubling by the end of 21st century. The relationship between the integral soil fertility index F (for genetically homogeneous soils) and climatic index was established in order to assess the soil fertility alteration. The real and potential productivities of the crops, F index and water availability change were predicted. The soil fertility alteration can cause crop yield changes of up to 20%, which indicates its importance for crop productivity predictions. The results predict the growth of maize yield up to 463 kg·ha⁻¹ in arid and semiarid zones, and its reduction in up to 392 kg·ha⁻¹ in humid and semihumid zones. In the case of wheat it is expected, in general, a crop yield growth of up to 1100 kg·ha⁻¹.

Key words: Radiative Index of dryness, Integral soil fertility index, maize, wheat.

AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA (CONACYT)

Por el financiamiento otorgado para realizar mis
estudios de Doctorado 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. CARLOS ALBERTO ORTIZ SOLORIO

Por sus valiosas observaciones a este trabajo
y apreciables consejos para mi formación
profesional

AL DR. HUMBERTO VAQUERA HUERTA

Por las observaciones y contribuciones que hicieron
posible la elaboración del presente trabajo

AL DR. ENRIQUE MEJÍA SÁENZ

Por sus valiosas sugerencias durante el
proceso de investigación y apoyo incondicional

AL DR. GUSTAVO MANUEL CRUZ BELLO

Por su apoyo con equipo y programas de cómputo en el
Laboratorio de Geomática del CENID COMEF, INIFAP,
y por sus valiosas sugerencias a este trabajo

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);

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACh) y al Centro Regional Universitario del Sureste (CRUSE) que me dieron el tiempo necesario para lograr mi formación doctoral;

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

A mi familia que tanto apoyo me brindó en los momentos que más lo necesité. A mis hijos Marcial y Marcos y a mi esposa Emelia; a mis padres Marcos (+) y María.

A mis amigos:

Antonio González Hernández, por el apoyo con el manejo de los Sistemas de Información Geográfica.

José Alejandro Contreras Benítez, por su apoyo en la programación con Visual Basic del módulo de estimación de rendimientos máximos.

Edgar Bladimir Gutiérrez Castorena, Luciano Martínez Bolaños, Juan Ángel Álvarez Vázquez, Vicente y Nefy Bracamonte Carrillo y Martín Espinosa Ramírez por su amistad y apoyo siempre oportuno.

CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	5
2.1. Objetivo General.....	5
2.2. Objetivos Particulares.....	5
2.3. Hipótesis	6
3. REVISION DE LITERATURA	6
3.1. Pronósticos existentes del cambio climático en México.....	6
3.2. Métodos para pronosticar los rendimientos en función de los escenarios del cambio climático y algunos resultados de estos pronósticos para México.....	11
3.2.1. Efecto del cambio de clima.....	11
3.2.2. Efecto del incremento en la concentración del CO ₂ en la atmósfera.....	18
3.3. Métodos para considerar el cambio de fertilidad del suelo en función de los escenarios climáticos.....	19
3.4. Cálculo del índice integral de fertilidad del suelo.....	26
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
4.1. Materiales.....	30
4.2. Metodología.....	32
4.2.1. Selección de los cultivos y sitios de referencia para pronosticar los rendimientos.....	33
4.2.2. Pronóstico de los rendimientos de maíz y trigo.....	37
4.2.2.1. Cálculo del rendimiento potencial.....	39
4.2.2.2. Cálculo del índice hídrico.....	42
4.2.2.2.1. Cálculo de los componentes de la radiación neta promedio mensual.....	45
4.2.2.2.2. Estimación de la radiación global y del balance de radiación de onda larga promedio mensual.....	46
4.2.2.2.2.1 Estimación de la radiación solar global al final del siglo XX.....	47
4.2.2.2.2.2 Estimación de la radiación de onda larga al final del siglo XX.....	49
4.2.2.2.3. Determinación del albedo promedio anual para la vegetación natural típica para diferentes zonas climáticas de México.....	51
4.2.2.2.4. Interpolación de los valores anuales de radiación global, balance de radiación de onda larga, y precipitación.....	53
4.2.2.2.5. Cálculo del Índice Hidrotérmico Local.....	54

4.2.2.3. Evaluación del cambio del índice integral de fertilidad del suelo causado por el cambio climático	54
4.2.2.3.1. Tratamiento de los datos sobre algunas propiedades de los suelos vírgenes y agrícolas de temporal.....	55
4.2.2.3.2. Evaluación de la alteración de algunas propiedades del suelo y del índice integral de fertilidad por el cambio climático	58
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
5.1. Cambio del rendimiento potencial.....	63
5.1.1. Rendimiento potencial del cultivo de maíz de temporal.....	63
5.1.2. Rendimiento potencial del cultivo del trigo de temporal.....	68
5.2. Cambio de la radiación neta y del índice IHT por el cambio climático en México	72
5.3. Cambio del índice hídrico	76
5.4. Estimación de la alteración de la fertilidad del suelo, atribuible al cambio climático	78
5.4.1. Relación entre algunas propiedades de los suelos, el índice integral de fertilidad del suelo y el IHT	78
5.4.2. Evaluación de los cambios de las propiedades de los suelos agrícolas y del índice integral de fertilidad por el cambio climático.....	83
5.5. Estimación de la vulnerabilidad de maíz y trigo al cambio climático	85
5.5.1. Estimación de la vulnerabilidad del maíz.....	86
5.5.2. Estimación de la vulnerabilidad del trigo.....	91
5.5.3. Mapas de cambios en la productividad de maíz y trigo en México	94
5.6. Medidas de mitigación del deterioro de la productividad agrícola por el cambio climático	99
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
6.1. Conclusiones	102
6.2. Recomendaciones	105
7. LITERATURA CITADA.....	108
8. ANEXOS	116

INDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Duración del cambio de diferentes propiedades del suelo causado por modificación de las condiciones de su formación (incluidos aquellos relacionados con el cambio climático).....	20
Cuadro 2. Indicadores de calidad de suelos y algunos procesos relacionados (tomados de Doran y Parkin, 1996 y Karlen <i>et al.</i> , 1997)	27
Cuadro 3. Días representativos y número de días por mes para estimar valores promedios mensuales.....	47
Cuadro 4. Valores promedio de albedo (α) para los tipos de vegetación natural reportados por INEGI en las cartas de uso del suelo	52
Cuadro 5. Ubicación geográfica de los sitios de referencia seleccionados para el pronóstico del cambio en el rendimiento del maíz de temporal y las condiciones climáticas anuales al principio del siglo XXI.....	63
Cuadro 6. Cambio en las variables climáticas (ΔR_g , ΔT y ΔPr) durante la estación de crecimiento de maíz de temporal con bajo nivel de insumos, en una atmósfera con concentración de CO ₂ duplicada.....	65
Cuadro 7. Cambios en la respuesta fisiológica y productiva del cultivo de maíz de temporal con bajo nivel de insumos en condiciones de cambio climático	66
Cuadro 8. Ubicación geográfica de las áreas de referencia seleccionadas para el pronóstico del cambio en el rendimiento del trigo de temporal y las condiciones climáticas anuales al principio del siglo XXI.....	69
Cuadro 9. Cambio en las variables climáticas (ΔR_g , ΔT y ΔPr) durante la estación de crecimiento del trigo de temporal con bajo nivel de insumos en una atmósfera con concentración de CO ₂ duplicada.....	69

Cuadro 10. Cambios en la respuesta fisiológica y productiva del cultivo de trigo de temporal con bajo nivel de insumos en condiciones de cambio climático.....	71
Cuadro 11. Cambio en las variables climáticas (ΔR_n , ΔIHT y ΔK_{hidr}) durante la estación de crecimiento de maíz de temporal con bajo nivel de insumos en una atmósfera con concentración de CO ₂ duplicada.....	73
Cuadro 12. Valores anuales y cambios porcentuales del índice hidrotérmico local (IHT y ΔIHT) al inicio y final del siglo XXI en los sitios de referencia para los modelos climáticos GFDL-R-30 y CCC.....	76
Cuadro 13. Constantes de las funciones analíticas que relacionan las propiedades químicas y biológicas de los suelos y el IHT	80
Cuadro 14. Ejemplos de evaluación de los cambios climáticos esperados, con el modelo climático GFDL-R30, sobre la alteración de la fertilidad de los suelos vírgenes de México, verificada a través del cambio en el índice integral de fertilidad de los suelos (F) por duplicación en la concentración de CO ₂ en la atmósfera.	84
Cuadro 15. Pronóstico de cambios en las componentes del rendimiento y del rendimiento ($\Delta Y_{máx}$, ΔK_{hidr} , ΔF_a y ΔY) del maíz de temporal con bajo nivel de insumos en una atmósfera con concentración de CO ₂ duplicada de acuerdo con los escenarios climáticos al final del siglo XXI desarrollados por Gay (2003) con los modelos climáticos GFDL-R30 y CCC en algunos sitios de referencia de México	87
Cuadro 16. Intervalos de valores porcentuales de cambio en la productividad de maíz y trigo de temporal bajo condiciones de cambio climático global al final del siglo XXI.....	88
Cuadro 17. Análisis comparativo de los resultados de estimación de vulnerabilidad del cultivo de maíz de temporal con los escenarios climáticos al final del siglo XXI desarrollados por Gay (2003) con los modelos climáticos GFDL-R30 y CCC en algunos sitios de referencia de México	90

Cuadro 18. Pronóstico de cambios en las componentes del rendimiento y del rendimiento ($\Delta Y_{\text{máx}}$, ΔK_{indir} , ΔF_a y ΔY) del trigo de temporal con bajo nivel de insumos en una atmósfera con concentración de CO ₂ duplicada de acuerdo con los escenarios climáticos al final del siglo XXI desarrollados por Gay (2003) con los modelos climáticos GFDL-R30 y CCC en algunos sitios de referencia de México	92
Cuadro 19. Efecto del cambio climático al final del siglo XXI sobre las características de la estación de crecimiento en el municipio Jesús María de los Altos de Jalisco y en la fenología de la variedad de maíz de temporal V-223 (con requerimientos térmicos de 1279 Grados Día Desarrollo).....	100

INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Esquema del modelo CERES-Maize (Gay, 2003).....	16
Figura 2. Esquema metodológico general para la estimación de cambios en los rendimientos de maíz y trigo de temporal bajo escenario de cambio climático global.....	34
Figura 3. Esquema de pronóstico de cambio del índice integral de calidad del suelo, F, en función del pronóstico de cambio del IHT por el cambio climático global.....	61
Figura 4. Dependencia entre los valores del balance de radiación de onda larga y la temperatura media.....	74
Figura 5. Dependencia de los valores modales del contenido de materia orgánica (MO) y pH, en los suelos naturales no usados en la agricultura y de los suelos agrícolas de temporal de México, y ubicados en los terrenos con pendientes <3% en altitudes de 0-2500 m, en función de los valores regionales promedio anuales del índice climático IHT ²⁰⁰⁰ al inicio del siglo XXI.	79
Figura 6. Dependencia de los valores modales del contenido de fósforo (P ₂ O ₅) y potasio (K ₂ O), en los suelos naturales no usados en la agricultura y de los suelos agrícolas de temporal de México, y ubicados en los terrenos con pendientes <3% en altitudes de 0-2500 m, en función de los valores regionales promedio anuales del índice climático IHT ²⁰⁰⁰ al inicio del siglo XXI.	79
Figura 7. Dependencia del índice integral de fertilidad F _v ²⁰⁰⁰ de suelos vírgenes no usados en agricultura y ubicados en los terrenos con pendientes <3% en altitudes de 0-2500 m en función del IHT ²⁰⁰⁰ al inicio del siglo XXI.....	82
Figura 8. Sitios de referencia utilizados para el pronóstico de cambio de la productividad agrícola de maíz y trigo en condiciones de temporal con bajo nivel de inversión	86

Figura 9.	Comparación de los resultados de estimación de la vulnerabilidad de maíz al cambio climático en el presente trabajo con los obtenidos por Conde <i>et al.</i> (2003)	91
Figura 10.	Cambios en la productividad de maíz de temporal en México utilizando los escenarios climáticos generados con el modelo climático GFDL-R30.	96
Figura 11.	Cambios en la productividad de maíz de temporal en México utilizando los escenarios climáticos generados con el modelo climático CCC.....	97
Figura 12.	Cambios en la productividad del trigo de temporal con bajo nivel de insumos en México utilizando los escenarios climáticos generados con el modelo climático GFDL-R30.	98
Figura 13.	Cambios en la productividad de trigo de temporal con bajo nivel de insumos en México utilizando los escenarios climáticos generados con el modelo climático CCC.....	99

INDICE DE ANEXOS

Páginas

Anexo A. Mapa de ubicación de las zonas de Douglas donde se tienen pronósticos de cambio climático en México con los modelos climáticos GFDL-R30 y CCC por Gay (2003)	116
Anexo B. Cambios en las variables climáticas Temperatura, Precipitación y Radiación Solar Global por zona de Douglas en la República Mexicana, para cada uno de los modelos climáticos GFDL-R30 y CCC (Gay, 2003)	117
Anexo C. Propiedades de los suelos y estimación del IHT en los pozos edafológicos estudiados	120
Anexo D. Valores anuales y estacionales del índice hidrotérmico local estimado, para el escenario climático de una atmósfera con concentración duplicada de CO ₂ , usando los pronósticos climáticos del modelo GFDL-R30	133
Anexo E. Mapas de cambios del índice integral de fertilidad de los suelos agrícolas (ΔF) debidos al cambio climático global al final del siglo XXI con los modelos climáticos GFDL-R30 y CCC	138
Anexo F. Requerimientos agroecológicos de los cultivos de maíz y trigo	140
Anexo G. Información relativa al cultivo de maíz de temporal en los sitios de referencia, y efecto de los componentes de la productividad sobre la productividad final, para el escenario de duplicación de la concentración de CO ₂ en la atmósfera al final del siglo XXI	141
Anexo H. Información relativa al cultivo de trigo de temporal en los sitios de referencia, y efecto de los componentes de la productividad sobre la productividad final, para el escenario de duplicación de la concentración de CO ₂ en la atmósfera al final del siglo XXI	143
Anexo I. Valores de temperaturas y precipitación medias mensuales en la estación Jesús María, en los Altos de Jalisco, para los escenarios actual y futuro, con los modelos climáticos GFDL-R30 y CCC	144

1. INTRODUCCIÓN

La concentración global de dióxido de carbono [CO₂] en la atmósfera se ha incrementado desde un valor de 280 ppm hasta 379 ppm, en el periodo comprendido de la época preindustrial en el siglo XIX hasta el año 2005 (Keeling y Whorf, 2005). Ahora es posible afirmar, con un nivel de confianza muy alto (mayor del 90%), que las consecuencias de estos tipos de cambios han tenido que ver con el inequívoco calentamiento de la tierra, como puede concluirse a partir de las observaciones de incremento en la temperatura media global del aire y del mar, el derretimiento generalizado del hielo y nieve y el incremento global del nivel medio del mar (IPCC, 2007a). Independientemente de las diferentes explicaciones existentes sobre la naturaleza del cambio climático (por factores naturales o causados con las actividades humanas) casi todas las publicaciones pronostican un calentamiento global al final del siglo XXI (IPCC, 2001a; IPCC, 2007a); y la mayoría de los escenarios del cambio climático global están relacionados con el crecimiento continuo del contenido de dióxido de carbono en la atmósfera (Hansen, 2004; Hansen *et al.*, 2005; IPCC, 2007a).

El Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México generó escenarios de cambio climático en diferentes regiones de México, para el escenario de duplicación del contenido de CO₂ en la atmósfera al final del siglo XXI (Magaña *et al.*, 1997; Gay, 2003). Estos escenarios se refieren a cambios regionales en los valores mensuales de la temperatura del aire, precipitación y radiación global, utilizando para esto dos modelos de Circulación General de la Atmósfera: 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) (Gay, 2003). Los escenarios de cambio del clima se determinaron para 18 zonas de México, consideradas como zonas relativamente homogéneas climatológicamente, delimitadas por Arthur Douglas. La información relativa a su ubicación geográfica y los datos para cada zona se encuentran en Internet ([ftp: hurricane.ncdc.noaa.gov](ftp://hurricane.ncdc.noaa.gov)).

Existe evidencia de que los cambios en el clima regional, que se esperan durante el siglo XXI, puede afectar de manera significativa la productividad agrícola y causar alteraciones en diferentes recursos naturales, incluyendo el suelo (Bazzaz y Sombroek, 1996; Reddy y Hodges, 2000; Bhatti *et al.*, 2006; Newton *et al.*, 2007). No obstante, la vulnerabilidad de los principales cultivos al cambio climático en las condiciones de México se ha estudiado todavía poco, y las publicaciones sobre este tema son escasas (Conde *et al.*, 1998; Conde *et al.*, 2004; Eakin, 2000; Gay, 2003, Gay, 2006b). En los trabajos existentes se analiza la vulnerabilidad de los rendimientos únicamente de los cultivos de temporal: maíz y café en función de la concentración de CO₂ y el cambio climático, y desafortunadamente no se considera el efecto de la alteración de la fertilidad natural del suelo atribuible al cambio climático y su probable efecto en los pronósticos realizados de cambio en la productividad agrícola.

Los trabajos hechos en diferentes países señalan que en caso de duplicación de la concentración de CO₂, y de darse los cambios climáticos correspondientes, se esperan respuestas diferenciadas para cultivos de grano de acuerdo con su mecanismo fotosintético. Los cultivos C3 podrían tener un incremento promedio en el rendimiento de ~20-30% a nivel mundial (Allen, 1990) y un decremento de ~6-60% para plantas C4 como el maíz en México (Liverman and O' Brien, 1991; IPCC, 2001b). Para las condiciones de México se han hecho algunas otras estimaciones de la vulnerabilidad de maíz y café de temporal. Estas estimaciones indican que para maíz se esperan tanto incrementos (hasta del 60 %) como decrementos (hasta del 23%) en los rendimientos, en función de la región y de los escenarios de cambio de clima propuestos (Conde *et al.*, 1998; IPCC, 2001b). Para el caso del café se esperan reducciones en los rendimientos hasta del 33% (Gay *et al.*, 2006b).

El pronóstico de rendimientos de los cultivos en función de los escenarios de cambio climático se realiza, por lo general, con modelos matemáticos de diferentes grados de complejidad, los cuales consideran el efecto de la concentración de CO₂ en la atmósfera, radiación fotosintéticamente activa (RFA), temperatura del aire (T) y precipitación (Pr). Los factores tales como CO₂, RFA y T definen el rendimiento máximo o potencial; entendido éste como el rendimiento de un cultivo que crece en

un ambiente al cual se ha adaptado, estando controlados de manera efectiva otros factores de estrés (plagas y enfermedades, nutrientes y agua) (Evans y Fischer, 1999; FAO-IIASA, 2000).

Frecuentemente, 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). Por esta razón, en este trabajo se propone utilizar una metodología de complejidad media, inicialmente utilizada por la FAO-IIASA (2000) para evaluar el potencial agroclimático mundial para el escenario climático actual. Esta metodología se fundamenta en principios agroecológicos y utiliza un número reducido de variables y tiene amplia difusión en el mundo.

En pocas publicaciones se ha intentado considerar otros factores potencialmente limitantes tales como la fertilidad del suelo en función también de la concentración de CO₂ en la atmósfera y del cambio climático. El problema radica en que es difícil predecir la alteración de las propiedades biológicas, químicas y físicas de los suelos en función del cambio climático a largo plazo (Hernández *et al.*, 2006). El uso de modelos matemáticos que simulan los procesos de formación del suelo en función de las condiciones climáticas y las prácticas agrícolas durante decenas de años tiene poca confiabilidad (Young, 1994). La confiabilidad de tales pronósticos disminuye cuando el período considerado aumenta (Ruelle, 1989).

Para obtener pronósticos confiables es necesario utilizar métodos no basados en la modelación matemática, sino en otros principios. Uno de los enfoques que puede utilizarse es el método del Índice de Aridez de Budyko (Budyko radiation index of dryness) o Índice hidrotérmico Local (IHT), como es mejor conocido por su traducción al español. Este método está basado en los conceptos de la ley geográfica de zonificación de suelos y otros recursos naturales (Dokuchaev, 1898; Grigoriev, 1954; Buol *et al.*, 1989) y 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 y físicas de los suelos vírgenes

en áreas grandes, con tamaño aproximadamente mayor de 10 km² y geomorfológicamente similares, dependen del índice hidrotérmico local, IHT (adimensional).

Investigaciones previas, realizadas en el Colegio de Postgraduados de México por Nikolskii *et al.*, (2001) y Contreras *et al.*, (2002), han permitido establecer para México algunas relaciones de dependencia entre IHT²⁰⁰⁰, para finales del siglo XX, y algunas propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos automorfos vírgenes no usados en la agricultura; definidos éstos como aquellos que no dependen en su formación de la ubicación del nivel freático y que conservan su cobertura de vegetación nativa al momento de realizarse el muestreo de suelos, al final del siglo XX (φ^{2000}), geomorfológicamente homogéneos y formados sobre subsuelos con textura y mineralogía similar (Nikolskii *et al.*, 2001; Contreras *et al.*, 2002). Con las relaciones φ (IHT) han podido establecer la metodología para el pronóstico de los cambios microclimáticos inducidos por cambios en el uso del suelo en los distritos de riego del país (Contreras *et al.*, 2002).

Ahora, si se considera que en el proceso relativamente lento del cambio climático las mismas propiedades llegan al equilibrio con las nuevas condiciones climáticas para finales del siglo XXI, y se pronostica el cambio del IHT para fines del siglo XXI (IHT²¹⁰⁰), entonces se pueden estimar los nuevos valores φ^{2100} de las propiedades del suelo en cualquier sitio de referencia a través de las relaciones φ^{2000} (IHT²⁰⁰⁰) establecidas. La metodología para establecer las relaciones φ^{2000} (IHT²⁰⁰⁰) está descrita en los trabajos de Tetumo *et al.* (2001), Nikolskii *et al.* (2001) y Contreras *et al.* (2002).

Este trabajo propone una metodología para estimar los cambios en la productividad agrícola considerando los efectos de alteración de la fertilidad de los suelos debido al cambio climático global. Los trabajos preliminares de diferentes autores sobre establecimiento de relaciones entre el IHT²⁰⁰⁰ y las propiedades estudiadas de los suelos, señalan que no existe una diferencia significativa entre los valores modales de estas propiedades típicos para los suelos vírgenes y agrícolas de temporal ubicados en regiones climáticas con ciertos índices IHT²⁰⁰⁰ (Nikolskii *et al.* 2001;

Contreras *et al.*, 2002). Esto permite asumir que la proporción entre los valores modales de las propiedades del suelo virgen no usado en la agricultura al final e inicio del siglo XXI corresponden a la proporción entre los valores modales de las mismas propiedades del suelo agrícola de temporal. Esto implica ignorar el efecto de la tecnología agrícola –factor que no tiene relación directa con el cambio climático.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivo General

Desarrollar una metodología para evaluar la influencia de una posible alteración de la fertilidad de los suelos agrícolas en la productividad de los cultivos de maíz (planta con ruta fotosintética C4) y trigo (planta con ruta fotosintética C3) en algunas tierras de temporal de referencia localizadas en diferentes zonas climáticas de México, y para los escenarios existentes de cambio climático para el final del siglo XXI en el caso de duplicación de la concentración de CO₂ en la atmósfera.

2.2. Objetivos Particulares

- Actualizar las relaciones cuantitativas entre algunas propiedades químicas, y biológicas de los suelos vírgenes (no usados en la agricultura) ubicados en terrenos poco inclinados (con pendientes menores de 3%) y el índice hidrotérmico local (IHT²⁰⁰⁰) para las condiciones climáticas promedio anuales en el principio del siglo XXI.
- Establecer una dependencia cuantitativa del índice integral de calidad de los suelos vírgenes y agrícolas de temporal ubicados en terrenos poco inclinados y el índice climático IHT²⁰⁰⁰.
- Estimar la vulnerabilidad de los cultivos de referencia de temporal ubicados en los terrenos poco inclinados al cambio climático global considerando los cambios de CO₂, radiación fotosintéticamente activa, temperatura, precipitación y fertilidad del suelo.
- Desarrollar algunas medidas de mitigación de posible deterioro de la productividad de maíz y trigo de temporal en México.

2.3. Hipótesis

- El Índice Hidrotérmico Local (IHT) o índice de aridez de Budyko se puede utilizar para pronosticar la alteración en la fertilidad de los suelos agrícolas atribuible al cambio climático global.
- El cambio climático puede modificar significativamente la fertilidad de los suelos vírgenes y agrícolas de temporal en algunas regiones climáticas de México.
- El cambio de la fertilidad de los suelos agrícolas de temporal puede ser un factor importante en la productividad de los cultivos agrícolas de referencia y debe ser considerado en las evaluaciones de la vulnerabilidad de la productividad agrícola al cambio climático.

3. REVISION DE LITERATURA

3.1. Pronósticos existentes del cambio climático en México

El conocimiento de la influencia antropogénica en el calentamiento o enfriamiento del clima ha mejorado desde el Tercer Informe de Evaluación, lo que lleva a afirmar con un nivel de confianza mayor del 90% que el efecto neto medio de las actividades humanas desde el año 1750 ha resultado en un calentamiento, con un forzamiento radiativo solar de +0.6 a +2.4 con un promedio de +1.6 W m² (IPCC, 2007a). El cambio climático global esperado en el siglo XXI está relacionado, principalmente, con incrementos en la concentración de CO₂ en la atmósfera por un factor de 1.5 a 3, si se compara con las concentraciones del mismo gas a principios del siglo XX. (IPCC, 2000a). Varios países tienen predicciones del cambio climático para diferentes escenarios de acumulación de CO₂ atmosférico (Hulme y Sheard, 1999; Gay, 2003; IPCC, 2007a).

Para México existen escenarios analizados por Liverman y O'Brien (1991) que describen cambios en la temperatura media anual y en la precipitación total anual, para un escenario 2xCO₂ para algunas estaciones meteorológicas de México, utilizando varios Modelos de Circulación General de diferentes dependencias (El

Laboratorio Geofísico de Dinámica de Fluidos de Princeton, GFDL; el Instituto Goddard para Estudios Espaciales, GISS; el Centro Nacional para la Investigación Atmosférica, NCAR; la Universidad Estatal de Oregon, OSU, y la Oficina Meteorológica del Reino Unido, UKMO). Estos escenarios del calentamiento global muestran que aun con ser inciertos, debido a que las proyecciones de diferentes modelos varían ampliamente, particularmente en el caso de la precipitación, y reproducir pobremente el clima observado de México, 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 compensa los incrementos en 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 concuerdan 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 pobre detalle topográfico de los modelos. Para la lluvia la situación es peor, pues algunos modelos solo 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 con 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 ir afinando 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 del 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 salidas de Modelos de Circulación General (MCG) para experimentos numéricos de 1xCO₂ (concentración actual de CO₂) y 2xCO₂ (duplicación de la concentración actual de CO₂) 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. Los límites de las zonas fueron establecidos por Arthur Douglas de la Universidad de Creighton, Nebraska, con base en información meteorológica 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 características geográficas de cada estación. Estos datos están disponibles en Internet (hurricane.ncdc.noaa.gov).

No obstante, para la generación de los escenarios se utilizó información meteorológica de la base de datos de A. 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 o 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 *et al.*, 1995, 1996; Gay, 2003) concluyen que el país podría experimentar temperaturas más altas y aun más altas tasas de evaporación con una duplicación del CO₂. 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 o 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 2xCO₂ en algún punto de malla en el mes de enero se obtiene de promediar los 10 o 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 2xCO₂ menos el valor promedio correspondiente, bajo condiciones de 1xCO₂. Las anomalías para la

precipitación (o radiación) resultan de efectuar el cociente de esa variable bajo los dos escenarios (2xCO₂entre 1xCO₂) (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 del CCC que pronostica un decremento en precipitación de verano e invierno.

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 *cumulus*, 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, 1994, 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, 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. Estos escenarios están por publicarse en este año en la revista *Atmósfera* (Gay *et al.*, 2006a). También se cuenta ya con escenarios para 143 localidades del Estado de Veracruz. Los datos de radiación para el modelo Hadley, para cada escenario están disponibles en Internet (Palma *et al.*, 2007). Se tienen escenarios futuros por los MCG para las proyecciones de 2020, 2050 y 2080. Cada archivo contiene la información para cada estación climatológica considerada en el estado de Veracruz: (a) Escenarios futuros de temperatura (°C) y (b) Escenarios futuros de precipitación (mm/día).

El análisis de todos los escenarios climáticos al final del siglo XXI para México señala que no existe gran diferencia (por lo menos en lo que respecta al signo del cambio) 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.

En este trabajo resultan útiles los escenarios generados por Gay (2003), por ser los más detallados en cuanto a la información generada (valores mensuales de cambios en temperatura del aire, precipitación y radiación global) para diferentes zonas climáticas de México, estar ya publicados en su totalidad y haberse utilizado en estudios de vulnerabilidad en el país, lo cual permite la comparación de resultados utilizando enfoques de estudio diferentes.

3.2. Métodos para pronosticar los rendimientos en función de los escenarios del cambio climático y algunos resultados de estos pronósticos para México

3.2.1. Efecto del cambio de clima

El Grupo de Trabajo II de el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001b, 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 (CO₂) en la atmósfera (Hansen, 2004). La respuesta de los cultivos agrícolas a la acumulación de CO₂ 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 C3¹, por ejemplo el trigo y el arroz, que requieren mayores concentraciones de CO₂ para iniciar la síntesis de materia orgánica, se puede esperar una respuesta positiva promedio de 30% en caso de duplicación de CO₂ en la atmósfera. En contraste, en los cultivos de plantas C4², como serían el maíz y la caña de azúcar, que actualmente son los más eficientes en la fijación del CO₂, 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:

- Correlaciones estadísticas entre rendimientos de cultivos y variables climáticas, sociales y económicas (O-Brian *et al.*, 2000; Kaufmann, 2001; Chang, 2002; Lobell *et al.*, 2005; Gay *et al.*, 2006b); y
- En 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).

¹ Algunos de los principales son trigo (*Triticum aestivum*), arroz (*Oriza sativa*), uva (*Vitis vinifera*), algodón (*Gossypium hirsutum*), soya (*Glicine max*) y girasol (*Helianthus annuus*).

² Los principales cultivos son maíz (*Zea maíz*), caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y sorgo (*Sorghum bicolor*).

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 (2001) propuso 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 y Leichenko, 2000).

Las evaluaciones de vulnerabilidad de cultivos en México se han realizado cuando menos para dos cultivos (maíz y café); en el caso del café en el estado de Veracruz, la investigación fue basada utilizando 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 entonces utilizado 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 basado en modelos determinísticos, basados en la fisiología del cultivo, se ha utilizado mucho a nivel mundial y probablemente es preferible para modelar el efecto del cambio climático sobre la productividad de los cultivos, a los modelos de regresión, aun cuando éstos permiten integrar algunas variables socioeconómicas. Estos ya se han utilizado para evaluar el impacto de los cambios climáticos recientes sobre las tendencias en el rendimiento del trigo en México. Así, el análisis usando modelos determinísticos (modelos de simulación como el CERES-Wheat) y estadísticos permitió concluir que el incremento en el rendimiento del 25%, determinado para el cultivo del trigo en los estados del noroeste de México, se debe mayormente a la naturaleza de las tendencias

climáticas en esta zona productora de trigo, relacionadas con temperaturas nocturnas más bajas durante la estación de crecimiento, en las últimas dos décadas. Este incremento en los rendimientos de trigo mexicano 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).

El modelo CERES-Maize (Jones *et al.*, 1986; Ritchie *et al.*, 1989) también utilizado en México, simula los incrementos diarios de crecimiento, desarrollo y producción del cultivo del maíz. Este modelo puede utilizarse para la toma de decisiones en el manejo de los cultivos y en el análisis de riesgo para simular el crecimiento, el desarrollo y la producción del maíz. El modelo considera los siguientes procesos:

- a) El desarrollo fenológico, especialmente la forma en que es afectado por las características genéticas y los factores climáticos.
- b) La extensión del crecimiento de hojas, tallos y raíces.
- c) La acumulación de biomasa, especialmente la manera en que el desarrollo fenológico afecta el desarrollo de los órganos vegetativos y reproductivos.
- d) El balance del agua del suelo y el uso del agua por el cultivo.

Finalmente, es importante mencionar que el modelo está diseñado para simular los efectos del clima y los cambios en el manejo del cultivo.

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

La comparación entre la producción simulada y la real permite calibrar el modelo antes de introducir las condiciones de cambio climático. O bien, es posible realizar estudios de sensibilidad, proponiendo incrementos tales en temperatura y precipitación que permitan analizar la capacidad de respuesta del cultivo a dichos cambios (Conde *et al.*, 2003).

En la Figura 1 se observa que la adaptación de este modelo del cultivo de maíz a la modelación de su fisiología bajo condiciones de cambio climático en México se basa en el uso de base de datos climáticos actuales CLICOM y en la introducción de las modificaciones climáticas al final del siglo XXI propuestas por los modelos CCC y GFDL-R30 (Gay *et al.*, 2003), bajo condiciones de una duplicación de bióxido de carbono. Los otros archivos de entrada (suelos, manejo de cultivos, entre otros) se mantienen sin cambios. La diferencia observada entre la simulación de la producción real y la obtenida por un cambio climático, representa la medida del impacto que puede tener dicho cambio en la producción agrícola para el sitio seleccionado. El modelo también permite sugerir medidas de adaptación, al variar las condiciones del manejo de cultivo y/o proponiendo un cambio en la variedad de la semilla empleada. Aunque, en la Figura 1 el suelo con sus propiedades se muestra en la parte izquierda, correspondiente al inicio del siglo XXI, y en la parte derecha, correspondiente al final de este siglo, los pronósticos de la productividad de maíz prácticamente no consideran ninguna alteración del suelo atribuible al cambio climático. En este modelo se considera solamente una relación cualitativa sobre dependencia de las reservas de nitratos, como componente de las reservas nutritivas de nitrógeno en suelo, con la precipitación anual, basada en el supuesto de que estas reservas pueden reducirse proporcionalmente al incremento de la precipitación anual.

MODELO CERES-Maize

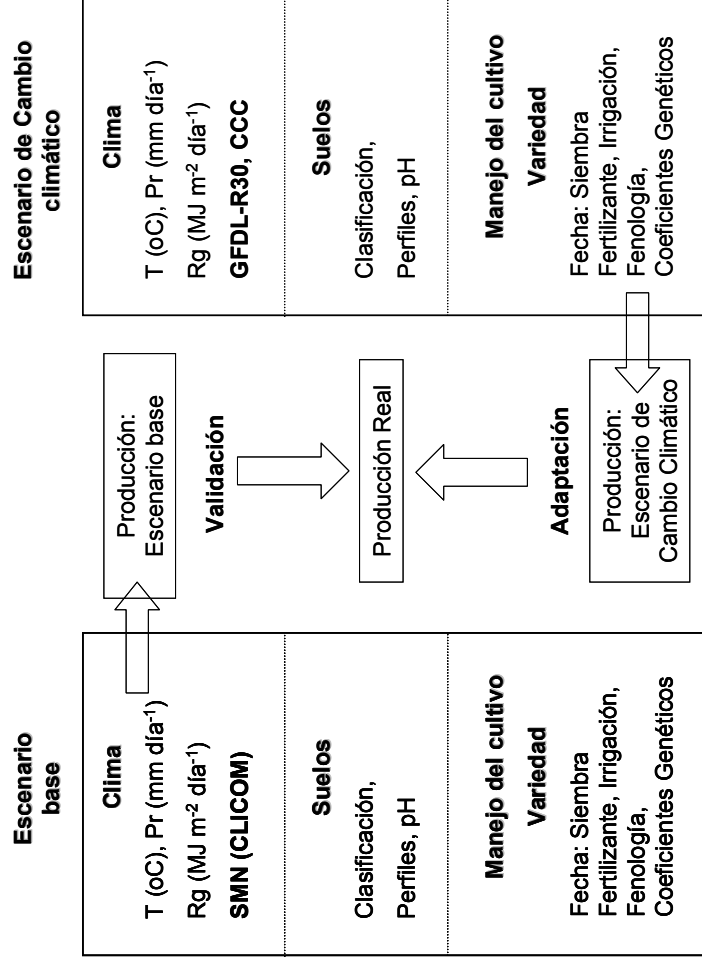


Figura 1. Esquema del modelo CERES-Maize (Gay, 2003).

Nota: - a la izquierda se ilustran los archivos de entrada para construir el escenario base al inicio del siglo XXI; - a la derecha se muestran los correspondientes para construir escenarios de cambio climático al final del siglo XXI; - al centro, las simulaciones de producción de maíz, que deben ser contrastadas con la producción real.

En la publicación de Gay (2003) se reporta el uso del modelo de simulación CERES-Maize para estimar la vulnerabilidad del maíz de temporal de México. 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 2000 m 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. Este efecto los autores reportan que se debe al lavado de nutrientes del suelo, sin especificar detalles (Gay, 2003).

Si se supone en forma aproximada que la reserva de nitratos (solamente como un componente de la reservas de nitrógeno) se reduce proporcionalmente al incremento de 1.2 veces la precipitación anual, esto no significa que el modelo CERES-Maize este considerando en forma apropiada los cambios en la fertilidad de los suelos debidos al cambio climático. El problema de este enfoque es que la dinámica de los nitratos en el suelo es difícil de modelar a largo plazo. Mas aun, el problema general es que la mayoría de los estudios del efecto del cambio climático en el ciclo de los nutrientes esta muy enfocado en el nitrógeno. Una razón es que es un nutriente que se requiere en mayor cantidad y esta ligado a procesos biológicos fundamentales como la fijación biológica de nitrógeno. Sin embargo, hay otros macronutrientes requeridos por las plantas en grandes concentraciones y otros micronutrientes con un papel funcional importante en los sitios activos de las enzimas (Newton *et al.*, 2007). Por lo anterior, en este trabajo se propone la metodología de pronóstico de alteración de fertilidad del suelo agrícola de temporal atribuible al cambio climático, y se describe a continuación en el capítulo 3.3.

En el caso de los sitios ubicados al este del país se pronostica un adelanto de un mes en la sequía intraestival bajo condiciones de cambio climático. Con el objeto de reducir los impactos del cambio climático, se estudiaron medidas de adaptación como el cambio en la fecha de siembra, el incremento en la aplicación del fertilizante, el cambio en la variedad de las semillas, la aplicación de irrigación y combinaciones de éstas. La más exitosa de estas medidas fue la aplicación de fertilizante, sola o combinada con alguna de las otras propuestas (Gay, 2003).

Las medidas de adaptación sugeridas en la publicación antes citada relacionadas con la aplicación de fertilizantes en los terrenos de temporal es difícil de implementar en forma práctica a gran escala debido a se tiene una agricultura de temporal predominantemente de bajos insumos, por lo que la recomendación de aplicar fertilizantes no es de todo adecuada a la realidad productiva mexicana. La aplicación del riego tampoco es una medida de adaptación válida, dados los escenarios de disminución de la precipitación en áreas críticas del país como las zonas áridas y semiáridas donde no habrá agua para ampliar área de riego.

3.2.2. Efecto del incremento en la concentración del CO₂ en la atmósfera

En México se han realizado también investigaciones de campo relacionadas con el estudio de la respuesta de plantas de maíz (C4) y frijol (C3) al crecimiento de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera. Sánchez-Espino *et al.* (2000) encontraron que, como respuesta a la duplicación artificial de la concentración atmosférica de CO₂ en condiciones de invernadero, aumentó el área foliar del frijol y la densidad estomática disminuyó. En contraste, en el caso del maíz, ni el área foliar, ni la densidad estomática fueron afectadas por el cambio de CO₂ en la atmósfera. La atmósfera enriquecida con CO₂ promovió 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 o tamaño de éstas. En el caso del maíz, la alta concentración de CO₂ estimuló la acumulación de biomasa solo 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 a la hora de definir los parámetros a considerar en los modelos de simulación de cultivos. Los trabajos existentes señalan que en caso de duplicación de la concentración de CO₂, y los cambios climáticos correspondientes, se espera para cultivos de grano con mecanismo fotosintético C3 como el trigo y frijol un incremento promedio en el rendimiento de ~20-30% (Allen, 1990) y decremento de 6-60% para plantas C4 como el maíz (Liverman y O'Brien, 1994; IPCC, 2001b), dependiendo de la región.

Finalmente debe ser mencionado 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). Por esta razón, en este trabajo se ha utilizado una metodología relativamente simple, propuesta por la FAO-IIASA (2000),

pero basada en principios agroecológicos, y congruente con la información disponible de los escenarios de cambio climático.

Lo anteriormente expuesto permite concluir 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, 1994; Conde *et al.*, 1998; Gay, 2003; Gay *et al.*, 2006b). En esos trabajos se analiza la vulnerabilidad de los rendimientos de maíz de temporal en función de la concentración de CO₂ y el cambio climático, y no se considera el efecto de la alteración de la fertilidad natural del suelo atribuible al cambio climático.

3.3. Métodos para considerar el cambio de fertilidad del suelo en función de los escenarios climáticos

La pedosfera 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 componente principal que regula tales intercambios, quedando registrados en sus propiedades. Por tanto, el suelo es un bloque de memoria del sistema geosfera-biosfera. Cada cuerpo del suelo (tipo genético, subtipo, etc.) es un registrador de las interacciones pasadas y presentes de la atmósfera y litosfera. Estas interacciones conllevan a cambios en el suelo que pueden ser lentos o rápidos (Richter y Markewitz, 2001; Hernandez *et al.*, 2006).

Estos registros de los cambios del medio ambiente pueden ser por años, décadas y aún por siglos, conllevando en los diferentes ecosistemas a etapas de evolución y desarrollo de los suelos que resultan en los llamados procesos de formación de los suelos (Hernández *et al.*, 2006). En el Cuadro 1 se presenta la duración de cambio de diferentes propiedades del suelo causado por la modificación de las condiciones de su formación (Arnold *et al.*, 1990). Según este Cuadro las principales propiedades responsables de la fertilidad del suelo (contenido de elementos nutritivos, materia orgánica, pH, etc.) llegan al equilibrio con las nuevas condiciones formación del suelo (cambio climático en nuestro caso) durante varios años o decenas de años. Esto significa que si se consideran cambios climáticos relativamente lentos y realizados

durante un periodo suficientemente grande (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.

Cuadro 1. Duración del cambio de diferentes propiedades del suelo causado por modificación de las condiciones de su formación (incluidos aquellos relacionados con el cambio climático)

Propiedades del suelo	Duración del cambio de la propiedad por el cambio de las condiciones de formación del suelo (años)
Densidad aparente	
Porosidad total	
Permeabilidad	$< 10^{-1}$
Composición del aire del suelo	
Contenido de nitrógeno móvil	
Capacidad de campo	
Conductividad hidráulica	
pH	10^{-1} -100
Estatus nutricional	
Composición de la solución del suelo	
Capacidad de intercambio catiónico	
Composición de los cationes intercambiables	$100 - 10^1$
Contenido de material orgánica	
Superficie específica	$10^1 - 10^2$
Composición mineralógica de arcilla	
Composición de minerales primarios	$10^2 - 10^3$
Composición química de la parte mineral	
Textura	
Distribución de tamaños de partículas	$> 10^3$
Densidad de partículas	

En la actualidad han surgido diferentes criterios para enfocar los estudios sobre los Cambios Globales en los Suelos. Según 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 define un conjunto de indicadores apropiados para evaluar la calidad de los suelos a escala regional, por lo anterior, resulta de especial interés conocer cuáles son los indicadores de

importancia a escala regional, los que presentan variaciones significativas con el cambio de uso del suelo y los atributos dentro de estos factores que pueden utilizarse como indicadores a escala regional (Arshad y Coen, 1992; Brejda *et al.*, 2000). Los indicadores de calidad del suelo pueden ser propiedades físicas, químicas y biológicas, o procesos que ocurren en él (SQI, 1996). Para que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo sean consideradas indicadores de calidad deben cubrir las siguientes condiciones (Doran y Parkin, 1994):

- a) describir los procesos del ecosistema;
- b) integrar propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo;
- c) reflejar los atributos de sostenibilidad que se quieren medir;
- d) ser sensitivas a variaciones de clima y manejo;
- e) ser accesibles a muchos usuarios y aplicables a condiciones de campo;
- f) ser reproducibles;
- g) ser fáciles de entender;
- h) ser sensitivas a los cambios en el suelo que ocurren como resultado de la degradación antropogénica;
- i) y, cuando sea posible, ser componentes de una base de datos del suelo ya existente.

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 o indirectamente, por elevadas concentraciones de CO₂, elevadas temperaturas y alteraciones en las precipitaciones.

A pesar del empeño y grandes avances en el estudio de la fertilidad de los suelos bajo condiciones de cambio climático global utilizando el enfoque de estudio mencionado en el párrafo anterior, no ha sido posible ir más allá de los estudios de los efectos del cambio climático global sobre el ciclo de los nutrientes demasado

focalizado en el nitrógeno. Los datos sobre el ciclo de otros elementos son virtualmente inexistentes. Esto es desafortunado debido a que otros elementos, aparte del N, frecuentemente limitan o co-limitan la producción de plantas, por ejemplo, P y K (Bhatti *et al.*, 2006; Newton *et al.*, 2007).

Más aún, la materia orgánica es una propiedad biológica de los suelos de gran relevancia desde el punto de vista de su fertilidad integral. Los resultados de las investigaciones recientes sobre el efecto de las altas concentraciones de CO₂ sobre la materia orgánica del suelo son equívocos y no dejan ver algún efecto definido. El estado de la investigación actual parece dejar claro que los efectos indirectos del aumento en la concentración de CO₂, 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 debida a un enriquecimiento de la atmósfera con CO₂ puede ser no significativa.

Lo antes mencionado confirma la conveniencia de utilizar el enfoque propuesto en esta investigación basado en la *ley geográfica de zonificación de los recursos naturales*, que consiste en estimar los cambios en la fertilidad del los suelos (caracterizada por un índice integral de fertilidad) debidos al cambio climático global en función únicamente del índice hidrotérmico local, 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 el método del IHT 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. El método del IHT (o Índice Hidrotérmico Local o Índice de aridez de Budyko) para pronosticar cambio del suelo por el cambio de las condiciones microclimáticas 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 la teoría de formación de suelos en función de la energía solar y la precipitación (Budyko, 1974;

Volobuyev, 1974). Este método fue utilizado para estimar la alteración de algunas propiedades de los suelos agrícolas de México causada por la modificación de las condiciones microclimáticas debido al cambio de tipo de uso de los terrenos, manejo de suelo y agua. Las propiedades de los suelos de interés están disponibles en las bases de datos existentes y son las siguientes:

- cantidad de materia orgánica, potasio y fósforo (formas disponibles para la vegetación), calcio, magnesio, sodio, arcilla, arena, limo
- pH
- capacidad de intercambio catiónico
- saturación de bases

Según Volobuyev (1974) a nivel mundial algunas propiedades químicas, biológicas y físicas de los suelos vírgenes no usados en agricultura en áreas grandes, con tamaño aproximadamente mayor de 10 km² y geomorfológicamente similares, dependen del "índice hidrotérmico local", IHT (adimensional), que es una característica climática integral muy importante para analizar la influencia del régimen hidrotérmico sobre los procesos de formación de los suelos, el cual se expresa como:

$$\text{IHT} = \frac{R_n}{\lambda Pr} \quad (1)$$

Donde:

$\lambda = 2.512 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$: calor latente de evaporación; R_n y Pr : radiación neta ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) y precipitación ($\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$), respectivamente. Los valores de R_n y Pr son promedios anuales. El valor de Pr corresponde a la cantidad de agua que anualmente recibe el suelo y que utiliza para su formación: en las 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 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 microclimáticas.

Los resultados de Nikolskii *et al.* (2001) y Contreras *et al.* (2002) muestran que valores de IHT₀ 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 IHT₁ o IHT₂ 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 o conservación del suelo, en favor de una agricultura sustentable.

Las gráficas Propiedad del suelo – IHT 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 en papel con cobertura nacional de 40%. Actualmente tal información está disponible para más de 80% de cobertura nacional, estructurada en una base de datos electrónica con posibilidades de análisis automatizado. La actualización de esas gráficas resulta necesaria ahora que se dispone de mayor cantidad de información y la forma de su presentación más accesible para el uso de los procedimientos automatizados de su tratamiento utilizando herramientas propias de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

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 razón del uso extensivo de los terrenos de temporal en México con relativamente baja productividad agrícola. Entonces, se supone que las gráficas Propiedad del suelo – IHT para los suelos mexicanos se pueden utilizar directamente para pronosticar cambio de fertilidad del suelo agrícola debido al cambio climático durante el siglo XXI en México. Considerando que actualmente existe información edáfica y sobre uso

agrícola más completa (con cobertura nacional de 80%), se puede actualizar las gráficas Propiedad del suelo – IHT existentes y utilizarlas para predecir la alteración de los suelos agrícolas de temporal de México (cambios en las propiedades regionales de los suelos) bajo diferentes escenarios de cambio climático, si se conoce el valor del índice hidrotérmico local al inicio y final del siglo XXI bajo condiciones de cambio climático global en sitios geográficos seleccionados con condiciones geomorfológicas similares de formación del suelo.

3.4. Cálculo del índice integral de fertilidad del suelo

La valoración de la calidad del suelo no es suficiente ni adecuada empleando sólo una propiedad. Es preferible contar con algún sistema que combine la información que proporcionan diferentes propiedades cuantitativas o indicadores y generar un índice de fácil cálculo e interpretación, que integre en un solo valor la calidad del suelo (Halvorson *et al.*, 1996).

Los enfoques para generar índices de calidad tanto cualitativos como cuantitativos son variados y son diferentes para diferentes escalas; y, por lo tanto, no poseen el mismo grado de exactitud (Vergara y Etchevers, 2004). Algunos autores han propuesto ecuaciones aditivas o multiplicativas que combinan, de diversas formas, las funciones del suelo ponderadas de acuerdo con el interés del investigador (Doran y Parkin, 1994; Hussain *et al.*, 1999; Bautista 2001); otros aplican un enfoque de sistemas para generar funciones de valores estandarizadas (Karlen y Stott, 1994) y, algunos más, utilizan procedimientos multivariados (Smith *et al.*, 1993; Halvorson *et al.*, 1996).

Si bien existen varias formas de estimar la fertilidad de los suelos, estos no siempre tienen una base empírica que de soporte a su aplicación con enfoque geográfico o la información necesaria no siempre se encuentra disponible en bases de datos accesibles y en la densidad requerida y bajo criterios uniformes de muestreo y de análisis químicos. Esto significa que los enfoques mencionados no se pueden aplicar directamente para diferentes zonas climáticas con diferente grado de fertilidad del suelo.

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. Se impusieron como condición que tales propiedades deberían estar relacionadas con las características cualitativas o atributos señaladas por los agricultores de la región para un suelo fuese considerado de calidad. Su método tiene dificultades para su generalización y uso a escala geográfica y su aplicabilidad con los datos disponibles se ve limitada. La aplicación de este método también se ve restringida debido a que los atributos seleccionados para definir a un suelo de buena calidad fueron definidos por los agricultores de una región. Aun cuando este método pudiera ser útil a escala geográfica, para calcular el índice integral de fertilidad, se necesita demasiada información sobre el suelo, la cual no está disponible en las bases de datos existentes en México. Por ejemplo, en estas bases de datos no se encuentra la información sobre acidez intercambiable, humedad aprovechable, densidad aparente, actividad microbiana (consumo de O₂).

Algunos autores sugieren que unas pocas propiedades de los suelos pueden ser suficientes al reflejar procesos fundamentales (Cuadro 2) en los suelos que a una escala geográfica resultan suficientes para concluir sobre su calidad (Pegov y Jomyakov, 1991).

Cuadro 2. Indicadores de calidad de suelos y algunos procesos relacionados (tomados de Doran y Parkin, 1996 y Karlen *et al.*, 1997)

Indicador	Relación con:
Materia orgánica	Reciclamiento nutrimental, retención de agua, estructura del suelo
pH	Disponibilidad nutrimental, absorción y movilidad de pesticidas
N, K, P extractables	Disponibilidad nutrimental, potencial de pérdida de N, productividad biológica.

Un enfoque para estimar el índice integral de la calidad o fertilidad del suelo es el propuesto por Pegov y Jomyakov (1991), quienes, basados en datos bibliográficos, seleccionaron únicamente 6 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 fúlvico (AF).
- Contenido de los elementos nutritivos básicos o macronutrientes N, P y K en formas accesibles y semiaccesibles para la vegetación natural (y agrícola).
- 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 (CIC), textura del suelo (contenido de partículas de arcilla, limo y arena), etc. Por ejemplo, el valor de CIC y las propiedades hidrofísicas del suelo dependen fuertemente del contenido de MO. 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 (o 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 y 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 $f(pH)$:

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

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

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; $(\text{AH} + \text{AF})_{\text{max}}$, 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.

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

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 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 4 propiedades restantes (MO, P, K, pH) con la siguiente Ecuación:

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

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

$$F = 0.32 \frac{MO}{MO_{\max}} + 0.42 \sqrt{\frac{P}{P_{\max}} \frac{K}{K_{\max}}} + 0.25 e^{-\left(\frac{pH-7}{2}\right)^2} \quad (12)$$

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materiales

Para realizar este trabajo fue necesario obtener, sistematizar y tratar los datos sobre las Normales Climatológicas de toda la República Mexicana, los escenarios existentes del cambio climático, los cuales se esperan durante el siglo XXI en diferentes partes del país, así como el conjunto de los datos topográficos, edáficos, del uso del suelo y datos sobre propiedades del suelo. La información sobre datos de los suelos fue:

- Logaritmo negativo de la actividad del ión hidrógeno, pH (adimensional)
- Contenido de materia orgánica, MO (%)
- Fósforo, P (ppm)

- Potasio, K (ppm)

Para calcular el índice hidrotérmico local fue necesario contar con información relacionada con los valores promedio anuales (o valores Normales) sobre precipitación y radiación neta. Para el cálculo de la radiación neta fueron necesarios 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. La información meteorológica se obtuvo de la publicación del Servicio Meteorológico Nacional denominada Normales Climatológicas 1951-1980 (Crespo, 2005). El Servicio Meteorológico Nacional de México ha publicado las siguientes Normales Climatológicas: 1941-1970, 1951-1980, 1961-1990, y recientemente 1971-2000; estas últimas pueden consultarse en Internet en la página Web del SMN: <http://smn.cna.gob.mx/> En este trabajo se utilizan las Normales Climatológicas 1951-1980, y no las más actuales 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.

La verificación de coordenadas geográficas y de altitud de las estaciones meteorológicas de la República Mexicana se realizó con la ayuda de un archivo "Shape" (CONABIO, 2005).

Los procesos de interpolación espacial de las variables climáticas se realizaron con el módulo Kriging de ArcInfo 8.3. El análisis estadístico y ajuste de curvas por el método de mínimos cuadrados se realizó con el programa Curve Expert (Hyams, 1997).

Los pronósticos de la temperatura, precipitación y radiación global se tomaron de los Cuadros 1a, 1b, 1c, 2a, 2b, 2c, 3a, 3b y 3c de la publicación Gay (2003), los cuales se pueden consultar en el Anexo A. Estos Cuadros contienen información promedio mensual correspondiente a incrementos de la temperatura y razón de cambio para la precipitación para los modelos climáticos del Geophysical Fluids Dynamics Laboratory (GFDL-R30) y el Canadian Climate Center (CCC).

La información sobre la topografía fue obtenida del modelo digital del terreno del INEGI elaborado con tamaño de pixel de 100 por 100 m (Actualmente se cuenta con información gratuita relativa al modelo digital del terreno en Internet: <http://gicfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>) La carta edafológica proviene de la digitalización de cartas edafológicas 1:250 000 de CONABIO (2005). La carta de uso del suelo y vegetación proviene de INEGI (1993). La información topográfica, geológica, edafológica y de vegetación se obtuvo de las cartas digitales respectivas publicadas por el INEGI en las escalas 1: 50 000 y 1: 250 000.

La información relacionada con las propiedades físicas y químicas de los suelos y subsuelos se obtuvo de una base de datos (INEGI, 2004) la cual esta 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.

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 sitios de referencia representativos, para los cultivos seleccionados de maíz y trigo de temporal, ubicados en diferentes zonas climáticas de México
- Caracterización climática actual de estos sitios y análisis de los escenarios del cambio climático para finales del siglo XXI en caso de duplicación de CO₂ en la atmósfera
- Cálculo del Índice IHT para estos sitios para el inicio y final del siglo XXI
- Recopilación y tratamiento de los datos sobre uso de los terrenos y propiedades de los suelos vírgenes no usados en la agricultura
- Establecimiento de las dependencias cuantitativas de los valores modales de algunas propiedades biológicas y químicas del suelo virgen y del índice integral de fertilidad de los suelos en función del IHT

- Estimación de vulnerabilidad de la productividad de maíz y trigo de temporal en los sitios de referencia al cambio climático considerando no solamente el efecto directo del cambio climático sino la alteración de la fertilidad del suelo agrícola atribuible al cambio climático
- Establecimiento de medidas de mitigación del deterioro de la productividad agrícola por el cambio climático global en México.

Los pronósticos de los cambios en los rendimientos de los cultivos se realizaron mediante la metodología de la FAO-IIASA (2000) con una modificación propuesta por Pegov y Jomyakov (1991) la cual considera la posibilidad tomar en cuenta el cambio indirecto del suelo atribuible al cambio climático. Es decir, la estimación de la productividad del maíz y trigo se realizó considerando el efecto del cambio en el balance hidrotérmico, por el cambio climático, en las propiedades de los suelos que definen su fertilidad natural, sobre la disponibilidad de humedad para las plantas, y, junto con las características propias del cultivo y la concentración de CO₂ en la atmósfera, en la productividad potencial (Figura 2).

4.2.1. Selección de los cultivos y sitios de referencia para pronosticar los rendimientos

Una de las principales preocupaciones de la sociedad científica mundial relacionadas con el cambio climático es la probable alteración de los agroecosistemas, incluyendo la alteración de la productividad agrícola (Bhatti *et al.*, 2006; IPCC, 2007b; Newton *et al.*, 2007).

El mecanismo básico de la respuesta fisiológica de los cultivos al cambio climático comienza a entenderse. Lo que parece quedar claro es que la respuesta general de las plantas, con mecanismos fotosintéticos C3 y C4, a las concentraciones crecientes de CO₂ en la atmósfera es diferente. Se sabe que, aun cuando pueda producirse un fenómeno de aclimatación fotosintética, un incremento en la concentración de CO₂ en el aire mejorará al menos las tasas fotosintéticas iniciales de las plantas C3, lo que redundará probablemente en un mayor rendimiento. Por otro lado, la alta eficiencia fotosintética de las plantas C4 bajo las concentraciones actuales de CO₂

probablemente redundará en un efecto pequeño o nulo en el rendimiento (Newton *et al.*, 2007).

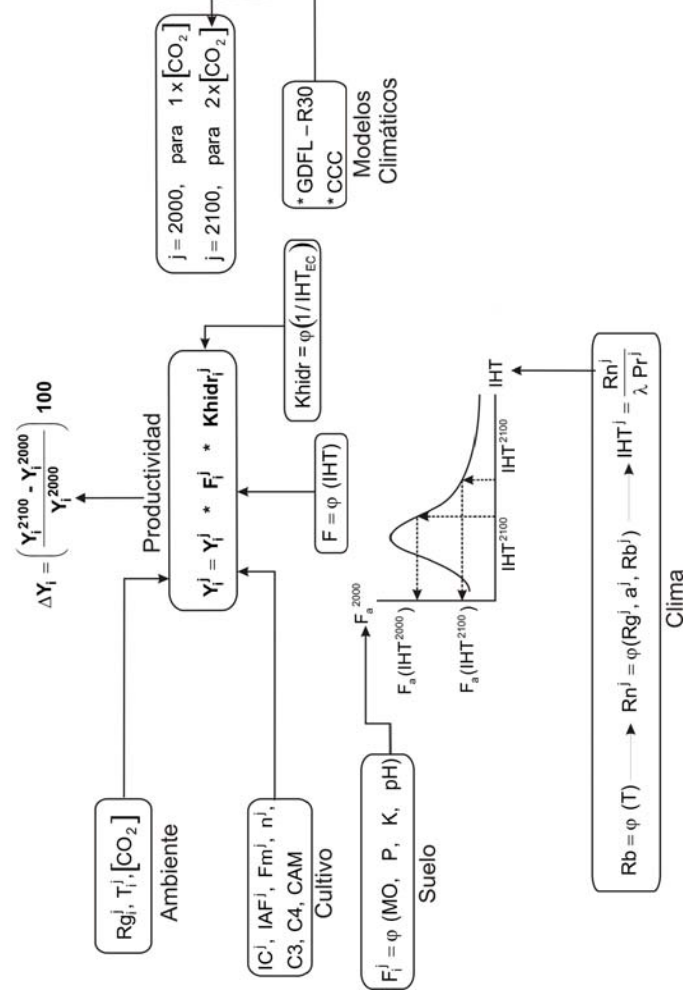


Figura 2. Esquema metodológico general para la estimación de cambios en los rendimientos de maíz y trigo de temporal bajo un escenario de cambio climático global.

Nota: **Variables climáticas:** T -Temperatura media; Rn: Radiación neta; Rg -Radiación global; Rb -Radiación de onda larga; Pr -Precipitación; IHT -Índice hidrotérmico local; **Constantes:** λ -Calor latente de vaporización del agua; α -albedo; **Propiedades del suelo:** MO, P, K, pH -Propiedades biológica y químicas de los suelos; F -Índice integral de fertilidad del suelo; **Características del cultivo:** IC -Índice de cosecha; IAF -Índice de área foliar; F_m -fotosíntesis máxima; n -duración del ciclo del cultivo; C3, C4, CAM -Rutas fotosintéticas; **Modelos climáticos:** -GFDL-R30 y CCC; **Cambios en la productividad:** $-\Delta Y_i^j$; cambio porcentual en el rendimiento en el sitio de referencia i y con el escenario climático j;

Los volúmenes de producción de maíz (*Zea mays* L.) ubicados en México en el cuarto lugar mundial, después de Estados Unidos, China y Brasil. El maíz ocupa el tercer lugar a nivel mundial en importancia como alimento, solo el trigo y el arroz son más importantes. El maíz ocupa, en México, la mayor superficie cultivada anualmente: 7 a 8.5 millones de hectáreas mayoritariamente en temporal y, a pesar de ser un país maicero, México importa anualmente de 3 a 7 millones de toneladas de las 20 o 26 millones de toneladas que consume (periodo 1995-2003). Los rendimientos de maíz son relativamente bajos respecto a los potenciales: los mayores rendimientos en temporal son de 5 t ha⁻¹ en Jalisco y 2 t ha⁻¹ el promedio nacional.

Lo anterior muestra las diferencias climáticas y edáficas de las zonas maiceras de México. De hecho, el maíz es un cultivo más sensible al estrés hídrico que otras gramíneas como trigo y sorgo (Muñoz y Hernández, 2004). Lo anterior le da al cultivo del maíz de temporal una justificación amplia, en términos de importancia sociocultural, alimenticia y por su superficie cultivada bajo condiciones de temporal, para su selección como cultivo de referencia en este trabajo.

Por otro lado, el trigo es el cultivo con mayor superficie destinada a la producción mundial, y el volumen de su cosecha es mayor que el de cualquier otro alimento. Este cereal es muy importante para la dieta alimentaria del pueblo mexicano. Con él se elaboran varios productos de consumo masivo, como el pan, tortillas, pastas, galletas y pasteles. No obstante su importancia en la alimentación, la superficie media anual cosechada de trigo de temporal (periodo 1989 a 1998), en el ciclo de primavera-verano, representó únicamente el 24.4% (687 509 ha) del área agrícola total de trigo). El rendimiento medio en este período fue de 1.7 t ha⁻¹ en temporal. La producción total mexicana de trigo durante los últimos diez años (1991-2000) fue de 35.7 millones de toneladas, concentrándose en los estados de Sonora, Guanajuato, Baja California, Sinaloa, Michoacán y Jalisco. La Región Noroeste aporta en promedio el 55% de la producción nacional del cereal y el Bajío el 28%, lo que conjuntamente representa más de las tres cuartas partes del total nacional. (SIAP, 2002).

No obstante lo anterior, las perspectivas del trigo de temporal son amplias para lograr incrementos importantes en la producción nacional (la autosuficiencia alimentaria). Se puede cultivar trigo en más de un millón de hectáreas en 16 estados de la república mexicana donde las condiciones de temperatura y precipitación son más adecuadas que para los cultivos maíz y frijol, que actualmente se siembran. La inversión bajo temporal es menor que bajo riego y las tierras son más baratas y el agua no cuesta. La brecha tecnológica por recorrer en trigo de temporal es tal que podrían obtenerse rendimientos promedios de 3 t ha⁻¹ en las zonas de cultivo actual y en las zonas potenciales a nivel nacional de 2.5 t ha⁻¹ (Villaseñor y Espitia, 2000; SIAP, 2002).

Considerando el déficit actual de trigo de 1.35 millones de hectáreas, estas podrían suplirse con la siembra de temporal de unas 600 mil hectáreas bajo condiciones de temporal. Para el año 2020 México demandará 6.5 millones de toneladas de los cuales 3 millones podrían obtenerse en 1.2 millones de hectáreas de siembra bajo temporal, situación que resulta factible (Villaseñor y Espitia, 2000).

El trigo de temporal que es importante en México es aquel que se siembra en el ciclo primavera verano y que en muchas zonas coincide con la época de lluvia. Los trigos de primavera no requieren de un periodo de frío para inducir su floración y hay desde los sensibles hasta los indiferentes al fotoperiodo. Las variedades insensibles son las que prácticamente se desarrollan bien en casi cualquier ambiente y época del año en México (Villaseñor y Espitia, 2000).

Ante la necesidad y oportunidad señaladas están los pronósticos de los cambios climáticos y sus probables impactos regionales en la productividad agrícola, generalmente negativos, para los cereales más importantes en la dieta mexicana; los cuales requieren una consideración atenta por lo que representan para la seguridad alimentaria nacional (IPCC, 2001b; Magrin *et al.* 2007; IPCC, 2007c).

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

- La inquietud científica relacionada con la respuesta fisiológica diferenciada al cambio climático global por su diferente mecanismo fotosintético;
- la importancia de estos cultivos en la alimentación humana en nuestro país;
- Por tratarse de cultivos asociados a sistemas de producción campesinos altamente vulnerables al cambio climático y con baja capacidad adaptativa;
- la situación de ser cultivos ampliamente estudiados a nivel mundial, y de amplia distribución en la geografía nacional, lo cual permite analizar su comportamiento en un amplio espectro de condiciones ambientales.

La selección del maíz se explica también por la razón de que existen estimaciones de su vulnerabilidad al cambio climático en México prácticamente sin consideración del efecto de alteración del suelo (Gay, 2003). Entonces, aparece la posibilidad de comparar los resultados de esta investigación con los datos publicados y de esta manera validar los resultados de este análisis.

Se reconoce que los cultivos de maíz y trigo de temporal tienen un área de distribución amplia en el país; por lo que los llamados sitios de referencia se seleccionaron para representar áreas de adaptación y producción de los cultivos en condiciones climáticas contrastantes. Las condiciones de temporal elegidas están relacionadas con las áreas más vulnerables al cambio climático por ser las que mayores dificultades presentan para la adaptación (por su mayor marginalidad). A veces los sitios seleccionados de referencia casi coinciden con los sitios considerados en investigaciones previas sobre impacto de cambio climático en el rendimiento de maíz (pero no se tienen pronósticos para el trigo).

4.2.2. Pronóstico de los rendimientos de maíz y trigo

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

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

Donde:

Y^j es la productividad agrícola (en kg ha^{-1}) en un sitio de referencia para los escenarios climáticos al inicio del siglo XXI ($j=2000$) o en su final ($j=2100$), para el cual se considera el caso de duplicación de la concentración de CO_2 ;

Y_{\max}^j es el 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 kg ha^{-1});

K_{hidr}^j es el 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 es el índice integral de fertilidad del suelo agrícola (adimensional), el cual varía de cero a uno.

Es necesario mencionar que esta ecuación ha sido ampliamente utilizada en el mundo para evaluar la vulnerabilidad de los cultivos agrícolas al cambio climático (FAO-IIASA, 2000). Sin embargo, como regla el componente F_a^j prácticamente no se considera en estas evaluaciones (ver el apartado 5.3). Esto se explica por la dificultad de estimar el efecto del cambio climático sobre la alteración de la fertilidad del suelo. Afortunadamente, gracias a los trabajos desarrollados durante los últimos años apareció la posibilidad de tomar en cuenta el factor F_a^j (Contreras *et al.*, 2001; Nikolskii *et al.*, 2002; etc.).

Para calcular los rendimientos Y^{2000} en los mismos sitios de referencia para las condiciones climáticas existentes o escenario base ($1xCO_2$) 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_2 ($2xCO_2$) 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}). Considerando el objetivo principal de este trabajo, el interés está centrado en estimar los cambios en los rendimientos debidos al cambio climático, y no en los rendimientos absolutos. Tal enfoque responde más al problema de vulnerabilidad de los cultivos al cambio climático global y además simplifica el análisis. La estimación de los cambios relativos en el rendimiento de los cultivos de maíz y trigo de temporal (ΔY , en %), producidos durante un siglo en algunos sitios geográficos de referencia, se realizó con la siguiente ecuación:

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

Donde:

Y_{\max}^{2100} y Y_{\max}^{2000} son los rendimientos de los cultivos, calculados para las condiciones climáticas pronosticadas para el final del siglo XXI ($2xCO_2$) y existentes en el final del siglo XX ($1xCO_2$), respectivamente;

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

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

$(F_a^{2100})/(F_a^{2000})$ es la 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. Es decir, se ignora 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 sitio de referencia.

4.2.2.1. Cálculo del rendimiento potencial

El cálculo de la biomasa y el rendimiento potencial o máximo Y_{\max}^j (en $kg\ ha^{-1}$) de maíz y trigo de temporal 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 corresponde al rendimiento potencial máximo o 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 o la fracción de B_n correspondiente al producto agrícola (adimensional).

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

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

Donde:

b_{gm} es la 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 CO_2 en la atmósfera y de la radiación global (o más bien de la radiación fotosintéticamente activa); n es la duración del ciclo normal del cultivo (en días);

C_t es la fracción de la tasa de producción de biomasa bruta (como CH_2O) que se pierde por la respiración de mantenimiento, la cual depende de tipo de cultivo (leguminosa o no leguminosa) y de la temperatura media del aire ($\text{kg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$); L es la fracción de la tasa máxima de crecimiento del cultivo, por cobertura incompleta del terreno cuando $\text{IAF} < 5$ (adimensional).

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

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

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°C (de 0.0108 para plantas no leguminosas).

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

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

Para calcular los valores de b_{gm} se estimó la tasa máxima de producción de biomasa, P_m (en $\text{kg CH}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$). Los valores de b_{gm} se calcularon con las expresiones siguientes:

Para $P_m \geq 20 \text{ kg CH}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$:

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

Para $P_m < 20 \text{ kg CH}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$:

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

Donde:

b_o o b_c son las tasas brutas de producción de materia seca para un cultivo de referencia hipotético ($\text{kg CH}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) en días completamente nublados y días completamente despejados, respectivamente, con dosel cubriendo completamente el terreno y una tasa máxima de producción de biomasa de $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$;

N es un parámetro adimensional dependiente de la radiación fotosintéticamente activa teórica o potencial diaria con el cielo totalmente despejado Ac (en $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y de la radiación global de onda corta Rg (en $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$):

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

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 $Y_{m\text{áx}}^{2000}$ se realizó utilizando información bibliográfica sobre IC , n , IAF , ruta fotosintética, P_m , b_o , b_c y datos regionales sobre inicio y duración del ciclo de los cultivos de maíz y trigo de temporal en México obtenidos del Anexo VII de la publicación FAO-IIASA (2000) y la publicación de Driessen y Konijn (1992). Los valores utilizados de estos parámetros pueden verse en los Anexos G y H.

La estimación de $Y_{m\text{áx}}^{200}$ consideró que, según Cure y Acock (1986) y Anthony y Ziska (2000), 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 CO₂ en la atmósfera. El IAF también se considera sin cambio. La duración del ciclo del cultivo, n, se considera sin cambio, debido a que en la metodología no se consideran cambios en la fenología de los cultivos; 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 CO₂ 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:

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

Donde:

$\Delta Y_{\text{máx}}$ se expresa en %.

4.2.2.2. Cálculo del índice hídrico

El índice hídrico K_{hidr} considera el cambio en la disponibilidad del agua de suelo para los cultivos agrícolas en el transcurso de su desarrollo. Este índice se calcula de diferentes maneras (Doorenbos y Kasam, 1980; Frère y Popov, 1986):

- a través del balance de agua en la zona radical o
- a través de relación entre los valores mensuales de la precipitación Pr y evapotranspiración potencial ET_{pot}.

Ignorando el escurrimiento superficial y considerando el balance mensual de agua en la zona radical de perfil del suelo, se puede calcular la humedad volumétrica media θ_{med} de la zona radical con profundidad z:

$$\theta_{med} = \theta_{inic} + \frac{Pr - ET_{real} \pm q}{2Z} \quad (23)$$

Donde:

θ_{inic} es la humedad de la misma zona al inicio de cada mes;

Pr es la precipitación durante este mes;

ET_{real} es la evapotranspiración real durante este mes;

q es intercambio de agua entre la zona radical y estrato inferior.

El valor calculado de θ_{med} se compara con el valor óptimo para el cultivo θ_{opt} y después se calcula el K_{hidr} en función de proporción $\theta_{med}/\theta_{opt}$ (Taylor, 1972; Hagan *et al.*, 1987).

Para calcular el balance hídrico de la zona radical es necesario saber ET_{real} , la cual depende de la evapotranspiración potencial ET_{pot} y la humedad del suelo θ_{med} . Además, es necesario saber q, lo que es complicado. Por la complicación del cálculo de q y por su pequeño valor, frecuentemente el valor de q se ignora en los cálculos del balance hídrico del suelo. Considerando la aproximación de los pronósticos climáticos existentes y, además, el carácter regional de este estudio, este enfoque fue rechazado como complicado sin beneficios claros para pronosticar la vulnerabilidad de los cultivos al cambio climático.

En este trabajo se utilizó el segundo enfoque, basado en el análisis de la proporción mensual Pr/ET_{pot} . En la publicación de Koster y Suárez (1999) se ha hecho un análisis especial sobre la posibilidad del uso del índice IHT para estimar la proporción Pr/ET_{pot} y se ha concluido que la proporción $\lambda Pr/Rn$ puede utilizarse como medida de Pr/ET_{pot} ; especialmente cuando el objetivo de la investigación consiste en la comparación relativa de las proporciones Pr/ET_{pot} , correspondientes a diferentes tratamientos. En nuestro caso se hace la comparación entre los rendimientos

$\gamma^{2100} / \gamma^{2000}$ y los índices hídricos $K_{\text{hidr}}^{2100} / K_{\text{hidr}}^{2000}$. Por esta razón se consideró apropiado

aplicar la aproximación:

$$K_{\text{hidr}} = \frac{Pr}{ET_{\text{pot}}} \cong \frac{Pr}{\lambda Rn} = \frac{1}{IHT} \quad (24)$$

Para calcular los valores promedio K_{hidr} (adimensional) de la Ecuación 13 correspondientes al período de crecimiento del cultivo con una duración de $m+1$ meses, se ha utilizado la ecuación siguiente:

$$K_{\text{hidr}}^j = \frac{1}{m+1} \sum_{i=1}^{m+1} \frac{1}{IHT_i^j} \quad (25)$$

Cuando $K_{\text{hidr}}^j > 1$ se considera $K_{\text{hidr}}^j = 1$

Donde:

IHT_i^j son los valores promedio mensuales del índice hidrotérmico durante los meses que dura el ciclo de cada cultivo con duración de $i = m$ meses al final del siglo XX ($j = 2000$) y final del siglo XXI ($j = 2100$).

La condición si $K_{\text{hidr}}^j > 1$ corresponde al caso de exceso de agua en el terreno agrícola. En este caso se considera $K_{\text{hidr}}^j = 1$ lo que supone que con medidas agrotécnicas se evitan los casos de exceso de humedad en el suelo y los daños correspondientes al cultivo.

Los valores de IHT se calculan con la Ecuación 1 para cada uno de los meses correspondientes al ciclo de cada cultivo, utilizando los valores de las variables climáticas del año promedio. El cálculo del IHT parte de un mes anterior al inicio del ciclo del cultivo para considerar la humedad residual. En este caso, en los cálculos del IHT, los valores Rn fueron distintos a los calculados para los terrenos vírgenes debido básicamente a la diferencia en el albedo de la superficie del cultivo con respecto a los albedos de la vegetación natural.

Las láminas mensuales de precipitación $Pr_i^{j=2000}$ y $Pr_i^{j=2100}$, respectivamente, al final del siglo XX y 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).

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

$$\Delta K_{\text{hidr}} = \left(\frac{K_{\text{hidr}}^{2100} - K_{\text{hidr}}^{2000}}{K_{\text{hidr}}^{2000}} \right) 100 = \left(\frac{K_{\text{hidr}}^{2100}}{K_{\text{hidr}}^{2000}} - 1 \right) 100 \quad (26)$$

Donde:

ΔK_{hidr} se expresa en %.

4.2.2.2.1. Cálculo de los componentes de la radiación neta promedio mensual

La radiación neta al final de los siglos XX y XXI ($Rn_i^{j=2000}$ y $Rn_i^{j=2100}$) para mes i se estima para las superficies con vegetación natural y con cultivo de temporal con la fórmula siguiente (Burman y Pochop, 1994):

$$Rn_i^j = (1 - \alpha_i^j) Rg_i^j - Rb_i^j \quad (27)$$

Donde:

$Rg_i^{j=2000}$ y $Rg_i^{j=2100}$ son los datos mensuales de la radiación solar global (en $\text{MJ m}^{-2} \text{mes}^{-1}$). Los valores $Rg_i^{j=2000}$ se estimaron con la metodología propuesta por

Tejeda y Vargas (1996). Los valores $Rg_i^{j=2100}$ se obtuvieron multiplicado $Rg_i^{j=2000}$ 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.

α es el albedo de las superficies con vegetación natural y con los cultivos agrícolas (adimensional). El valor de albedo utilizado para los cultivos de maíz y trigo fue el mismo y de valor igual a 0.20 (Burman y Pochop, 1994; Torres, 1995). Se supuso que los valores de α para el mismo cultivo no se cambian por el cambio climático y por eso son iguales al final de los siglos XX y XXI: $\alpha_i^{j=2000} = \alpha_i^{j=2100}$.

Rb_i^{2000} y Rb_i^{2100} son los valores promedio mensuales del balance de radiación de onda larga (en $\text{MJ m}^{-2} \text{mes}^{-1}$) en el inicio y final del siglo XXI. Rb_i^{2000} es el valor del balance de radiación de onda larga calculado para el escenario base ($1 \times \text{CO}_2$). Rb_i^{2000} se calculó en función de la temperatura del aire normal mensual, la presión de vapor actual y la cantidad relativa de horas de brillo solar.

La estimación del balance de radiación de onda larga para el escenario de cambio climático, Rb_i^{2100} , se realizó mediante un modelo estadístico que correlaciona el balance de radiación de onda larga (Rb) con el valor de la temperatura del aire; obtenido mediante regresión entre los valores estimados de Rb_i^{2000} y la temperatura del aire promedio mensual.

4.2.2.2. Estimación de la radiación global y del balance de radiación de onda larga promedio mensual

A partir de las normales climatológicas se seleccionaron las estaciones meteorológicas que cuentan con la información promedio mensual para estimar los componentes de la radiación neta: radiación global (Rg) y el balance de radiación de onda larga (Rb). Los datos necesarios para estimar Rg son el número de días nublados (Nub), número de días medio nublados (MedNub), número de días despejados (Desp) y latitud (ϕ) del lugar de ubicación de la estación meteorológica. Los datos necesarios para estimar Rb son la temperatura media (T_m), temperatura mínima ($T_{\text{mín}}$) y temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$).

Una vez seleccionadas las estaciones meteorológicas con los datos climatológicos mencionados, se realizó la verificación de sus coordenadas geográficas y altitud. Esto es con dos propósitos fundamentales:

- detectar posibles errores en los valores de estas variables y

- asignar los valores de estas variables, pues aun cuando varias estaciones cuentan con los datos climatológicos, éstas no tienen especificada información relacionada con sus coordenadas geográficas.

Las estimaciones de la radiación global y el balance de radiación de onda larga se realizan como sigue:

1. Se estimó el valor promedio diario para el día juliano representativo (DJ) de cada mes (Cuadro 3).
2. Este valor se multiplica por el número de días del mes respectivo (NDm), para obtener los valores mensuales.
3. Los valores mensuales se suman para obtener el valor anual de las variables.

Cuadro 3. Días representativos y número de días por mes para estimar valores promedios mensuales

MES	DJ	NDm	MES	DJ	NDm
Enero	17	31	Julio	198	31
Febrero	47	28	Agosto	228	31
Marzo	75	31	Septiembre	258	30
Abril	105	30	Octubre	288	31
Mayo	135	31	Noviembre	318	30
Junio	162	30	Diciembre	345	31

Nota: DJ es el día juliano del año; NDm es el número de días del mes

4.2.2.2.1 Estimación de la radiación solar global al final del siglo XX

La radiación global se estimó con el modelo propuesto por Glover y McCulloch modificado por Ometto (Szokolay, 1978):

$$R_g^{2000} = R_e \left[0.29 \cos L + 0.51 \left(\frac{S_D}{100} \right) \right] \quad (28)$$

Donde:

R_g^{2000} es la irradiación global diaria media mensual ($MJ m^{-2} día^{-1}$),

R_e es la radiación solar extraterrestre, ($MJ m^{-2} día^{-1}$),

L es la latitud del lugar ($^{\circ}$) y

S_D es el porcentaje de cielo diurno despejado (%).

La radiación solar teórica extraterrestre se calculó con la siguiente expresión (Seller, 1965):

$$R_e = \frac{CS}{\pi} \left[\frac{\bar{d}}{d} \right]^2 \left[\omega_{hs} \left\{ \frac{\pi}{180} \right\} \sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \sin \omega_{hs} \right] \quad (29)$$

Donde:

R_e es la radiación solar teórica extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$),

CS es la constante solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$). $CS = 1\,367 \text{ W m}^{-2} = 118.1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (Frolich, 1982) y ω_{hs} es el ángulo horario de la puesta del sol ($^\circ$).

Según Duffie y Beckman (1980):

$$\left[\frac{\bar{d}}{d} \right]^2 = 1 + 0.034 \cos \left[\frac{360 D}{365.25} \right] \quad (30)$$

Donde:

$\left[\frac{\bar{d}}{d} \right]^2$ son las variaciones en la distancia entre el sol y la tierra (adimensional),

D es el día juliano (1=1 enero...365=31 diciembre),

\bar{d} es la distancia media del sol a la tierra; d es la distancia actual entre la tierra y el sol.

$$\omega_{hs} = \cos^{-1}(-\tan \delta \tan L) \quad (31)$$

Donde:

δ es la declinación del sol ($^\circ$) y

L es la latitud ($^\circ$).

La declinación solar se calculó con la siguiente Ecuación (Cooper, 1969):

$$\delta = 23.5 \sin \left[\frac{360 (D + 284)}{365} \right] \quad (32)$$

El porcentaje de cielo diurno despejado se calculará con la siguiente fórmula (Tejeda y Vargas, 1996):

$$\frac{S_D}{100} = 0.31 + 0.48 PQ \quad (33)$$

Donde:

PQ es el complemento de la nubosidad puntual media mensual; el cual se calcula con la fórmula siguiente:

$$PQ = \frac{Desp + 0.5MedNub}{Nub + MedNub + Desp} \quad (34)$$

Donde:

Nub es el número de días nublados (6 a 8 octas),

MedNub es el número de días medio nublados (3 a 5 octas) y

Desp es el número de días despejados (menos de 3 octas).

Estos datos se obtuvieron de las Normales Climatológicas 1951-1980.

4.2.2.2.2 Estimación de la radiación de onda larga al final del siglo XX

El autor Brunt (1934) propone la siguiente relación empírica para estimar la radiación efectiva de onda larga (Rb^{2000} , $MJ m^{-2} dia^{-1}$):

$$Rb^{2000} = (0.90 \frac{n}{N} + 0.10) (0.34 - 0.14 e_a^{0.5}) \sigma T^4 \quad (35)$$

Donde:

$\sigma=4.9 \times 10^{-9}$ es la constante de Stefan-Boltzmann ($MJ m^{-2} K^{-4}$),

e_a es la presión de vapor del aire (kPa),

T es la temperatura del aire (K),

n/N es la relación entre el número real de horas de sol (n) y el número máximo de horas de sol o fotoperiodo (N).

La estimación del balance de radiación de onda larga se realizó para el período diurno y para el período nocturno. Para tal efecto se requiere de algunas

modificaciones, referentes a la temperatura, en la Ecuación 35. Los cambios son los siguientes: para estimar Rb_d diurno, en la fórmula ya citada se utiliza la temperatura diurna promedio en lugar de la temperatura media y para estimar Rb_n nocturno se utiliza la temperatura nocturna promedio y se elimina el factor de corrección por nubosidad $(0.10 + 0.9 n/N)$. Así el promedio diario mensual del balance de radiación de onda larga es: $Rb = Rb_d + Rb_n$. Driessen y Konijn (1992) proponen las siguientes expresiones para la estimación de la temperatura diurna y la temperatura nocturna promedio:

$$T_d = T_m + (\text{SUNSET} - 14) * \text{AMPL} * \text{sen}(\text{AUX}) / (N * \text{AUX}) \quad (36)$$

$$T_n = T_m - \text{AMPL} * \text{sen}(\text{AUX}) / (\pi - \text{AUX}) \quad (37)$$

Donde:

$$T_m = (T_{\text{max}} + T_{\text{min}}) / 2$$

$$\text{AMPL} = (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) / 2$$

$$\text{SUNRISE} = 12 - N / 2$$

$$\text{SUNSET} = 12 + N / 2$$

$$\text{AUX} = \pi * (\text{SUNSET} - 14) / (\text{SUNRISE} + 10)$$

N = Fotoperíodo, horas

T_m = Temperatura media mensual, °C.

T_{max} = Temperatura máxima media mensual, °C.

T_{min} = Temperatura mínima media mensual, °C.

AMPL = amplitud, °C

SUNRISE = hora de la salida del sol, horas

SUNSET = hora de la puesta del sol, horas

$$\pi = 3.1416$$

Finalmente, Tejeda *et al.* (1999) propusieron estimar la tensión de vapor actual con la Ecuación siguiente:

$$e_a = 0.1 \left[a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i (T_{\text{min}})^i \right] \quad (38)$$

Donde,

e_a es la tensión de vapor actual (kPa),

0.1 es un factor de conversión de unidades de mb a kPa,

$$a_0 = 7.5, \quad a_1 = 8.5 \times 10^{-2}, \quad a_2 = 3.7 \times 10^{-2}, \quad a_3 = -1.7 \times 10^{-3}, \quad a_4 = 1.9 \times 10^{-4} \quad y$$

$a_5 = -5.0 \times 10^{-6}$ y T_{\min} es la temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$).

4.2.2.2.3. Determinación del albedo promedio anual para la vegetación natural típica para diferentes zonas climáticas de México

La determinación del albedo promedio anual para la vegetación natural típica para diferentes zonas climáticas de México se realizó con base en la información reportada en la publicación de Contreras (2000). Los valores de albedo reportados en la literatura se refieren a tipos de vegetación muy generales, incluyendo diferentes cubiertas relacionadas con doseles de cultivos. Por lo anterior, el autor anterior obtuvo nuevos valores de albedo a través de la comparación entre la vegetación natural que se reporta en la literatura y los tipos de vegetación natural que se obtuvo de las cartas digitales de uso de suelo escala 1:250 000. Esta comparación la realizó con la ayuda de la guía para la interpretación cartográfica de uso del suelo tomando en cuenta los siguientes factores:

- Densidad de la vegetación
- Persistencia del follaje
- Rangos de precipitación bajo la cual se desarrollan
- Especies de plantas que conforman la comunidad vegetal

Una vez realizada la comparación determinó si alguno de los valores de albedo reportados en la literatura correspondía a la vegetación natural presente en las zonas de estudio; cuando este no fue el caso, obtuvo el valor promedio de los albedos de la vegetación natural que se consideró más semejante a la vegetación presente en la zona de estudio. Los valores obtenidos para los diferentes tipos de vegetación natural, y utilizados en este estudio se reportan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Valores promedio de albedo (α) para los tipos de vegetación natural reportados por INEGI en las cartas de uso del suelo

Tipo de vegetación	Clave	Albedo		
		Mínimo	Máximo	Promedio
Selva alta perennifolia	Mp	0.05	0.09	0.07
Selva mediana subperennifolia	Mq	0.10	0.12	0.11
Selva mediana subcaducifolia	Ms	0.12	0.13	0.13
Selva baja caducifolia	BC	0.13	0.15	0.14
Mezquital	Mz	0.14	0.15	0.15
Mezquital secundario	Mk	0.14	0.15	0.15
Bosque de encino	Be	0.14	0.15	0.15
Palmar	VP	0.20	0.24	0.22
Sabana	Sa	0.20	0.24	0.22
Matorral desértico	Dm	0.24	0.27	0.26
Matorral crasicaule	Mc	0.24	0.27	0.26
Matorral espinoso-pastizal natural-nopalera	Me-Ph-Mn	0.25	0.28	0.27
Matorral sarco-crasicaule	Sn	0.25	0.28	0.27
Matorral subinerme-nopalera	Mb-Mn	0.25	0.28	0.27
Matorral subinerme-pastizal natural-nopalera	Mb-Ph-Mn	0.26	0.29	0.28
Matorral desértico subinerme	Dm(sub)	0.27	0.30	0.29
Matorral espinoso	Me	0.27	0.30	0.29
Matorral espinoso subinerme	Meb	0.27	0.30	0.29
Matorral espinoso tamaulipeco	Met	0.27	0.30	0.29
Matorral sarcocaula	S	0.27	0.30	0.29
Matorral subinerme	Mb	0.27	0.30	0.29
Matorral subinerme-pastizal natural	Mb-Pn	0.27	0.30	0.29
Matorral submontano	SM	0.27	0.30	0.29
Pastizal natural	Pn	0.27	0.30	0.29
Pastizal natural-matorral espinoso	Pn-Me	0.27	0.30	0.29
Matorral subinerme.pastizal halófilo	Mb-Ph	0.28	0.31	0.30
Pastizal halófilo-matorral espinoso	Ph-Me	0.28	0.31	0.30
Pastizal halófilo-matorral subinerme	Ph-Mb	0.28	0.31	0.30
Matorral espinoso-pastizal halófilo	Me-Ph	0.29	0.32	0.31
Matorral desértico inerme	Dm(in)	0.30	0.33	0.32
Matorral inerme, erosión	Mi(+)	0.30	0.33	0.32
Pastizal halófilo	Ph	0.30	0.33	0.32
Vegetación de dunas costeras	Vu	0.30	0.33	0.32
Vegetación halófila	Vh	0.30	0.33	0.32
Vegetación halófila espinosa	Mhe	0.30	0.33	0.32

4.2.2.4. Interpolación de los valores anuales de radiación global, balance de radiación de onda larga, y precipitación

Para cada pozo edafológico se obtuvieron los valores anuales de Rg^{2000} y Rb^{2000} . Los valores interpolados de estas variables permitieron calcular el valor de la radiación neta (Rn^{2000}) para cada sitio de ubicación del pozo edafológico. Los valores de Rn^{2000} y Pr^{2000} (también interpolada para cada pozo edafológico) permitieron estimar para cada pozo edafológico los valores IHT²⁰⁰⁰ para estos sitios. El procedimiento de interpolación de variables climáticas seguido fue el siguiente:

- Se construyó una base de datos con la información del nombre de la estación meteorológica, sus coordenadas geográficas y los valores obtenidos promedio anuales de las variables Rg^{2000} , Rb^{2000} y Pr^{2000} . La interpolación de Rg^{2000} , Rb^{2000} y Pr^{2000} se realizó por separado, y se generan superficies interpoladas. El proceso de interpolación se realizó con la ayuda del programa ArcInfo 8.3, utilizando el método Kriging puntual.
- Se obtuvo una base de datos con información del identificador del pozo edafológico, sus coordenadas geográficas, y el valor interpolado de cada variable climática correspondiente al pozo edafológico. Este proceso se realizó con el programa ArcInfo 8.3. La base de datos de pozos considera únicamente aquellos seleccionados para terrenos planos, con vegetación natural en la fecha que se realizó el muestreo y con datos de las propiedades biológicas y químicas de interés en esta investigación: Materia Orgánica, Fósforo, Potasio y pH.
- Con la base de datos anterior y el mapa digital de tipos de vegetación escala 1:250 000 se asignó a cada pozo el tipo de vegetación natural y con la información del Cuadro 2 se asigna a cada pozo un valor de albedo, correspondiente al tipo de vegetación natural encontrado al momento de realizar el perfil de suelo y la toma de muestras. Este proceso se realizó con el programa ArcInfo 8.3 y el programa Excel 2003. La base de datos resultante contiene además de la información anterior, el valor del albedo promedio anual.

- Una vez obtenidos los valores anuales de R_g , R_b para cada pozo edafológico y con los valores de albedo promedio anual (α) para cada tipo de vegetación natural, se procedió a realizar el cálculo de la radiación neta promedio anual (R_n) para cada pozo utilizando la Ecuación 27.

4.2.2.2.5. Cálculo del Índice Hidrotérmico Local

En el presente trabajo el cálculo del IHT tiene dos objetivos principales:

- determinación del índice hídrico K_{hidr} y
- estimación de la alteración de fertilidad del suelo agrícola atribuible al cambio climático.

El cálculo del IHT se realizó con la Ecuación 1 con los valores obtenidos de radiación neta (R_n) y los datos de la precipitación P_r . 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; etc.).

Para determinar los valores promedio mensuales de K_{hidr} se han calcularon los valores promedio mensuales de IHT para inicio y final del siglo XXI. 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.

4.2.2.3. Evaluación del cambio del índice integral de fertilidad del suelo causado por el cambio climático

Como fue señalado anteriormente la mayoría de los pronósticos existentes de vulnerabilidad de los cultivos agrícolas al cambio climático ignoran la alteración de fertilidad del suelo agrícola atribuible al cambio climático o consideran solamente algunos componentes de la fertilidad integral, principalmente las reservas de nitrógeno mineral en el suelo (Gay, 2003). En los casos de estimación del cambio de algunos componentes de la fertilidad del suelo se utilizan muchas relaciones principalmente empíricas entre las actividades microbiológicas y las condiciones

climáticas, lixiviabilidad y disponibilidad para los cultivos de los elementos nutritivos y los valores de pH, etc. (Newton *et al.*, 2007). Todo esto disminuye la confiabilidad en los resultados de pronóstico de alteración del índice integral de fertilidad del suelo F. En nuestro análisis se ha aplicado el método del IHT. El principio de este método fue descrito anteriormente en el capítulo 3.3.

Para aplicar este método se establecieron las gráficas de dependencia de las propiedades φ de los suelos vírgenes no usados en la agricultura y de los suelos agrícolas bajo temporal en función del índice climático IHT^{2000} para las condiciones climáticas promedio anuales del inicio del siglo XXI. En el trabajo presente las gráficas $\varphi(IHT^{2000})$ se establecieron para los terrenos poco inclinados (con pendientes menores de 3%) y para el grupo geomorfológico de los suelos automorfos formados *in situ* (es decir, de los suelos la formación de los cuales no depende del manto freático o los suelos ubicados en los terrenos con profundidades de los niveles freáticos mayores de 5 m aproximadamente). Se analizaron ante todo las propiedades que intervienen en el cálculo del índice integral de fertilidad del suelo; cantidad de materia orgánica, fósforo, potasio y valor de pH.

4.2.2.3.1. Tratamiento de los datos sobre algunas propiedades de los suelos vírgenes y agrícolas de temporal

Para establecer las gráficas $\varphi(IHT^{2000})$ se actualizaron los valores modales de las propiedades de los suelos vírgenes de México (MO, P, K, pH), los cuales ya se tienen en publicaciones anteriores, en función del IHT para fines del siglo XX (Contreras, 2000; Balbontín, 2004). Tales relaciones son representativas para grupos de suelos ubicados en terrenos geomorfológicamente homogéneos en altitudes de 0 a 2500 m, con pendientes menores de 3% (para ignorar el posible efecto de la erosión hídrica) y formados sobre subsuelos con textura y mineralogía similar. En el presente trabajo se han analizado suelos automorfos (cuya formación no depende de la profundidad del manto freático) y los formados *in situ*.

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

- a) Se partió del modelo digital de elevación del terreno escala 1:250 000 (con un tamaño de pixel de 200 por 200 metros) de la República Mexicana para clasificar el terreno con base en la pendiente. Se seleccionaron las áreas con pendiente menor a 3% utilizando el sistema ArcInfo 8.0.
- b) De la base de datos de perfiles de suelos se seleccionaron aquellos pozos edafológicos que estuvieran contenidos (considerando un área de influencia de 1 km de radio para cada pozo) en las áreas del territorio nacional con pendiente menor de 3% según el modelo digital de elevaciones clasificado en el punto anterior. Este proceso se realizó con el programa ArcInfo 8.3 y el mapa digital de vegetación.
- c) Con ayuda del mapa digital de uso del suelo se eliminaron los pozos que estuvieran en áreas con cobertura vegetal distinta a la vegetación natural. Este proceso se realizó con el programa ArcInfo 8.3.
- d) La base de datos obtenida en el punto anterior se volvió a filtrar eliminando aquellos perfiles que estaban clasificados por INEGI como tipo fluvisol e histosol, según la clasificación de la FAO.
- e) Se construyeron gráficas de dispersión de los datos para cada propiedad en función del IHT, para datos con altitud de 0 a 2500 msnm.
- f) 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.
- g) Considerando la distribución estadística de los datos se determinaron los valores modales para cada propiedad en cada intervalo de IHT; para estos valores modales se buscó un modelo estadístico para ajustar los datos utilizando el programa de cómputo Curve Expert, versión 3.11 (Hyams, 1997).
- h) Finalmente, se construyen gráficas que muestran la dependencia de los valores modales de las propiedades físicas y químicas de los suelos vírgenes

geomorfológicamente homogéneos en función del índice climático IHT (índice hidrotérmico local).

La metodología para obtener los intervalos de confianza $[X_{\min}^{\text{temp}}; X_{\max}^{\text{temp}}]$ de las propiedades X^{temp} de los suelos vírgenes y temporal 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 suelos vírgenes y de temporal MO^{temp} (IHT), pH^{temp} (IHT), K^{temp} (IHT), P^{temp} (IHT), F^{temp} (IHT). Para determinar los valores modales $F_{\text{modal}}^{\text{temp}}$ y límites de confianza $[F_{\min}^{\text{temp}}; F_{\max}^{\text{temp}}]$ del índice integral de fertilidad de los suelos de temporal, los valores modales $X_{\text{modal}}^{\text{temp}}$, así como los límites de confianza de algunas propiedades se han utilizado para calcular los valores modales $F_{\text{modal}}^{\text{temp}}$ y los intervalos de confianza correspondientes a estos índices dentro de cada intervalo del IHT establecido, utilizando la Ecuación 39 del cálculo del índice integral de fertilidad de los suelos F.

b) Según las investigaciones mencionadas anteriormente la distribución estadística de las propiedades de estos suelos vírgenes y agrícolas de temporal es lognormal. Para obtener los límites de confianza de variación de cada propiedad $[X_{\min}^{\text{temp}}; X_{\max}^{\text{temp}}]$ se han utilizado los intervalos de incremento del IHT establecidos en los trabajos mencionados arriba: 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, X_{medio} es el valor medio aritmético de esta propiedad en cada intervalo del IHT. El conjunto de datos de X/X_{medio} correspondientes a todos los intervalos del IHT se ha considerado perteneciente a una generalidad estadísticamente homogénea.

c) Se han tomado los logaritmos naturales del conjunto de estos valores $\ln(X/X_{\text{medio}})$, valor medio $[\ln(X/X_{\text{medio}})]_{\text{medio}}$ y desviación estándar $\sigma_{\ln(X/X_{\text{medio}})}$ de

variación de los valores de $\ln(X/X_{\text{medio}})$ en todo el intervalo de cambio del índice IHT de 0.25 hasta 8.5 y en cada intervalo del IHT mencionado arriba.

d) En cada intervalo del IHT se han utilizado los valores de $\sigma_{\ln(X/X_{\text{medio}})}$ propios correspondientes a cada uno de estos intervalos simple y cuando habían mas de 30 datos de $\ln(X/X_{\text{medio}})$ en estos intervalos del IHT. En los casos en que había significativamente menos cantidad de datos de $\ln(X/X_{\text{medio}})$, se ha utilizado el valor de $\sigma_{\ln(X/X_{\text{medio}})}$ correspondiente a todo el intervalo del IHT de 0.25 a 8.5.

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

f) Finalmente se han tomado los antilogaritmos de los valores de $\ln(X_{\text{min}}^{\text{temp}}/ X_{\text{medio}})$ y $\ln(X_{\text{max}}^{\text{temp}}/ X_{\text{medio}})$ en cada intervalo del IHT y se han multiplicado estos antilogaritmos por los valores medios X_{medio} de cada propiedad correspondientes a cada intervalo del IHT. Así se han obtenido los intervalos de confianza de cambio de cada propiedad X en cada intervalo del IHT. Considerando la distribución real de los valores reales de cada propiedad, se han corregido los intervalos $[X_{\text{min}}^{\text{temp}}; X_{\text{max}}^{\text{temp}}]_{\text{calc}}$ calculados estadísticamente comparando los valores existentes en base de datos $[X_{\text{min}}^{\text{temp}}; X_{\text{max}}^{\text{temp}}]_{\text{dat}}$. El límite $X_{\text{min}}^{\text{temp}}$ dentro de cada intervalo del IHT fue establecido como máximo entre $[X_{\text{min}}^{\text{temp}}]_{\text{calc}}$ y $[X_{\text{min}}^{\text{temp}}]_{\text{datos}}$. El límite $X_{\text{max}}^{\text{temp}}$ dentro de cada intervalo del IHT fue establecido como mínimo entre $[X_{\text{max}}^{\text{temp}}]_{\text{calc}}$ y $[X_{\text{max}}^{\text{temp}}]_{\text{datos}}$.

4.2.2.3.2. Evaluación de la alteración de algunas propiedades del suelo y del índice integral de fertilidad por el cambio climático

Para pronosticar el cambio del índice integral de fertilidad del suelo agrícola bajo temporal en función de los escenarios del cambio climático, o en función de los escenarios del cambio del índice climático IHT (del IHT^{2000} al IHT^{2100}) se aplicó la metodología siguiente:

- La evaluación de la alteración de las propiedades de los suelos y del índice integral de fertilidad de los suelos atribuibles al cambio climático global, bajo

condiciones de temporal, se realizó con el método del IHT descrito en el capítulo 3.3.

- Para realizar este método se estableció la gráfica F_v^{2000} (IHT²⁰⁰⁰) que relaciona el índice integral de fertilidad del suelo virgen no usado en agricultura, F_v^{2000} , calculado con la Ecuación 39 de Pegov y Jomyakov (1991), y el índice hidrotérmico local, IHT.
- Los valores modales de la fertilidad de los suelos se obtuvieron a partir de los valores modales de las gráficas MO_v (IHT), K_v (IHT), P_v (IHT) y pH_v (IHT). Los valores modales de estas propiedades son típicos para áreas grandes y para las condiciones climáticas de fin del siglo XX.

$$F_v^{2000} = 0.46 \frac{MO_v^{2000}}{MO_{v \max}^{2000}} + 0.28 \sqrt{\frac{P_v^{2000}}{P_{v \max}^{2000}} \frac{K_v^{2000}}{K_{v \max}^{2000}} + 0.26 e^{-\left(\frac{pH_v^{2000} - 7}{2}\right)^2}} \quad (39)$$

La gráfica F_v^{2000} (IHT²⁰⁰⁰) fue utilizada para pronosticar el valor F_v^{2100} correspondiente al final del siglo XXI, para los suelos de temporal con bajo nivel de entrada de fertilizantes (insumos). El uso de esta gráfica se basa en la consideración de que la relación establecida refleja la ley geográfica de zonificación de suelos, por lo que se supone que esta relación debe conservarse independiente de los cambios climáticos.

Es decir, los cambios climáticos relativamente lentos provocan que las propiedades de suelos, que definen el valor del índice F_v , lleguen al equilibrio con las nuevas condiciones climáticas, conservando la relación F_v^{2000} (IHT²⁰⁰⁰). La duración de los cambios en las propiedades es diferente para cada una de las propiedades, pero en general la duración de un siglo es un tiempo suficiente para el establecimiento del nuevo equilibrio (Arnold *et al.*, 1990).

El principio de determinación de la alteración del índice integral de fertilidad del suelo agrícola de temporal, causada solamente por el cambio climático e ignorando otros

efectos posibles en esta alteración (cambio de la tecnología agrícola, dosis de fertilizantes, tipo del cultivo agrícola, etc.), es el siguiente. Si en una región con el índice climático IHT^{2000} se puede determinar el cambio del índice de fertilidad del suelo virgen del valor F_v^{2000} al final del siglo XX hasta F_v^{2100} al final del siglo XXI en relación solamente con el cambio climático, entonces el valor del índice F_a^{2100} del suelo agrícola de temporal se puede estimar así:

$$F_a^{2100} = F_a^{2000} + (F_v^{2100} - F_v^{2000}) \quad (40)$$

Donde:

F_v^{2000} es el valor conocido del índice de fertilidad del suelo virgen al final del siglo XX.

Considerando que el objetivo en este trabajo es estimar la proporción $\frac{F_a^{2100}}{F_a^{2000}}$, esta

ecuación se puede reescribir en la forma siguiente:

$$\frac{F_a^{2100}}{F_a^{2000}} = 1 + \frac{F_v^{2000}}{F_a^{2000}} \left(\frac{F_v^{2100}}{F_v^{2000}} - 1 \right) \quad (41)$$

Las investigaciones anteriores sobre las relaciones F_v^{2000} (IHT^{2000}) y F_a^{2000} (IHT^{2000}), señalan que en México no hay diferencia estadísticamente significativa entre estas relaciones (Nikolskii *et al.*, 2001; Contreras *et al.*, 2002; Balbontín, 2004). Entonces, se puede considerar que:

$$\frac{F_v^{2000}}{F_a^{2000}} \approx 1 \quad (42)$$

Y

$$\frac{F_a^{2100}}{F_a^{2000}} \approx \frac{F_v^{2100}}{F_v^{2000}} \quad (43)$$

Es decir, que el grado de alteración del suelo agrícola de temporal es aproximadamente igual al grado de alteración del suelo virgen, si solamente se considera el efecto de cambio climático en la alteración de fertilidad del suelo.

Por lo anterior, y con base en los escenarios existentes del cambio climático en diferentes partes de México al final del siglo XXI (Gay, 2003), se calcularon los valores promedio anuales de IHT^{2100} , a partir de los valores pronosticados de Rn^{2100} , Rg^{2100} , Rb^{2100} y Pr^{2100} . Los valores de IHT^{2100} permiten entrar a la gráfica $F_v^{2000}(IHT^{2000})$ y leer el nuevo valor modal F_v^{2100} . La metodología de determinación

de la proporción $\frac{F_v^{2100}}{F_v^{2000}}$ esquemáticamente se explica en la Figura 3.

Finalmente se calcula la diferencia entre los índices integrales de fertilidad al final e inicio del siglo XXI:

$$\Delta F = \left(\frac{F_v^{2100} - F_v^{2000}}{F_v^{2000}} \right) 100 = \left(\frac{F_v^{2100}}{F_v^{2000}} - 1 \right) 100 \quad (44)$$

Donde:

ΔF se expresa en %.

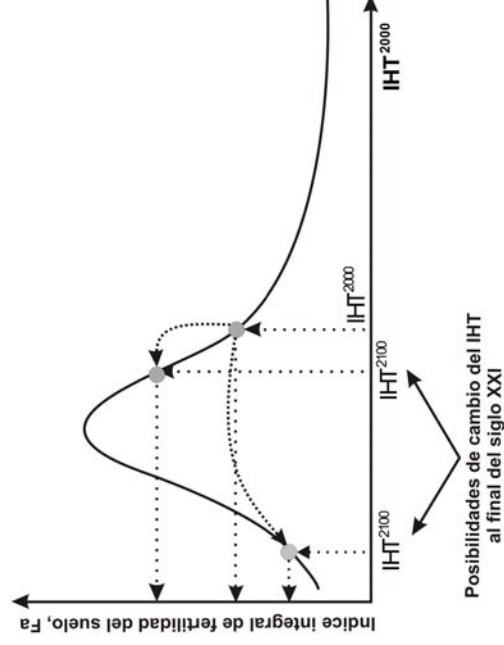


Figura 3. Esquema de pronóstico de cambio del índice integral de calidad del suelo, F, en función del pronóstico de cambio del IHT por el cambio climático global.

Las etapas metodológicas para realizar la evaluación de la alteración de las propiedades de los suelos agrícolas con el índice integral de fertilidad de los suelos fueron las siguientes:

- 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 o templadas, y tropicales húmedas y secas.
- Se estimó el valor del albedo promedio anual para los cultivos agrícolas de maíz y trigo de temporal.
- El valor del albedo anual se sustituyó en la Ecuación 27 para estimar el valor de la radiación neta (R_n), obteniéndose el valor para condiciones de uso agrícola de temporal (R_{n1})
- El valor regional del índice hidrotérmico local para los sitios agrícolas de temporal se calculó como sigue: $IHT = R_{n1} / (L * Pr)$.
- Se obtuvo el valor regional del índice integral de fertilidad de los suelos agrícolas con la Ecuación 39.

Los cambios en los suelos como resultado del cambio del IHT se evaluaron como sigue:

- Con la ayuda de las gráficas de la relación de dependencia entre propiedades biológicas y químicas de los suelos y del índice integral de fertilidad y el índice hidrotérmico local se hizo la comparación entre los valores modales que alcanzan estas propiedades de los suelos con el IHT^{2000} en condiciones de vegetación natural (o uso agrícola de temporal) y los valores que alcanzan con el IHT^{2100} , obteniéndose el cambio relativo con la Ecuación 44.
- Según los cambios en los valores de cada una de estas propiedades se hace el pronóstico si el cambio en el IHT debido a la práctica agrícola puede mejorar o empeorar, a largo plazo, las propiedades biológicas y químicas de los suelos. Se asume que un siglo es un periodo adecuado para verificar el cambio de las propiedades biológicas y químicas analizadas (Cuadro 1).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Cambio del rendimiento potencial

5.1.1. Rendimiento potencial del cultivo de maíz de temporal

Se calculó el rendimiento potencial para el cultivo del maíz de temporal con bajo nivel de insumos, utilizando el conjunto de Ecuaciones (15-22), para diferentes sitios de referencia (Cuadro 5). Los sitios de referencia se encuentran en diferentes zonas climáticas de México: tropical húmedo, tropical seca, tierras altas o frías de altura y zonas áridas. Los sitios van de 2 a 2575 m sobre el nivel medio del mar. El rango latitudinal va de 18° 08' a 27° 05' (franja latitudinal de más de 9° de latitud norte). Las precipitaciones van de 365.3 mm de lámina de agua anual a 1800.4 mm. La temperatura media anual de 15.6 °C en Chapingo Estado de México a 27.7 °C en Arcelia Estado de Guerrero. La radiación global anual va de 6205 MJ m⁻² año⁻¹ en Tuxpan Estado de Veracruz a 7504 MJ m⁻² año⁻¹ en Izúcar de Matamoros Estado de Puebla.

Cuadro 5. Ubicación geográfica de los sitios de referencia seleccionados para el pronóstico del cambio en el rendimiento del maíz de temporal y las condiciones climáticas anuales al inicio del siglo XXI

Sitio de referencia	Estado	Latitud		Longitud	Altitud (msnm)	Rg ²⁰⁰⁰ (MJ m ⁻² año ⁻¹)	T ²⁰⁰⁰ (°C)	Pr ²⁰⁰⁰ (mm)	IHT ²⁰⁰⁰ (adim)
		Norte	Oeste						
Coatepec	Veracruz	19° 27'	96° 57'		1252	6449	19.3	1800.4	0.64
Tuxpan	Veracruz	20° 57'	97° 24'		2	6205	25.3	1493.0	1.03
Atacomulco	México	19° 48'	96° 57'		2524	6158	14.6	815.4	1.11
Jerécuaro	Guanajuato	20° 08'	100° 31'		1931	6588	17.6	809.4	1.30
La Huerta	Jalisco	19° 28'	104° 38'		500	6358	24.5	1026.3	1.32
Magdalena	Jalisco	20° 55'	103° 58'		1359	7366	21.0	1004.7	1.35
Zapopan	Jalisco	20° 43'	103° 22'		1575	7366	21.7	866.6	1.36
Arcelia	Guerrero	18° 17'	100° 16'		530	7442	27.7	1135.4	1.62
Chapingo	México	19° 30'	98° 53'		2250	6829	15.6	610.2	1.76
Izúcar de M.	Puebla	18° 37'	98° 28'		1285	7504	22.4	828.6	1.78
Ixcamilpa	Puebla	18° 02'	98° 42'		806	7150	25.8	803.9	1.96
Navojua	Sonora	27° 05'	109° 26'		54	6388	27.4	365.3	3.90

Nota: Los datos climáticos corresponden a los valores promedio anuales al inicio del siglo XXI (durante el periodo 1951-1980). Rg²⁰⁰⁰: radiación global, T²⁰⁰⁰: temperatura del aire, Pr²⁰⁰⁰: lámina de precipitación, e IHT²⁰⁰⁰: índice hidrotérmico local.

Se calcularon los incrementos de las principales variables climáticas durante la estación de crecimiento de los cultivos considerando los dos escenarios climáticos correspondientes al caso de duplicación de CO₂ 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 Cuadro 6 resume estos resultados, y muestra que los cambios en la radiación global obtenidos con los dos modelos climáticos coinciden y son negativos en 7 sitios geográficos en un -3.0%. La temperatura media durante la estación de crecimiento del cultivo de maíz se incrementa para los dos modelos siendo en general mayores los obtenidos con el modelo GFDL-R30 (de 7.9% a 15.4%) y menores los obtenidos con el modelo CCC (de 7.3% a 13.6%). La precipitación promedio durante la estación de crecimiento en los sitios de referencia tiene pronósticos contradictorios; el modelo GFDL-R30 pronostica aumentos en la precipitación (de 21.1% a 30.1%) y el modelo climático CCC pronostica decrementos (de -3.3% a -24.3%). El sitio de Navojoa en el Estado de Sonora los pronósticos de precipitación tienen el mismo signo debido a que el modelo climático CCC pronostica incrementos en la precipitación en la estación de crecimiento de otoño invierno.

Los pronósticos en las variables climáticas en general indican disminución pequeña en la radiación solar global, probablemente debido al aumento de la nubosidad (Gay, 2003). Según estos pronósticos se esperan aumentos consistentes en la temperatura del aire, lo que muy probablemente puede causar mayores tasas de desarrollo en el cultivo y un probable acortamiento de la duración del ciclo de desarrollo y condiciones de estrés hídrico por crecimiento de la tasa de evapotranspiración (Liverman y O'Brien, 1991). Las altas temperaturas también indican la posibilidad de altas tasas respiratorias, que si no se ven compensadas por incrementos en la productividad por un incremento en la acumulación de biomasa y grano, por aumento en la concentración de dióxido de carbono en el aire, probablemente signifiquen una disminución en los rendimientos potenciales. Según los pronósticos hay gran incertidumbre en el cambio de la precipitación, lo que no permite entender con claridad que va a pasar finalmente con el estrés hídrico.

Cuadro 6. Cambio en las variables climáticas (ΔRg , ΔT y ΔPr) durante la estación de crecimiento de maíz de temporal con bajo nivel de insumos, en una atmósfera con concentración de CO₂ duplicada

Sitio	Estado	Cambio climático (Gay, 2003)									
		$\Delta Rg(\%)$	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	$\Delta T(\%)$	$\Delta Pr(\%)$	GFDL-R30	CCC
Coatepec	Veracruz	-1.7	1.4	13.0	9.6	27.2	13.0	9.6	27.2	27.2	-13.6
Tuxpan	Veracruz	1.5	-1.8	10.4	8.3	21.1	10.4	8.3	21.1	21.1	-13.9
Atiacomulco	México	-4.1	-2.3	15.4	13.6	30.0	15.4	13.6	30.0	30.0	-10.5
Jerécuaro	Guanajuato	-5.3	0.0	12.9	11.3	30.0	12.9	11.3	30.0	30.0	-15.4
La Huerta	Jalisco	-4.0	-3.8	9.7	8.5	30.0	9.7	8.5	30.0	30.0	-5.7
Magdalena	Jalisco	-4.3	-5.9	10.5	10.1	29.0	10.5	10.1	29.0	29.0	-3.3
Zapopan	Jalisco	-4.4	-1.9	11.5	10.2	27.8	11.5	10.2	27.8	27.8	-12.1
Arcelia	Guerrero	-2.2	0.4	9.2	7.3	30.6	9.2	7.3	30.6	30.6	-23.5
Chapingo	México	-2.0	-0.2	14.6	12.3	27.1	14.6	12.3	27.1	27.1	-18.4
Izúcar de M.	Puebla	-1.9	0.0	10.6	8.5	30.1	10.6	8.5	30.1	30.1	-22.5
Ixcamilpa	Puebla	-2.1	-0.2	9.3	7.5	29.2	9.3	7.5	29.2	29.2	-24.3
Navojoa	Sonora	-2.0	-4.4	7.9	9.1	37.2	7.9	9.1	37.2	37.2	7.2

Nota: Rg: radiación global; T: temperatura de aire; Pr: precipitación; $\Delta Rg = (Rg^{2100} - Rg^{2000})/100/Rg^{2000}$; $\Delta T = (T^{2100} - T^{2000})/100/T^{2000}$; $\Delta Pr = (Pr^{2100} - Pr^{2000})/100/Pr^{2000}$; Los símbolos 2000 y 2100 corresponden al inicio y final del siglo XXI, respectivamente; Modelos de Circulación General de la Atmósfera: GFDL-R30, Laboratorio Geofísico de Dinámica de Fluidos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, Princeton, EEUU); CCC, Centro Climático del Servicio Meteorológico de Canadá.

El pronóstico de cambio en los rendimientos máximos se realizó utilizando un modelo basado en principios ecofisiológico derivado de Kassam (1977) y ampliamente utilizado a escala regional y mundial por FAO-IIASA (2000). En este trabajo se aplicó en los diferentes sitios de referencia para los escenarios 1xCO₂ y 2XCO₂, y para los modelos climáticos GFDL-R30 y CCC. El modelo fue alimentado con información relativa a características climáticas y del cultivo para el cálculo de la biomasa neta y el rendimiento. Esta información se relaciona con:

- a) el régimen de calor y radiación,
- b) el grupo de adaptabilidad del cultivo para determinar la tasa aplicable de fotosíntesis máxima, P_m ,
- c) la tasa de fotosíntesis máxima como función de la concentración de CO₂ en la atmósfera,
- d) la longitud del ciclo de crecimiento (emergencia a madures fisiológica),

- e) longitud del periodo de formación del rendimiento,
- f) índice de área foliar a tasa de crecimiento máxima, e
- g) índice de cosecha.

Los resultados del cálculo de los cambios en los rendimientos máximos se muestran en el Cuadro 7. En este Cuadro, los cambios en los rendimientos máximos están relacionados con las contribuciones individuales relacionadas con una mayor concentración de CO₂ 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 7. Cambios en la respuesta fisiológica y productiva del cultivo de maíz de temporal con bajo nivel de insumos en condiciones de cambio climático

Sitio	Estado	Δb_{gm} (%)			Δb_{m} (%)			ΔY_{max} (%)		
		GFDL-R30	CCC	CCC	GFDL-R30	CCC	CCC	GFDL-R30	CCC	CCC
Coatepec	Veracruz	22.3	22.2	22.2	46.5	39.8	39.8	-1.2	2.6	2.6
Tuxpan	Veracruz	7.1	4.7	4.7	21.8	16.1	16.1	0.6	-0.3	-0.3
Atlacomulco	México	9.9	10.7	10.7	37.1	34.7	34.7	5.1	6.5	6.5
Jerécuaro	Guanajuato	10.3	12.4	12.4	32.8	32.5	32.5	6.0	8.5	8.5
La Huerta	Jalisco	3.3	3.6	3.6	16.4	15.2	15.2	-2.2	-1.3	-1.3
Magdalena	Jalisco	9.9	8.3	8.3	26.8	24.1	24.1	5.0	3.7	3.7
Zapopan	Jalisco	14.2	15.5	15.5	34.0	33.4	33.4	8.8	10.7	10.7
Arcelia	Guerrero	4.5	6.5	6.5	46.5	39.8	39.8	-1.0	1.9	1.9
Chapingo	México	9.1	10.1	10.1	34.9	31.4	31.4	4.2	6.0	6.0
Izúcar de M.	Puebla	9.3	10.6	10.6	25.7	24.3	24.3	4.2	6.4	6.4
Ixcamilpa	Puebla	4.6	6.1	6.1	17.5	16.9	16.9	-0.5	1.8	1.8
Navojoa	Sonora	4.7	2.5	2.5	15.2	14.0	14.0	-0.8	-3.7	-3.7

Nota: Δb_{gm} : cambios relativos en la tasa máxima de producción de biomasa bruta de un cultivo de referencia (con índice de área foliar, IAF, igual a 5) (en kg ha⁻¹ día⁻¹), $\Delta b_{gm} = (b_{gm}^{2100} - b_{gm}^{2000})/100$; b_{gm}^{2000} : tasa promedio de pérdida de asimilados por respiración de mantenimiento durante el ciclo de crecimiento (kg ha⁻¹ d⁻¹); ΔY_{max} : cambios relativos en el rendimiento del cultivo de maíz de temporal (en %), $\Delta Y_{max} = (Y_{max}^{2100} - Y_{max}^{2000})/100$.

Si se considera que la fotosíntesis máxima en la hoja de maíz, para un escenario 2XCO₂, es pequeña y del orden del 10% del valor actual (Akita y Moss, 1973; Kimball

et al., 1990), explica los cambios pequeños obtenidos Δb_{gm} en el Cuadro 7, que da idea de la contribución del incremento en la concentración de CO₂ en la atmósfera en el rendimiento máximo. Por supuesto, una razón de porque un incremento en la concentración de CO₂ incrementa la tasa fotosintética (o cabe esperar que la incremente) 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 CO₂ se traducirá en un incremento de la tasa fotosintética (Kimball *et al.*, 1990). No obstante, la respuesta del maíz es pequeña y esto está relacionado 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 C4 (como el maíz). Así mientras que la respuesta fotosintética del maíz es muy pequeña a concentraciones de CO₂ en la atmósfera de 400 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ o mayores; las plantas como el trigo tienen una respuesta fotosintética importante hasta concentraciones de CO₂ de 800 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ (Kimball *et al.*, 1990). Con todo, el cambio climático global parece tener un efecto ligeramente positivo sobre el rendimiento potencial o máximo del maíz de temporal con bajo nivel de insumos. Por ejemplo, en las tierras de Valles Altos los pronósticos utilizando el modelo GFDL-R-30 permite estimar un cambio en el rendimiento de 5.8 ± 1.8 % (C.V. = 30.6%), y los pronósticos utilizando el modelo CCC permite estimar cambios de 7.1 ± 2.6 % (C.V.=37.4%). Esto significa que el cambio climático significará un pequeño mejoramiento de estas tierras, desde el punto de vista agroclimático, para el cultivo de maíz de temporal. La productividad potencial de las zonas tropicales de México no parece ser sensible al cambio de las variables temperatura y radiación solar global.

Según se muestra en el Cuadro 7, el modelo climático GFDL-R30 permite predecir un aumento en las tasas respiratorias de 15.2 al 46.5%, para los casos de Navojoa en la estación otoño-invierno y Arcelia en primavera-verano, respectivamente. El modelo CCC predice menores cambios en las tasas respiratorias (del 14 al 39.8%), muy relacionadas con los menores incrementos en la temperatura pronosticada.

Es importante mencionar que los aumentos en las temperaturas medias significan, según la nueva evidencia, aumentos en igual magnitud de la temperatura diurna y

nocturna (IPCC, 2007a). Si esto es cierto, primero, los incrementos de la temperatura aumentarán la tasa de desarrollo del cultivo de maíz, debido a que esta es una función de la temperatura media durante las 24 horas. Segundo, las altas temperaturas nocturnas disminuyen la duración del periodo de llenado de grano (Wilson *et al.*, 1973), lo que significa que incrementos paulatinos en las temperaturas nocturnas implicarán disminuciones progresivas en el rendimiento, pues disminuyen el número de días de fotosíntesis entre eventos fenológicos y el peso seco de la planta (Duncan, 1975). Lo anterior significa que la fotosíntesis está determinada por la temperatura diurna. De hecho, los ambientes con temperatura diurna más baja y constante desarrollan rápidamente. En investigaciones previas realizadas en una parcela experimental en Illinois con temperatura nocturna de 18.3 °C produjo un rendimiento de maíz 40% más alto que otro lote con una temperatura nocturna de 29.4 °C (Peters *et al.*, 1971). En realidad esta menor acumulación de fotosintatos en el grano está relacionada con la baja movilidad de sucrosa en los tallos, la cual no alcanzó a almacenarse en los granos (Evans, 1975). Lo anterior permite visualizar que si se tiene un incremento de las temperaturas nocturnas en las zonas de cultivo necesariamente el sostenimiento de los rendimientos debe implicar un desplazamiento de las zonas de cultivo a las partes más altas.

5.1.2. Rendimiento potencial del cultivo del trigo de temporal

Los sitios de referencia para el análisis del cultivo de trigo de temporal se muestran en el Cuadro 8. Los sitios abarcan la parte centro del país y la norte conocida como árida y semiárida. Las alturas sobre el nivel medio del mar van de 15 a 2408 m. Los valores de radiación global se encuentran entre los 6172 y los 7074 MJ m⁻² año⁻¹; las temperaturas medias anuales van de 13.4 a 20 °C y las precipitaciones van de 242 mm a 923.2 mm.

Los cambios climáticos en los sitios de referencia del cultivo de trigo de temporal son similares a los sitios elegidos para el caso del maíz de temporal (Cuadro 9). En principio se pronostican decrementos en la radiación solar (hasta menos del 4.2%). Los incrementos en la temperatura son mayores en el caso del escenario propuesto

con el modelo GFDL-R30. Otra vez los pronósticos para el caso de la precipitación son diferentes en signo. Este problema en los pronósticos se tiene a nivel mundial (IPCC, 2007a).

Cuadro 8. Ubicación geográfica de las áreas de referencia seleccionadas para el pronóstico del cambio en el rendimiento del trigo de temporal y las condiciones climáticas anuales al inicio del siglo XXI

Sitio	Estado	Latitud		Altitud (m)	Rg (MJ m ² año ⁻¹)	T ²⁰⁰⁰ (°C)	P ²⁰⁰⁰ (mm)	IHT ²⁰⁰⁰ (adim)
		Norte	Oeste					
Apizaco	Tlaxcala	19° 24'	98° 08'	2408	6282	13.4	825.9	1.11
Tepatitlan	Jalisco	20° 48'	102° 44'	1746	6877	20.0	923.2	1.37
Sombrerete	Zacatecas	23° 38'	103° 38'	2351	6588	16.7	623.1	1.69
San Felipe	Guanajuato	21° 28'	101° 12'	2102	6756	16.1	499.4	2.13
Charcas	S.L.P.	23° 08'	101° 07'	2057	7074	17.5	405.6	2.97
El Rosario	B.C.N.	30° 02'	115° 43'	15	6172	18.7	242.0	4.24

Nota: Los datos climáticos corresponden a los valores promedio anuales al inicio del siglo XXI (durante el periodo 1951-1980). Rg²⁰⁰⁰: radiación global, T²⁰⁰⁰: temperatura del aire, P²⁰⁰⁰: lámina de precipitación, e IHT²⁰⁰⁰: índice hidrotérmico local.

Cuadro 9. Cambio en las variables climáticas (ΔRg , ΔT y ΔPr) durante la estación de crecimiento del trigo de temporal con bajo nivel de insumos en una atmósfera con concentración de CO₂ duplicada

Sitio	Estado	Cambio climático (Gay, 2003)					
		$\Delta Rg(\%)$			$\Delta T(\%)$		
		GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC
Apizaco	Tlaxcala	-2.0	-0.2	8.8	14.2	27.4	-17.0
Tepatitlan	Jalisco	-4.2	-1.9	11.6	10.2	28.9	-14.6
Sombrerete	Zacatecas	-2.7	-0.4	14.1	12.6	26.7	-13.2
San Felipe	Guanajuato	-2.5	2.7	14.4	11.1	28.0	-24.9
Charcas	S.L.P.	-2.2	0.6	13.3	10.7	27.0	-16.9
El Rosario	B.C.N.	0.0	0.0	25.3	23.4	-16.1	-24.9

Nota: Rg: radiación global; T: temperatura de aire; Pr: precipitación; $\Delta Rg = (Rg^{2100} - Rg^{2000})/100/Rg^{2000}$; $\Delta T = (T^{2100} - T^{2000})/100/T^{2000}$; $\Delta Pr = (Pr^{2100} - Pr^{2000})/100/Pr^{2000}$; Los símbolos 2000 y 2100 corresponden al inicio y final del siglo XXI, respectivamente; Modelos de Circulación General de la Atmósfera: GFDL-R30, Laboratorio Geofísico de Dinámica de Fluidos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, Princeton, EEUU); CCC, Centro Climático del Servicio Meteorológico de Canadá.

Las tasas promedio de respiración de mantenimiento se encuentran entre 29.5 y 77.6% para el caso del modelo GFDL-R30 y entre 30.0 y 72.9% para el modelo CCC (Cuadro 10). Estos cambios están relacionados con la pérdida de fotoasimilados por degradación por respiración. Si bien son casi iguales a las obtenidas para el caso del maíz si se puede detectar mayores incrementos en los cambios en la tasa máxima de producción de biomasa bruta de un cultivo de referencia (se trata del trigo). Lo anterior se explica por el tipo de mecanismo fotosintético del trigo (C3), el cual incluye a la mayoría de los cultivos de interés agronómico. Según investigaciones realizadas (Akita y Moss, 1973; Reddy y Hodges, 2000), y posteriormente retomadas por Kimball *et al.*, (1990) la respuesta del trigo a un doblamiento de la concentración de CO₂ en la atmósfera implica un incremento de 30 a 40% en su fotosíntesis máxima (se consideró un valor de 39% en este trabajo). Esto explica los altos valores de los cambios relativos en la tasa máxima de producción de biomasa bruta, que resulta ser un indicador de la respuesta productiva del trigo a las altas a un escenario 2XCO₂. Por supuesto, otros factores ambientales pueden limitar la respuesta a altas concentraciones de CO₂ incluyendo la disponibilidad de nutrientes, agua, temperatura y luz. Además, estos factores interactúan de manera compleja pero es necesario tener en cuenta que aquí de lo que se trata en principio es que otros factores de estrés no se presenten; los factores relacionados con la fertilidad y el agua disponible se tratarán en los capítulos 5.3 y 5.4, respectivamente.

Los cambios en los rendimientos máximos del cultivo de trigo de temporal van de 13.3 al 26.0% (con una media de 20.8 ±4.7%, y un coeficiente de variación C.V.=22.7%), según el modelo GFDL-R30. El modelo CCC permite estimar cambios en la productividad potencial de 13.3 a 26.7% (con una media de 23.4±4.2%, y un C.V.=18.2%) lo que aproximadamente coincide con resultados reportados en la bibliografía. Cure (1985) revisando la literatura disponible hasta la fecha de publicación de su artículo encontró, considerando la información de 10 cultivos, que el incremento de biomasa es de aproximadamente un 37% para plantas C3 como el trigo (en comparación con un 9% para plantas C4 como el maíz).

Cuadro 10. Cambios en la respuesta fisiológica y productiva del cultivo de trigo de temporal con bajo nivel de insumos en condiciones de cambio climático

Sitio	Estado	Cambios en la respuesta del trigo					
		Δb_{gm} (%)	Δb_{rm} (%)	ΔY_{max} (%)	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30
Apizaco	Tlaxcala	12.6	15.3	35.4	50.3	25.7	27.3
Tepatitlan	Jalisco	10.1	12.4	29.5	30.0	13.3	16.3
Sombretete	Zacatecas	15.6	17.1	38.9	41.4	19.8	21.1
San Felipe	Guanajuato	16.7	20.6	44.3	42.9	21.0	26.2
Charcas	S.L.P.	15.0	17.6	39.4	38.3	19.0	22.6
El Rosario	B.C.N.	22.2	22.4	77.6	72.9	26.0	26.7

Nota: Δb_{gm} : cambios relativos en la tasa máxima de producción de biomasa bruta de un cultivo de referencia (índice de área foliar, IAF, igual a 5) (en $kg\ ha^{-1}\ día^{-1}$), $\Delta b_{gm} = (b_{gm}^{2100} - b_{gm}^{2000})/100$; b_{gm} : tasa promedio de pérdida de asimilados por respiración de mantenimiento durante el ciclo de crecimiento ($kg\ ha^{-1}\ día^{-1}$); ΔY_{max} : cambios relativos en el rendimiento del cultivo de maíz de temporal (en %), $\Delta Y_{max} = (Y_{max}^{2100} - Y_{max}^{2000})/100$.

Los resultados generales de este trabajo coinciden con lo reportado en la literatura más reciente y relevante. Bhatti *et al.* (2006) reportan un experimento de campo realizado en Georgia Envirotron donde el principal objetivo era determinar el impacto de un incremento en la concentración de CO₂ en el ambiente y la temperatura sobre la producción de biomasa de maíz, un cultivo C4, y la soya y cacahuete, cultivos C3. Los resultados indican en principio que el maíz al comienzo del llenado de grano decreció con un aumento de la temperatura, mientras el impacto del incremento en la concentración de CO₂ fue mínimo.

Los mejores modelos de simulación se han desarrollado para los cultivos de mayor interés agronómico: trigo y maíz, entre otros. En un estudio realizado utilizando el modelo DSST en 20 países se encontró que en un incremento en la temperatura del 2 °C la producción simulada de trigo incrementó su rendimiento en 13% y el maíz en 8%. Lo anterior demuestra que incrementos de la temperatura no necesariamente significan disminución del rendimiento por aumento de la tasa respiratoria, pues en general los cultivos tienen rangos de temperaturas óptimas y temperatura base: la temperatura óptima para el trigo es de 15 °C y la óptima para maíz esta próxima a 34 °C, y sus temperaturas bases son de 0 °C y 8 °C, respectivamente (Anexo F). Así, por ejemplo, un incremento de 4 °C causó una disminución en el rendimiento del

trigo de 1% y del maíz de 1.5% (Bhatti *et al.*, 2006). Lo anterior muestra una coincidencia relevante entre los resultados reportados actualmente en la literatura especializada y los resultados de esta investigación, relativos a la estimación de la productividad potencial. En conclusión, ciertas plantas cultivadas de origen tropical como el maíz (C4) reciben modestos beneficios de un cambio climático. La mayoría de las plantas cultivadas son C3 (como el trigo) y han demostrado incrementos significativos en los rendimientos máximos (biofísicos) con elevada concentraciones de CO₂ en la atmósfera. Mientras que en las áreas cálidas y secas las especies C4 generalmente tienen ventaja competitiva sobre las especies C3 a causa de que realizan un uso más eficiente del agua y pueden tolerar condiciones ambientales más calientes y secas. Sin embargo, debido a las elevadas concentraciones de CO₂ las especies C3 tendrán una tasa fotosintética mejorada y eficiencia en el uso del agua (Bhatti *et al.*, 2006).

5.2. Cambio de la radiación neta y del índice IHT por el cambio climático en México

Se estimaron los cambios en la radiación neta y el índice hidrotérmico local en los sitios de referencia de los cultivos de maíz y trigo de temporal (Cuadro 11; Anexo D). Los resultados obtenidos indican que en general los dos modelos climáticos presentan escenarios de cambios positivos en la radiación neta. Una prueba de t-Student muestra que con un nivel de significancia del 5% no existen diferencias significativas en los valores proporcionados por los dos modelos climáticos. El modelo GFDL-R30 muestra incrementos en un 7.9 ± 2.4 %, y el modelo CCC indica también cambios positivos en la radiación neta de 6.7 ± 3 %. Estos traslapes en los intervalos significan además diferencias no significativas entre los cambios pronosticados por los dos modelos en lo que respecta a la radiación neta. El cálculo de los cambios de la radiación neta necesitó de la estimación de los valores de la radiación neta al final de los siglos XX y XXI. Para estimar R_n con la Ecuación 27 fue necesario estimar R_b²¹⁰⁰ asumiendo que la temperatura diurna y la nocturna se incrementan en la misma proporción.

Cuadro 11. Cambio en las variables climáticas (ΔRn , ΔIHT y ΔK_{hidr}) durante la estación de crecimiento de maíz y trigo de temporal con bajo nivel de insumos en una atmósfera con concentración de CO₂ duplicada

Sitio	Estado	Cambio climático (Gay, 2003)							
		$\Delta Rn(\%)$		$\Delta IHT(\%)$		$\Delta K_{hidr}(\%)$			
		GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC
Coatepec	Veracruz	8.9	6.6	-14.9	23.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tuxpan	Veracruz	4.3	4.0	-14.9	20.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Atacomulco	México	5.6	4.8	-19.2	16.4	0.0	0.0	0.0	0.0
Jerécuaro	Guanajuato	7.7	6.7	-17.8	26.0	0.0	0.0	0.0	0.0
La Huerta	Jalisco	7.4	6.7	-17.6	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0
Magdalena	Jalisco	2.1	-0.6	-21.3	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0
Zapopan	Jalisco	8.9	7.8	-15.8	22.4	0.0	0.0	0.0	0.0
Arcelia	Guerrero	6.0	5.2	-18.8	38.8	0.0	-9.9	0.0	0.0
Chapingo	México	2.8	4.6	-19.0	28.1	21.0	-21.9	0.0	0.0
Izúcar de M.	Puebla	5.1	6.4	-19.1	36.4	10.0	-26.7	0.0	0.0
Ixcamilpa	Puebla	7.0	5.9	-17.0	40.2	12.0	-28.7	0.0	0.0
Navojua	Sonora	-3.6	-6.4	-29.8	-12.6	42.5	14.4	0.0	0.0
Apizaco	Tlaxcala	1.9	-2.4	-20.3	17.6	0.0	0.0	0.0	0.0
Tepatitlan	Jalisco	8.8	7.8	-16.7	25.6	0.0	0.0	0.0	0.0
Sombrerete	Zacatecas	8.1	8.3	-14.4	25.0	4.0	-20.0	0.0	0.0
San Felipe	Guanajuato	7.2	5.5	-16.3	40.7	19.4	-28.9	0.0	0.0
Charcas	S.L.P.	8.2	6.6	-14.9	27.9	17.5	-21.8	0.0	0.0
El Rosario	B.C.N.	33.8	30.1	60.3	73.0	-1.0	-8.3	0.0	0.0

Nota: Rn: radiación neta; IHT: Índice hidrotérmico local; $\Delta Rn = (Rn^{2100} - Rn^{2000})/100/Rn^{2000}$; $\Delta K_{hidr} = (K_{hidr}^{2100} - K_{hidr}^{2000})/100/K_{hidr}^{2000}$; $\Delta IHT = (IHT^{2100} - IHT^{2000})/100/IHT^{2000}$. Los símbolos 2000 y 2100 corresponden al inicio y final del siglo XXI, respectivamente; Modelos de Circulación General de la Atmósfera: GFDL-R30, Laboratorio Geofísico de Dinámica de Fluidos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, Princeton, EEUU); CCC, Centro Climático del Servicio Meteorológico de Canadá.

El supuesto anterior esta fundamentado en los resultados expuestos en el Cuarto Informa de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, el cual concluyó, basados en una serie histórica mas larga de datos, que la temperatura nocturna y la diurna se espera se incrementen en la misma proporción al final del siglo XXI (IPCC, 2007a). Esta conclusión contrasta con la dada en el Tercer Informe de Evaluación que indicaba que la temperatura diurna se incrementaba más que la temperatura máxima, lo cual tiene consecuencias distintas con fines de análisis del impacto sobre la productividad de los cultivos, pues mayores temperaturas nocturnas

tienen efectos negativos sobre la productividad del maíz (Chang, 1981; IPCC, 2001a). Lo anterior, fue fundamental para el pronóstico del balance de radiación de onda larga y después de la radiación neta, pues facilitó su estimación, al considerar que la diferencia entre la temperatura mínima y media y máxima y media se conserva para un escenario de cambio climático a fines del siglo XXI.

La Figura 4 muestra una dependencia general entre la radiación de onda larga R_b^{2000} y la temperatura del aire, ésta muestra que a medida que se incrementa la temperatura del aire disminuye el balance de radiación de onda larga. Esto permite prever cual será el comportamiento general de los valores de radiación neta en las zonas de cultivo en la geografía mexicana.

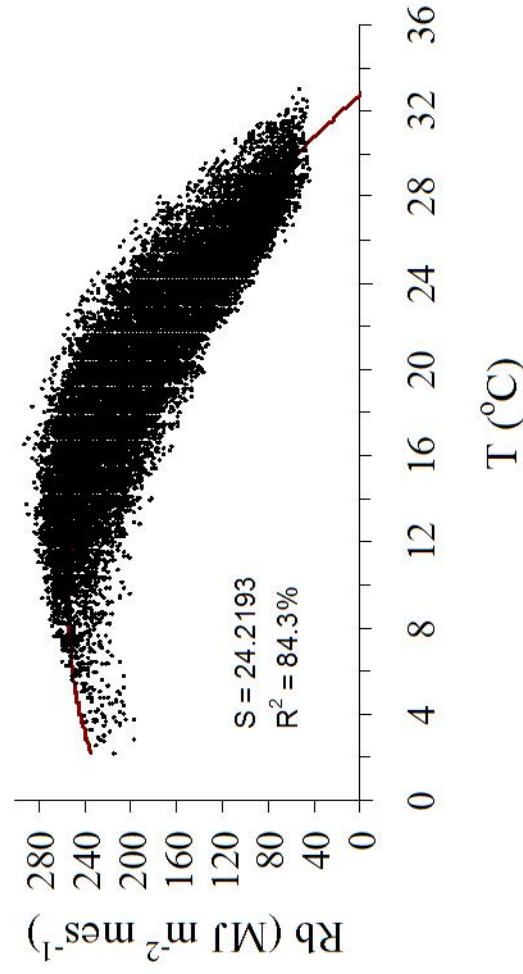


Figura 4. Dependencia entre los valores del balance de radiación de onda larga y la temperatura media.

$$R_b = 219.5 + 7.710T - 0.4405T^2 \quad (45)$$

$r_{ajus}^2 = 0.84$, $S=24.22$ y $n=21579$; R_b está en $MJ m^{-2} mes^{-1}$ y T es la temperatura media mensual ($^{\circ}C$).

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. Lo anterior considera que el albedo permanece sin cambio significativo y que los cambios en la radiación global, con ser positivos, son pequeños y del orden no mayor al 8 %. Los valores de albedo de la vegetación natural utilizados en este trabajo son los que se muestran en el Cuadro 4.

Los resultados de la estimación de los cambios en el índice hidrotérmico local se muestran altamente dependientes de los pronósticos en la precipitación. Para el modelo GDFL-R30, la parte centro del país presenta cambios negativos en el índice IHT de 17.4 ± 2.1 %. Los cambios negativos del IHT 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. El modelo climático CCC con sus pronósticos de cambios positivos en el IHT 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. En la parte central de México los cambios en el IHT están en el orden del 25.3 ± 10.4 %. La parte norte del país implica cambios positivos de entre 60 y 70% para ambos modelos por coincidir ambos modelos en sus pronósticos de disminución en la precipitación y grandes incrementos en la radiación neta del orden del 30%.

El Cuadro 12 muestra que los valores anuales del índice hidrotérmico local van de 0.64 a 3.9, lo cual indica que los sitios analizados van desde las zonas tropicales húmedas hasta las zonas áridas. Los cambios anuales de este índice para el modelo climático GFDL-R30 son negativos, lo que indica un mejoramiento del balance hidrotérmico del suelo para los sitios con $IHT > 1.5$. El modelo CCC muestra un incremento generalizado en la aridez en los sitios con $IHT > 1.5$.

Cuadro 12. Valores anuales y cambios porcentuales del índice hidrotérmico local (IHT y Δ IHT) al inicio y final del siglo XXI en los sitios de referencia para los modelos climáticos GFDL-R30 y CCC.

Sitios de referencia	Estado	IHT ²⁰⁰⁰		IHT ²¹⁰⁰		Δ IHT	Δ IHT	
		adim		adim				%
		GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC			
Coatepec	Veracruz	0.64	0.80	0.57	0.80	-10.9	25.0	
Tuxpan	Veracruz	1.03	1.23	0.93	1.23	-9.7	19.4	
Atacomulco	México	1.11	1.24	0.92	1.24	-17.1	11.7	
Jerécuaro	Gto	1.30	1.50	1.11	1.50	-14.6	15.4	
La Huerta	Jalisco	1.32	1.53	1.14	1.53	-13.6	15.9	
Magdalena	Jalisco	1.35	1.39	1.17	1.39	-13.3	3.0	
Zapopan	Jalisco	1.36	1.64	1.19	1.64	-12.5	20.6	
Arcelia	Guerrero	1.62	2.20	1.35	2.20	-16.7	35.8	
Chapingo	México	1.76	2.04	1.47	2.04	-16.5	15.9	
Izúcar de M.	Puebla	1.78	2.27	1.51	2.27	-15.2	27.5	
Ixcamilpa	Puebla	1.96	2.60	1.70	2.60	-13.3	32.7	
Navojoa	Sonora	3.90	3.95	3.17	3.95	-18.7	1.3	
Apizaco	Tlaxcala	1.11	1.21	0.90	1.21	-18.9	9.0	
Tepatitlan	Jalisco	1.37	1.70	1.18	1.70	-13.9	24.1	
Sombrerete	Zacatecas	1.69	1.90	1.51	1.90	-10.7	12.4	
San Felipe	Guanajuato	2.13	2.70	1.83	2.70	-14.1	26.8	
Charcas	S.L.P.	2.97	3.59	2.59	3.59	-12.8	20.9	
El Rosario	B.C.N.	4.24	5.84	5.18	5.84	22.2	37.7	

Nota: GFDL-R30 y CCC: Modelos climáticos

5.3. Cambio del índice hídrico

Se calculó el valor del índice hídrico promedio durante la estación de crecimiento 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. El índice hídrico fue el resultado de la media de los valores mensuales durante la estación de crecimiento (Cuadro 11).

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 la lámina de agua precipitada y el agua evapotranspirada por el cultivo. El índice K_{hidr} se definió como el inverso del IHT, o sea $K_{\text{hidr}} = 1/\text{IHT}$. El IHT se

conoce como el índice de aridez (Budyko, 1974) porque se expresa como la relación entre la radiación neta y precipitación. La radiación neta es proporcional y prácticamente lineal a la evapotranspiración potencial (Martin *et al.*, 1993; De Santa Olalla *et al.*, 2005). Por lo anterior es que el valor $K_{hidr} = 1/IHT$ se puede considerar como un índice de disponibilidad de agua en el suelo. 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 > 1.0 ; es decir, retener agua más allá de su capacidad de almacenamiento. Es decir, para los sitios geográficos de referencia donde al inicio del siglo XXI el valor del IHT es ≤ 1.0 y disminuye al final de ese siglo según los pronósticos existentes, es necesario considerar que los valores del K_{hidr} se conservan a un nivel de 1.0 y por esto el cambio del K_{hidr} es 0. Esta situación se observa por lo regular 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 < 1.0 o $K_{hidr} = 1.0$). Entonces, cualquier incremento en la precipitación no produce cambio en el K_{hidr} , al no contribuir a satisfacer las necesidades de agua de los cultivos, y es esta agua la que debe ser retirada de los terrenos agrícolas mediante drenaje natural o artificial.

El análisis del Cuadro 11 permite concluir que el índice hídrico K_{hidr} únicamente es sensible en sitios con precipitaciones promedio anuales menores de 1500 mm (aproximadamente), con valor de IHT de 1.5 aproximadamente. En estos sitios el balance entre precipitación y evapotranspiración se considera adecuado para un cultivo de referencia. Incrementos de la precipitación como los pronosticados por el modelo GFDL-R30 implican aumento del índice K_{hidr} hasta el valor de 1.0 (0 cambios positivos) y decrementos en la precipitación, a partir de valores de precipitación media anual de 1500 mm, implican disminución en el K_{hidr} y por tanto deficiencia hídrica durante la estación de crecimiento de los cultivos.

5.4. Estimación de la alteración de la fertilidad del suelo, atribuible al cambio climático

La estimación de la vulnerabilidad de los suelos de México al cambio climático global se fundamentó en el análisis de la alteración de su régimen hidrotérmico. Las relaciones geográficas de dependencia entre el índice hidrotérmico local y las propiedades individuales de los suelos de México (MO, P, K, pH), previamente establecidas para México (Tetumo *et al.*, 2001; Nikolskii *et al.*, 2001; Contreras *et al.*, 2002), y actualizadas en este trabajo con mayor información y mejores métodos de procesamiento, fueron condensadas en una relación entre un índice de fertilidad natural de los suelos y el mismo índice hidrotérmico local. Esta gráfica fue utilizada para pronosticar cambios en los valores modales regionales de la calidad de los suelos agrícolas de México dados cambios en los valores modales regionales del índice climático IHT.

5.4.1. Relación entre algunas propiedades de los suelos, el índice integral de fertilidad del suelo y el IHT

Las gráficas que muestran las relaciones de dependencia entre los valores modales de las propiedades de los suelos y del índice hidrotérmico local se construyeron para cada una de las propiedades que presentan un carácter zonal y que son de interés en este trabajo (Figuras 5 y 6). La información numérica completa se reporta en el Anexo C.

Las funciones analíticas $y(x)$, donde y es la propiedad del suelo y x el IHT^{2000} , que describen la relación entre los valores modales regionales de las propiedades en función del IHT^{2000} son:

Para el pH:

$$y = (ab+cx^d)/(b+x^d);$$

Para contenido de MO y P:

$$y = (a+bx)/(1+cx+bx^2);$$

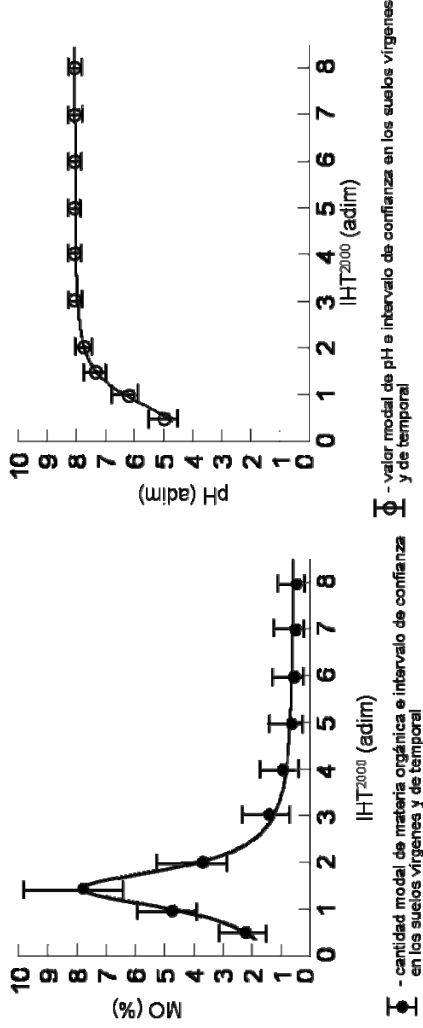


Figura 5. Dependencia de los valores modales del contenido de materia orgánica (MO) y pH, en los suelos naturales no usados en la agricultura y de los suelos agrícolas de temporal de México, y ubicados en los terrenos con pendientes <3% en altitudes de 0-2500 m, en función de los valores regionales promedio anuales del índice climático IHT²⁰⁰⁰ al inicio del siglo XXI.

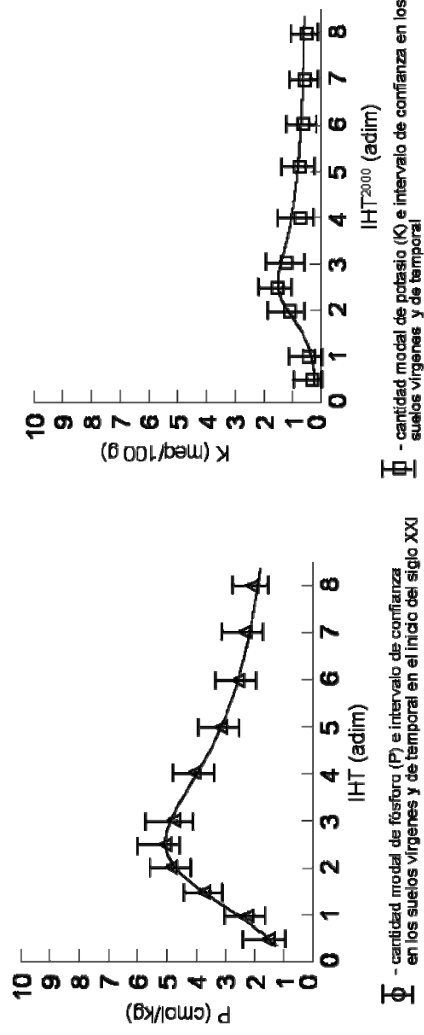


Figura 6. Dependencia de los valores modales del contenido de fósforo (P₂O₅) y potasio (K₂O), en los suelos naturales no usados en la agricultura y de los suelos agrícolas de temporal de México, y ubicados en los terrenos con pendientes <3% en altitudes de 0-2500 m, en función de los valores regionales promedio anuales del índice climático IHT²⁰⁰⁰ al inicio del siglo XXI.

Para K:

$$y = a x^{b/x}$$

Donde: a, b, c y d son constantes.

Las constantes a, b, c y d de estas funciones y el coeficiente de determinación r^2 para cada una de las propiedades se presentan en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Constantes de las funciones analíticas que relacionan las propiedades químicas y biológicas de los suelos y el IHT

Propiedad	a	b	c	d	r^2
pH	5.00	2.5	8.0	5.90	0.96
MO	0.10	1.4	-1.5	0.80	0.98
P	-0.20	1.0	-0.5	0.12	0.86
K	0.04	9.3			0.92

Los cálculos del IHT²⁰⁰⁰ a nivel promedio anual señalan que en México este índice varía dentro del intervalo de 0.5 a 8.0. Los valores <1 corresponden a la zona húmeda tropical con precipitación promedio anual Pr >1500 mm, de 1 a 2 a la zona semihúmeda con 1000 <Pr ≤1500 mm, de 2 a 3.5 a la zona semiárida con 300 <Pr ≤1000 mm, y los >3.5 a la zona árida con Pr ≤300 mm (Contreras *et al.*, 2002). Las gráficas de las Figuras 5 y 6 son más representativas para México, en comparación con las publicadas anteriormente (Nikolski *et al.*, 2001; Tetumo *et al.*, 2001; Contreras *et al.*, 2002), porque para su establecimiento se utilizó la información edáfica con mayor cobertura en el territorio nacional (80% en lugar de 40%) y mejores métodos de tratamiento de la información. La dependencia de las propiedades de suelos vírgenes no usados en la agricultura en función del IHT corresponden a los suelos minerales automorfos, formados *in situ* y geomorfológicamente homogéneos.

Según las Figuras 5 y 6, los suelos mas fértiles en México se encuentran en las zonas con el clima semihúmedo donde la precipitación promedio anual es alrededor de 1300 mm y el IHT de 1.0-1.5 (regiones de los estados de Guanajuato, Michoacán, Chiapas, Veracruz, Campeche y Colima). En estas zonas los suelos con vegetación natural tienen los mayores contenidos de MO (4.5-6.5% y en algunos lugares alcanza 10%) y pH neutro (6-7). Los suelos con mayor contenido de P (4-5 cmol·kg⁻¹) y de K (1.2-1.5 cmol·kg⁻¹) corresponden a las zonas áridas y semiáridas del país, donde el IHT varía de 2.3 a 3.5. Según Contreras *et al.* (2002), este grupo de suelos

tiene los valores máximos de contenido de arcilla (30-35%) y capacidad de intercambio catiónico ($20-25\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) en las zonas con precipitación anual <1300 mm e IHT entre 1.5 y 2.5. El valor máximo de saturación de bases (100%) de los suelos se tiene en la zona árida del país con IHT >3 .

En las Figuras 5 y 6 también se muestran los intervalos de confianza de variabilidad de estas propiedades φ con la probabilidad de 95% con respecto a sus valores modales φ^{mod} : $\varphi^{\text{mod}} \pm \sigma$ considerando el carácter lognormal de la distribución estadística de estos valores; σ es la desviación estándar de los logaritmos de φ . Las gráficas corresponden a los suelos automórfos con la profundidad del nivel freático, aproximadamente, mayor de 2 m formados *in situ* y ubicados en los terrenos con pendientes menores de 3%, es decir, en los terrenos sin problemas de erosión hídrica y por tanto aquellos que no requieren de la implementación de prácticas productivo conservacionistas para el control de la pérdida de suelos. Como fue mencionado anteriormente, según los trabajos hechos por Conteras (2000) y Balbontín (2004) no hay diferencia estadísticamente significativa entre los valores modales de las propiedades regionales de los suelos vírgenes y de temporal dentro de los grupos geomorfológicamente homogéneos.

Las gráficas en las Figuras 5 y 6 fueron utilizadas para calcular el índice integral de fertilidad de suelos F_v^{2000} (adimensional) con la Ecuación 39. En la Figura 7 se presenta la curva de cambio de los valores modales del índice integral de fertilidad de los suelos vírgenes y de temporal F^{2000} en el inicio del siglo XXI en función del IHT²⁰⁰⁰. La función analítica $y(x)$, donde $y = F_v^{2000}$ y $x = \text{IHT}^{2000}$, obtenida con el programa Curve Expert 1.3 (Hyams, 1997) es:

$$y = 4.9 x^{3.72} e^{2.48x} + 0.23$$

El coeficiente de determinación de esta función es $r^2 = 0.99$. Como se aprecia, la relación F_v^{2000} (IHT^{2000}) refleja una regularidad en la distribución del índice integral del suelo virgen en función del IHT^{2000} en los terrenos con poca pendiente. Los valores del índice adimensional de fertilidad varían de 0.23 a 0.33 en las zonas áridas donde $\text{IHT}^{2000} > 4$ hasta 0.79 en las zonas subhúmedas donde $\text{IHT}^{2000} \sim 1.5$. En

las zonas tropicales húmedas donde $IHT^{2000} < 1$ el índice de fertilidad se reduce hasta 0.36-0.6.

Analizando la gráfica F_v^{2000} (IHT^{2000}) de la Figura 7 se puede concluir que en el intervalo $0 < IHT^{2000} < 3$ el índice integral de fertilidad tiene una fuerte dependencia con IHT^{2000} comparando con las regiones donde $IHT^{2000} > 3$. Esto significa que los suelos más susceptibles al cambio climático se encuentran en las zonas donde $0 < IHT^{2000} < 3$, es decir en las zonas del clima tropical húmedo ($IHT^{2000} < 1$), zonas con clima templado y humedecimiento moderado ($1 < IHT^{2000} \leq 2$) y las zonas con clima semiárido ($2 < IHT^{2000} \leq 3$). La vulnerabilidad de la fertilidad del suelo al cambio de clima se puede expresar matemáticamente como el valor absoluto de la derivada parcial $|\partial F / \partial IHT|$. Obviamente, el intervalo de máximos valores de $|\partial F_v^{2000} / \partial IHT^{2000}|$ corresponde al intervalo $0 < IHT^{2000} < 3$.

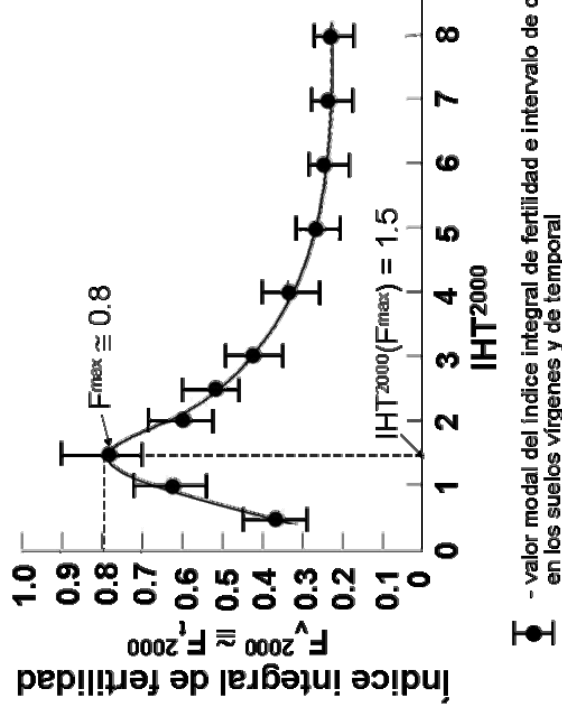


Figura 7. Dependencia del índice integral de fertilidad F_v^{2000} de suelos vírgenes no usados en agricultura y ubicados en los terrenos con pendientes $< 3\%$ en altitudes de 0-2500 m en función del IHT^{2000} al inicio del siglo XXI

En la Figura 7 también se muestran los intervalos de confianza de variabilidad de los valores de F_v con probabilidad de 95%: $F^{mod} \pm \sigma$ considerando el carácter lognormal de la distribución estadística de estos valores; F^{mod} es el valor modal y σ es la desviación estándar de los logaritmos de F . Las gráficas corresponden a los suelos

autómorfos con profundidad del nivel freático aproximadamente mayor de 2 m formados *in situ* y ubicados en terrenos con pendientes menores de 3%, es decir, en los terrenos sin problemas de erosión hídrica y por tanto aquellos que no requieren de la implementación de prácticas productivo conservacionistas para el control de la pérdida de suelos.

5.4.2. Evaluación de los cambios de las propiedades de los suelos agrícolas y del índice integral de fertilidad por el cambio climático

Las propiedades químico biológicas de los suelos (MO, P, K y pH) dependen del IHT a nivel regional de acuerdo a la ley geográfica de zonificación de los suelos, por lo que el índice integral de fertilidad (F) también depende de esta ley. La gráfica $F_v(\text{IHT})$ para los suelos naturales no usados en la agricultura y de los suelos agrícolas de temporal de México se proponen para evaluar los cambios en la fertilidad de los suelos agrícolas de México por el cambio climático global.

Específicamente la gráfica $F_v^{2000}(\text{IHT}^{2000})$ de la Figura 7 se utilizó para pronosticar el cambio del índice integral de fertilidad de suelos para un escenario futuro de cambio climático global en caso de duplicación de la concentración de CO_2 en la atmósfera. Con esta gráfica se estimó la relación F_v^{2100}/F_v^{2000} para algunas áreas de referencia del país y con la Ecuación 43 se estimó el coeficiente F_a^{2100}/F_a^{2000} , para calcular el cambio de rendimientos de los cultivos agrícolas ΔY con la Ecuación 14. Como fue mencionado anteriormente prácticamente no se tiene una diferencia estadísticamente significativa entre los valores modales F_v^{2000} y F_a^{2000} . Entonces: $(F_a^{2100}/F_a^{2000}) \cong (F_v^{2100}/F_v^{2000})$.

Como se observa en la Figura 7, la mayor fertilidad, $F_{\text{max}} = 0.8$, la tienen los suelos vírgenes en las zonas climáticas donde el $\text{IHT}_1 \cong 1.5$ lo que corresponde a las zonas con el clima semihúmedo – semiseco o donde la precipitación anual es aproximadamente igual a la evapotranspiración potencial. En las zonas húmedas ($\text{IHT}^{2000} < 1$) y las zonas áridas ($\text{IHT}^{2000} > 3$) el índice de fertilidad es significativamente menor.

Una vez determinados los valores de IHT^{2100} se utilizó la gráfica de la Figura 7 para estimar el nuevo valor del índice F, dado un cambio en el IHT en algunos sitios de interés. El Cuadro 14 muestra los resultados obtenidos en cuanto a pronóstico de los cambios en la fertilidad de los suelos.

Cuadro 14. Ejemplos de evaluación de los cambios climáticos esperados, con el modelo climático GFDL-R30, sobre la alteración de la fertilidad de los suelos vírgenes de México, verificada a través del cambio en el índice integral de fertilidad de los suelos (F) por duplicación en la concentración de CO₂ en la atmósfera.

Estado	Pr ²⁰⁰⁰ (mm año ⁻¹)	IHT		F		ΔF (%)
		IHT ²⁰⁰⁰	IHT ²¹⁰⁰	F ²⁰⁰⁰	F ²¹⁰⁰	
Tabasco	2890	0.73	0.51	0.50	0.37	-26
Chiapas	1923	0.91	0.72	0.61	0.40	-31
Campeche	1265	1.43	1.52	0.77	0.78	+3
Zacatecas	1191	1.56	1.60	0.77	0.77	0
Michoacán	1031	1.50	1.39	0.79	0.76	-4
Nayarit	976	1.70	1.57	0.76	0.78	+3
Puebla	816	1.90	1.68	0.70	0.77	+10
Oaxaca	730	1.90	1.55	0.70	0.79	+13
Chihuahua	604	2.20	2.85	0.59	0.46	-22
Coahuila	535	3.00	3.95	0.44	0.34	-23
Tamaulipas	864	2.10	2.83	0.64	0.46	-31

Nota: Pr: Precipitación; Los símbolos 2000 y 2100 corresponden al inicio y final del siglo XXI, respectivamente; $\Delta IHT = (IHT^{2100} - IHT^{2000})100/IHT^{2000}$. $\Delta F_a = (F_a^{2100} - F_a^{2000})100/F_a^{2000}$; Cambios entre -10% < ΔF < +10% se consideran no significativos, y por lo tanto, no se pronostica ningún cambio en la fertilidad del suelo. Modelos de Circulación General de la Atmósfera: GFDL-R30, Laboratorio Geofísico de Dinámica de Fluidos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, Princeton, EEUU).

En este Cuadro se muestra la predominancia de cambios negativos sobre los positivos; y aún cuando en zonas húmedas, áridas y semiáridas se muestran cambios negativos, éste tiene diferente origen y las medidas de mitigación también deben ser diferentes. Una disminución en los valores del índice F hacia la izquierda del máximo, en la Figura 7, se deben a aumentos en las precipitaciones, mientras que una disminución hacia la derecha del máximo en la misma gráfica se debe más al incremento en el balance de radiación, debido a incrementos significativos en la temperatura del aire, disminuciones en la lluvia invernal e incrementos muy pequeños en la precipitación en el verano, como se pronostica por el modelo climático GFDL-R30.

También se obtuvieron los cambios porcentuales en el índice F para 18 sitios de referencia en el país correspondientes a áreas con contraste climático con alguna importancia en la producción de maíz y trigo de temporal, utilizando dos modelos climáticos, esencialmente diferentes en los escenarios climáticos generados por ellos. La magnitud de los cambios en la temperatura es mayor en el modelo GFDL-R30, que con el modelo CCC. Los pronósticos de la precipitación difieren hasta en el signo: positivo con el modelo GFDL-R30 y negativo con el CCC. Los resultados muestran cambios significativos que van de -26 hasta 20% (Cuadro 12). El Anexo E muestra los mapas con los cambios del índice integral de fertilidad de los suelos agrícolas por el cambio climático global, utilizando la información de los cambios en la fertilidad de los suelos estimadas para los sitios de referencia. En estos mapas se muestra una predominancia de los cambios no significativos con el modelo climático GFDL-R30 y áreas considerables de incremento bajo que se vuelven de decremento bajo si las condiciones futuras se asemejan a las pronosticadas por el modelo CCC. Esto significa lo importante que es definir el signo de la precipitación pronosticada con los modelos climáticos, cuestión en debate actualmente por las contradicciones en los resultados durante la modelación de la precipitación.

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

La estimación de la vulnerabilidad del maíz y trigo de temporal con bajo nivel de insumos se realizó a través del cálculo del cambio en los rendimientos (ΔY), para cada estación meteorológica representativa de las zonas productoras de maíz y trigo. Los cambios en la productividad se estimaron considerando las componentes de cambio individual (cambios en la productividad potencial o biofísica, cambios en el balance hídrico agroclimático del agua en el suelo y cambios en la fertilidad natural de los suelos debidos al cambio climático global, estos últimos también llamados cambios indirectos). Los escenarios climáticos utilizados para las estimaciones de cambios en la productividad fueron las salidas interpoladas de los modelos GFDL-30 y CCC. La Figura 8 muestra la ubicación geográfica de los sitios de referencia utilizados en el pronóstico de estimación de la vulnerabilidad del maíz y trigo.

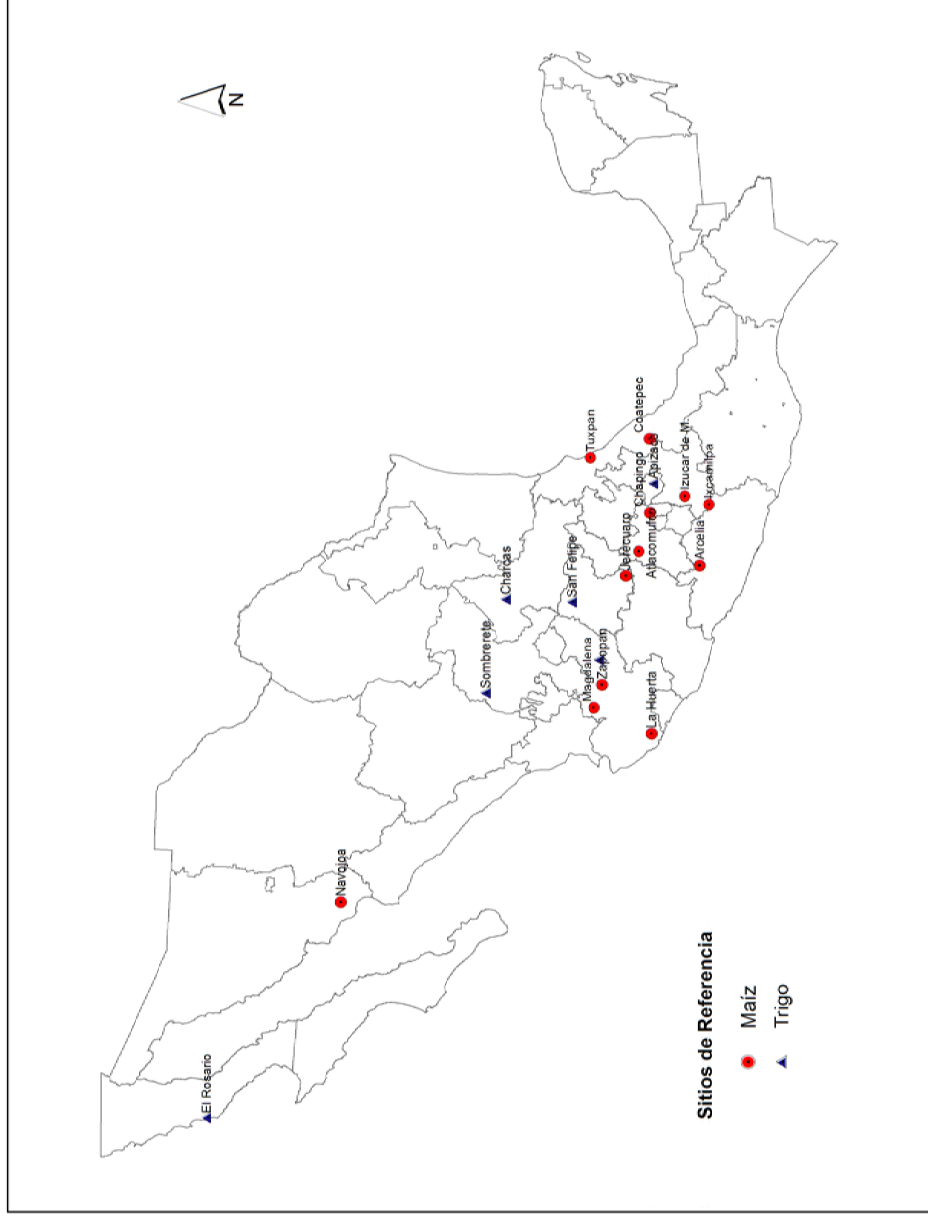


Figura 8. Sitios de referencia utilizados para el pronóstico de cambio de la productividad agrícola de maíz y trigo en condiciones de temporal con bajo nivel de inversión

5.5.1. Estimación de la vulnerabilidad del maíz

La estimación de los cambios en la productividad de maíz se realizó para 12 sitios de referencia en el país (Ver Anexo G), los cuales cruzan estratégicamente la parte central del país, para de esta forma cubrir una variedad amplia 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 consideró un sitio de referencia en la zona árida de México hacia el

noroeste del país (Cuadro 15). La definición de las áreas de influencia de los pronósticos de cambio en la productividad se realizó con base en información digital relacionada con el mapa de tipos climáticos de la CONABIO (García, 1998). Se consideró como área de influencia de la estación meteorológica al área comprendida por el mismo tipo climático.

Cuadro 15. Pronóstico de cambios en las componentes del rendimiento y del rendimiento (ΔY_{\max} , ΔK_{hidr} , ΔF_a y ΔY) del maíz de temporal con bajo nivel de insumos en una atmósfera con concentración de CO₂ duplicada de acuerdo con los escenarios climáticos al final del siglo XXI desarrollados por Gay (2003) con los modelos climáticos GFDL-R30 y CCC, en algunos sitios de referencia de México

Sitio	Estado	Cambio climático (Gay, 2003)											
		ΔY_{\max} (%)			ΔK_{hidr} (%)			ΔF_a (%)			ΔY (%)		
		GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC
Coatepec	Veracruz	15.6	17.4	0.0	0.0	0.0	0.0	-14.0	16.3	-15.0	19.3		
Tuxpan	Veracruz	0.6	-0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	-8.1	16.1	-7.5	15.8		
Aticomulco	México	5.1	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	-13.4	7.5	-9.0	14.5		
Jerécuaro	Gto.	6.0	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	-9.5	6.8	-4.1	15.9		
La Huerta	Jalisco	-2.2	-1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	-8.1	1.4	-10.1	0.0		
Magdalena	Jalisco	5.0	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	-9.2	1.3	-4.7	5.1		
Zapopan	Jalisco	8.8	10.7	0.0	0.0	0.0	0.0	-6.6	0.0	1.7	10.7		
Arcelia	Guerrero	-1.0	1.9	0.0	0.0	-9.9	-1.3	-26.0		-2.2	-32.1		
Chapingo	México	4.2	6.0	21.0	-21.9	8.3	-15.3			36.5	-29.9		
Izúcar de M.	Puebla	4.2	6.4	10.0	-26.7	12.7	-22.5			29.2	-39.5		
Ixcamilpa	Puebla	-0.5	1.8	12.0	-28.7	19.4	-21.0			33.0	-42.6		
Navojua	Sonora	-0.8	-3.7	42.5	14.4	20.6	-20.6			70.3	-12.5		

Nota: Gto: Guanajuato; $\Delta Y_{\max} = (Y_{\max}^{2100} - Y_{\max}^{2000})/100 \times Y_{\max}^{2000}$; $\Delta K_{\text{hidr}} = (K_{\text{hidr}}^{2100} - K_{\text{hidr}}^{2000})/100 \times K_{\text{hidr}}^{2000}$; $\Delta F_a = (F_a^{2100} - F_a^{2000})/100 \times F_a^{2000}$; $\Delta Y = (Y^{2100} - Y^{2000})/100 \times Y^{2000}$. 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.

En el Cuadro 16 se propuso una escala para calificar los cambios del índice integral de fertilidad del suelo. El enfoque similar se propone para estimar cualitativamente los cambios de rendimientos de los cultivos agrícolas.

El análisis de los resultados del Cuadro 15 con los rangos de calificación propuestos en el Cuadro 16 permiten concluir que, en caso de presentarse el escenario de cambio de clima pronosticado por el modelo GFDL-R30, se esperan cambios positivos y negativos en la productividad del maíz de temporal, predominando los

cambios no significativos o menores del 10% en el sentido positivo y negativo en la zona centro del país y decrementos bajos en los rendimientos (de 10 a 30%). La zona norte se ve beneficiada principalmente por el incremento pronosticado de las lluvias de verano por el modelo GFDL-R30 (incremento alto en el rendimiento de 50 a 70%) y perjudicada por los pronósticos de disminución de las lluvias del modelo climático CCC (decremento bajo de -30 a 10%).

Cuadro 16. Intervalos de valores porcentuales de cambio en la productividad de maíz y trigo de temporal bajo condiciones de cambio climático global al final del siglo XXI

ΔY (%)	Categoría de Cambio	Código
-(50 a 30)	Decremento Medio	DM
-(30 a 10)	Decremento Bajo	DB
(-10 a +10)	Cambio No Significativo	CNS
+(10 a 30)	Incremento Bajo	IB
+(30 a 50)	Incremento Medio	IM
+(50 a 70)	Incremento Alto	IA

Los cálculos señalan que en caso de realización del escenario climático correspondiente al modelo GFDL-R30, se espera crecimiento de la productividad de maíz en los municipios de Navojoa, Benito Juárez, Huatabambo y Etchojoa en Sonora. La zona maicera de Jalisco de los municipios de Zapopan en el estado de Jalisco y municipios vecinos no parece esperarse impactos importantes en la productividad del maíz de temporal. La mayor parte del municipio de Coatepec, Veracruz y municipios vecinos se esperan cambios negativos bajos en el rendimiento de maíz.

Los resultados obtenidos en este trabajo relacionados con el pronóstico de la vulnerabilidad del maíz de temporal en México, tienen como punto de comparación los realizados en México por Conde *et al.* (2003) y Flores *et al.* (2003). El Cuadro 17 muestra 7 sitios de referencia para el análisis comparativo de pronósticos de la vulnerabilidad del maíz al cambio climático global. Los tres estudios que se muestran en el Cuadro utilizan los mismos escenarios de cambio climático. Únicamente difieren en la metodología de estudio. Conde *et al.* (2003) enfocan su trabajo basando su análisis en la modelación de la productividad con CERES-Maize y básicamente obtiene estimaciones cuantitativas de los cambios en la productividad

en 7 sitios de referencia. Esencialmente, consideran el efecto sobre la productividad de factores como los cambios en la precipitación, temperatura, concentración de CO₂ en la atmósfera y dinámica del nitrógeno en el suelo. Como fue mencionado anteriormente, la metodología basada en el modelo CERES-Maize es relativamente complicada, corresponde solamente el cultivo de maíz (para otros cultivos es necesario aplicar otros modelos con diferente metodología de simulación de la condición hídrica y de fertilidad del suelo) y no se utiliza ampliamente en el mundo. Por esta razón en el presente trabajo se ha utilizado la metodología útil para diferentes cultivos agrícolas y recomendada por la FAO UNESCO.

Flores *et al.* (2003) parten de un enfoque paramétrico para construir mapas de vulnerabilidad de maíz estimada a nivel cualitativo. En sus mapas se muestran las áreas del cambio cualitativo de la productividad de maíz en función de los escenarios del cambio climático. Para lo anterior, se ha utilizado información de precipitación y temperatura que compararon con los requerimientos del maíz en cada una de las etapas fenológicas. En el trabajo de Flores *et al.* (2003) se ha ignorado el efecto de duplicación probable de la concentración de CO₂ en la atmósfera, así como los cambios en la radiación solar global y en la fertilidad de los suelos.

En el Cuadro 17 se hace un análisis comparativo de resultados de estimación de vulnerabilidad del cultivo de maíz en México al cambio climático global pronosticado con los modelos GFDL-R30 y CCC, en donde se muestran los resultados obtenidos de los autores mencionados y los obtenidos en este trabajo.

Analizando el Cuadro 17 se puede observar que la vulnerabilidad de maíz al cambio climático:

- Estimada cuantitativamente por Conde *et al.* (2003) es mucho más significativa que la estimada cualitativamente un poco antes por Flores *et al.* (2003).
- Estimada en presente trabajo considerando el efecto de alteración del índice integral de fertilidad del suelo atribuible al mismo cambio climático, que permite precisar el impacto integral del cambio climático en la productividad agrícola.

Cuadro 17. Análisis comparativo de los resultados de estimación de vulnerabilidad del cultivo de maíz de temporal con los escenarios climáticos al final del siglo XXI desarrollados por Gay (2003) con los modelos climáticos GFDL-R30 y CCC en algunos sitios de referencia de México

Sitio	Estado	Flores <i>et al.</i> (2003)			Conde <i>et al.</i> (2003)			Trabajo presente		
		GFDL-R30	CCC	CCC	GFDL-R30	CCC	CCC	GFDL-R30	CCC	CCC
Coatepec	Veracruz	≈0	≈0	≈0	-30.7	28.9	28.9	-15.0	19.3	19.3
Tuxpan	Veracruz	≈0	≈0	≈0	-26.4	7.3	7.3	-7.5	15.8	15.8
Atacomulco	México	≈0	≈0	≈0	34.6	59.5	59.5	-9.0	14.5	14.5
La Huerta	Jalisco	Neg	Neg	Neg	-26.2	-23.6	-23.6	-10.1	0.0	0.0
Magdalena	Jalisco	Neg	Neg	Neg	-31.4	-16.5	-16.5	-4.7	5.1	5.1
Izúcar de M.	Puebla	≈0	Neg	Neg	-28.0	-10.3	-10.3	6.6	-39.5	-39.5
Ixcamilpa	Puebla	≈0	≈0	≈0	-50.1	1.0	1.0	33.0	-42.6	-42.6

Nota: ≈0 = Efecto no significativo; Neg = Disminución en el rendimiento.

Con el objetivo de visualizar en forma general este tipo de análisis, en la Figura 9 se presenta la gráfica de comparación de la estimación cuantitativa de la vulnerabilidad de maíz al cambio climático hecha por Conde *et al.* (2003) y en el trabajo presente. El análisis de los datos presentados en la Figura 9 permite concluir que entre los cambios del rendimiento de maíz calculados en el trabajo presente y en la publicación de Conde *et al.* (2003) hay poca coincidencia entre los pronósticos. Las cifras del cambio de la productividad de maíz obtenidas por Conde *et al.* (2003) y en el trabajo presente no siempre coinciden hasta aun al nivel del signo. Esto posiblemente se explica por razón no solamente de ignorancia o toma en consideración del índice integral de fertilidad del suelo, sino por los diferentes modelos de simulación de la productividad agrícola utilizados. Conde *et al.* (2003) generalmente obtienen cambios positivos o negativos mayores que los obtenidos en este trabajo. Según los resultados obtenidos, algunos sitios ubicados en las zonas tropicales secas como Ixcamilpa e Izúcar de Matamoros pueden resultar perjudicadas por un escenario de disminución de lluvia, y no queda claro como Conde *et al.* (2003) obtiene efectos negativos bajos para este escenario (casi no significativos) y como un escenario de mayor precipitación puede resultar negativo de forma significativa.

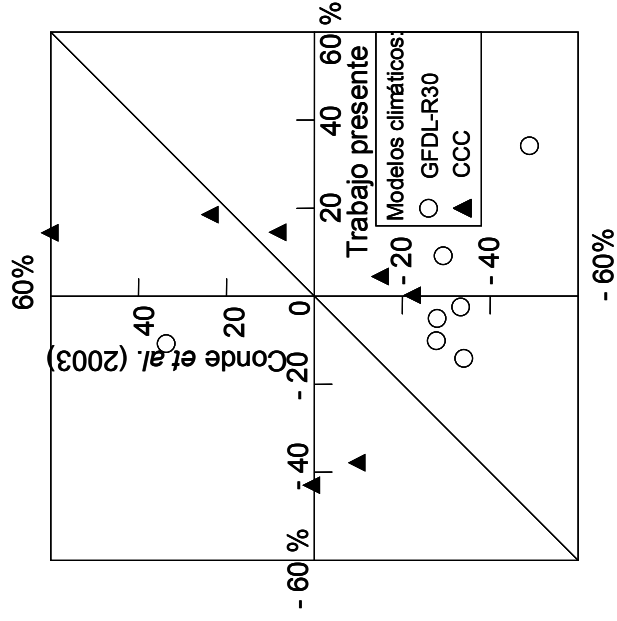


Figura 9. Comparación de los resultados de estimación de la vulnerabilidad de maíz al cambio climático en el presente trabajo con los obtenidos por Conde *et al.* (2003)

5.5.2. Estimación de la vulnerabilidad del trigo

Los rendimientos de trigo son altamente dependientes de los escenarios de cambio climático (Cuadro 18 y Anexo H). En general se espera una repuesta mayor en el caso del maíz. Sin embargo, la dirección de los cambios depende de que se verifique uno u otro de los escenarios de precipitación. Los sitios como Apizaco y Tepatitlan de los estados de Tlaxcala y Jalisco, respectivamente, donde un escenario de disminución de la precipitación favorece al cultivo, pero sitios como Sombretete, San Felipe y Charcas de los estados de Zacatecas, Guanajuato y San Luis Potosí, respectivamente, se ven afectados por una disminución de la precipitación y favorecidos por un incremento en la precipitación. Es decir, un incremento de las precipitaciones mejora el balance de humedad en el suelo y las condiciones de formación de los suelos que finalmente resulta en un mejoramiento de la calidad de los mismos.

Cuadro 18. Pronóstico de cambios en las componentes del rendimiento y del rendimiento ($\Delta Y_{\text{máx}}$, $\Delta K_{\text{hídr}}$, ΔF_a y ΔY) del trigo de temporal con bajo nivel de insumos en una atmósfera con concentración de CO₂ duplicada de acuerdo con los escenarios climáticos al final del siglo XXI desarrollados por Gay (2003) con los modelos climáticos GFDL-R30 y CCC en algunos sitios de referencia de México

Sitio	Estado	Cambio climático (Gay, 2003)									
		$\Delta Y_{\text{máx}}$ (%)		$\Delta K_{\text{hídr}}$ (%)		ΔF_a (%)		ΔY (%)			
		GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC
Apizaco	Tlaxcala	25.7	27.3	0.0	0.0	-15.2	7.6	6.6	37.0	6.6	37.0
Tepatitlan	Jalisco	13.3	16.3	0.0	0.0	-6.7	-1.3	5.8	14.8	5.8	14.8
Sombretete	Zacatecas	19.8	21.1	4.0	-20.0	5.4	-10.8	31.3	-13.6	31.3	-13.6
San Felipe	Guanajuato	21.0	26.2	19.4	-28.9	15.3	-20.3	66.5	-28.6	66.5	-28.6
Charcas	S.L.P.	19.0	22.6	17.5	-21.8	13.6	-15.9	58.9	-19.4	58.9	-19.4
El Rosario	B.C.N.	26.0	26.7	-1.0	-8.3	-16.1	-19.4	4.6	-6.3	-19.4	-6.3

Nota: $\Delta Y_{\text{máx}} = (Y_{\text{máx}}^{2100} - Y_{\text{máx}}^{2000})/100Y_{\text{máx}}^{2000}$; $\Delta K_{\text{hídr}} = (K_{\text{hídr}}^{2100} - K_{\text{hídr}}^{2000})/100K_{\text{hídr}}^{2000}$; $\Delta F_a = (F_a^{2100} - F_a^{2000})/100F_a^{2000}$; $\Delta Y = (Y^{2100} - Y^{2000})/100Y^{2000}$. 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.

En México no se cuenta con pronósticos relacionados con la vulnerabilidad del trigo de temporal al cambio climático, por lo que no es posible realizar comparaciones para sitios específicos. Los pequeños cambios en la productividad en los sitios Apizaco y El Rosario de los estados de Tlaxcala y Baja California, respectivamente, cuando se considera un escenario climático con el modelo GFDL-R30, se deben a cambios negativos en la calidad de los suelos; mientras que en Apizaco esta asociado a un aumento de la precipitación no efectiva y por probable lavado de nutrientes, en El Rosario esta asociado a pronósticos de disminución de la precipitación con el modelo GFDL-R30 durante las siembras de invierno; por esto el cambio negativo en el rendimiento es mayor cuando se considera un escenario obtenido con el modelo CCC.

Según Gay (2003), el modelo GFDL-R30 tiene mayor grado de confiabilidad porque reproduce mejor la climatología regional de México, considerando la concentración actual de CO₂ atmosférico. Posiblemente esto significaría mayor confiabilidad de los resultados de pronósticos de cambio de rendimientos ΔY realizados con el escenario climático desarrollado con el modelo GFDL-R30. Los pronósticos de rendimientos correspondientes al escenario climático modelado con GFDL-R30 indican aumentos

en los rendimientos de maíz y trigo (>30%) en las zonas semiáridas y áridas de México, donde IHT >2 y la precipitación es <1000 mm·año⁻¹. En las zonas semihúmedas y húmedas tropicales con IHT <2 y precipitación >1000 mm·año⁻¹ se espera una pérdida relativamente pequeña de productividad de maíz de grano (5-10%) y un aumento en la productividad del trigo (~5%). La comparación de la vulnerabilidad de los cultivos de maíz y trigo al cambio climático señala mayor crecimiento de rendimiento del trigo que del maíz, lo que se debe a la mayor respuesta de fotosíntesis del trigo a las altas concentraciones de CO₂ en la atmósfera (Cure y Acock, 1986). Por lo general, los resultados de los pronósticos sobre el cambio en los rendimientos del maíz y trigo son congruentes con lo reportado en la literatura (Conde *et al.*, 1998; Gay, 2003). Acock (1990) supone que se puede esperar una respuesta positiva promedio para plantas C4 en el mundo como respuesta a las mayores concentraciones de CO₂ en la atmósfera. Para maíz y trigo se espera un crecimiento en su productividad del 5% y 30%, respectivamente.

Por otro lado, Según el IPCC (2007a) un escenario factible de ocurrir en las zonas tropicales e intertropicales, sin conducir necesariamente a cambios en los valores anuales de las precipitaciones, son las sequías mas largas e intensas durante la estación de crecimiento de los cultivos y la intensificación de los eventos de precipitación. Esto podría influir de manera importante en el balance hidrotérmico de los suelos, y si bien en este trabajo se calcula el índice climático durante la estación de crecimiento, a partir del promedio de sus valores mensuales, la consideración plena en este modelo del escenario mencionado, el que posiblemente pronto va a desarrollarse, implicaría la modificación de la Ecuación 1 para considerar el escurrimiento superficial (S), y así considerar la lámina de agua precipitada que realmente penetra en el perfil del suelo. Otras consideraciones relevantes consisten en usar el valor de precipitación a un nivel de probabilidad determinado (p.ej. 80%) y la disminución de los intervalos de tiempo utilizados en el cálculo del IHT.

5.5.3. Mapas de cambios en la productividad de maíz y trigo en México

Los pronósticos de cambio en la productividad del maíz (Cuadro 15), y posteriormente el trigo (Cuadro 18), se pueden expresar en un mapa de gran escala para dar una idea general sobre la estructura espacial de los cambios y en forma un tanto provisional la problemática relacionada con los impactos del cambio climático sobre la productividad de estos cultivos de importancia nacional. Es necesario que en la interpretación de estos mapas se considere que las unidades cartográficas, que identifican en forma cuantitativa cierto intervalo de cambios en la productividad, representan los cambios que pueden esperarse en la productividad en las áreas de cultivo que pudieran tenerse en forma aislada o compacta dentro de esa unidad cartográfica y de manera alguna indican que son áreas donde en su totalidad se siembre y coseche ese cultivo; es decir, las áreas de cultivo que estén comprendidas dentro de la unidad cartográfica tendrán un impacto esperado como el que se indica en el mapa. Esto, por supuesto, representa una primera aproximación a la representación espacial de los pronósticos de cambio en los rendimientos de los cultivos de maíz y trigo de temporal de bajos insumos utilizando los modelos climáticos GFDL-R30 y CCC, y la metodología de pronóstico de cambio en rendimientos propuesta en este trabajo. Se considera que debido a los supuestos utilizados en la elaboración de los pronósticos relacionados con varios aspectos, desde los pronósticos inciertos de la lluvia (donde, por ejemplo, los modelos difieren hasta en el signo del cambio) hasta los debidos a estimación de variables como la radiación neta, se considera que cambios en los rendimientos en el intervalo comprendido entre $\pm 10\%$ no son significativos.

Considerando la propia naturaleza de los índices IHT, K_{nldr} y F, los sitios de referencia representan sitios de estimación de cambio de productividad basados en cambios de valores modales con validez regional, por lo que es posible asumir que el pronóstico es válido para el tipo climático donde se ubica el sitio de referencia. Se considera que el cambio en el rendimiento pronosticado en el o los sitios de referencia dentro del tipo climático reflejan, dentro de cierto intervalo de variabilidad aun desconocido en este trabajo, los cambios en los rendimientos en el maíz o trigo que ahí se cultiven.

Una cartografía que permita la toma de decisiones relacionadas con medidas de mitigación o estrategias de adaptación debe considerar mayor cantidad de sitios de referencia para representar de forma más apropiada los pronósticos en el país; lo cual permita finalmente la subdivisión de algunas unidades que representen los tipos climáticos para lograr un pronóstico más detallado, indicando la variabilidad y/o probabilidad (intervalos de confianza) de los cambios en los rendimientos en cada una de las unidades cartográficas; las cuales, además, indiquen áreas productoras o áreas delimitadas de acuerdo a criterios de aptitud agroecológica, los cuales reflejen el potencial productivo actual.

La serie de mapas de las Figuras 10-13 muestran en general una parte considerable del territorio nacional con pronósticos de cambio de la productividad agrícola de maíz y trigo con dos modelos climáticos. Lo que se nota es que según este trabajo se espera menor vulnerabilidad del maíz al cambio climático en comparación con los pronósticos hechos anteriormente por Flores *et al.* (2003) y Conde *et al.* (2003); lo que puede explicarse por razón del uso en este trabajo de un modelo diferente de estimación de la productividad potencial agrícola; que aun cuando considera un menor nivel de detalle en la modelación de los procesos ecofisiológicos es ampliamente utilizado y aceptado a nivel mundial, y útil para cualquier cultivo. Además, debido a la consideración del factor de cambio en la fertilidad de los terrenos agrícolas de temporal atribuible al cambio climático, utilizando el índice integral de fertilidad del suelo.

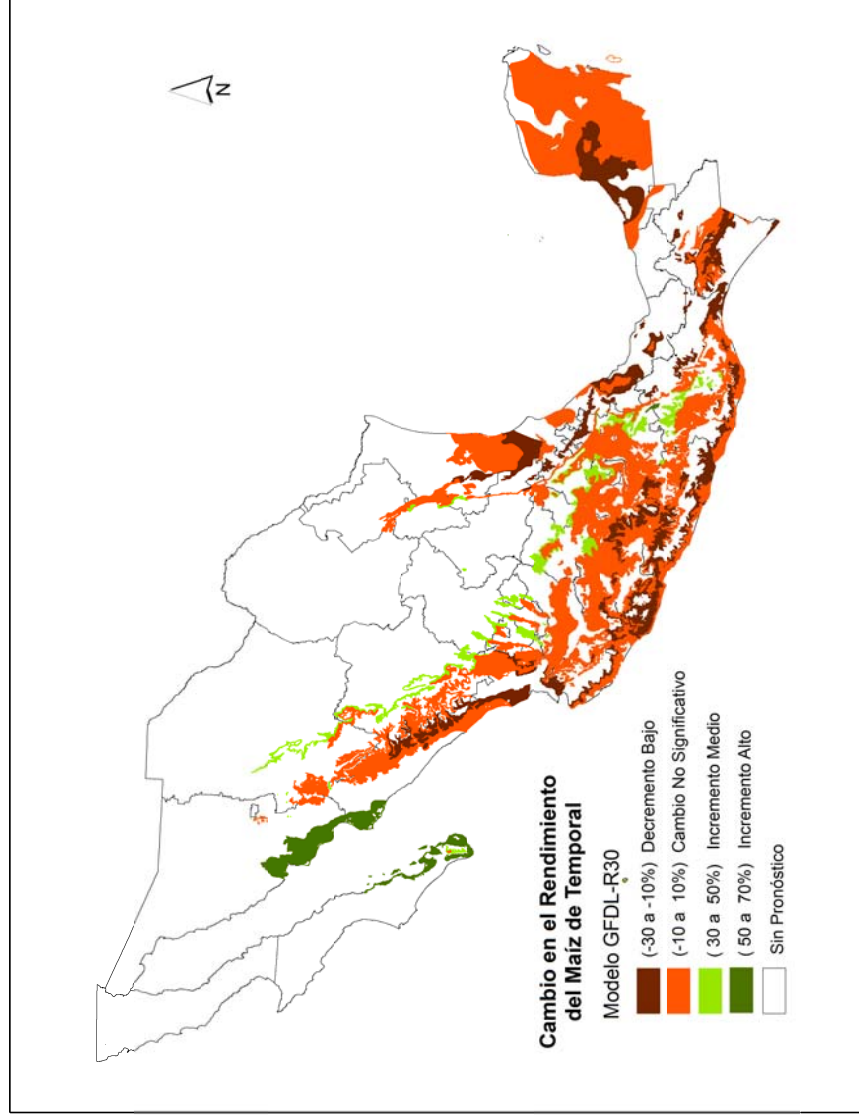


Figura 10. Cambios en la productividad de maíz de temporal en México utilizando los escenarios climáticos generados con el modelo climático GFDL-R30.

Las Figuras 10 y 11 muestran los probables impactos sobre la productividad del maíz de temporal que pueden tener los dos escenarios generados con dos modelos climáticos que esencialmente difieren en sus pronósticos de la precipitación. Mientras que el modelo GFDL-R30 pronostica cambios positivos en la precipitación y temperatura del aire esto permite concluir que de darse este escenario los cambios dominantes serían no significativos en la mayor parte de la península de Yucatán y el centro del país en las tierras de clima templado subhúmedo. Si los incrementos de las temperaturas son un poco más pequeños y se presenta un decremento de las precipitaciones, como pronostica el modelo CCC, en estas mismas áreas podría presentarse un incremento bajo pero significativo en los rendimientos, sobre todo en la parte central del país donde un incremento en las temperaturas podría mejorar la estación de crecimiento por mejores condiciones térmicas para el desarrollo y

crecimiento del cultivo de maíz. Además, se pueden esperar algunos decrementos bajos en la productividad en las tierras localizadas en la costa sur de Sonora y decrementos medios cercanos a las costas del Océano Pacífico, Yucatán y en los límites entre Veracruz y Tamaulipas.

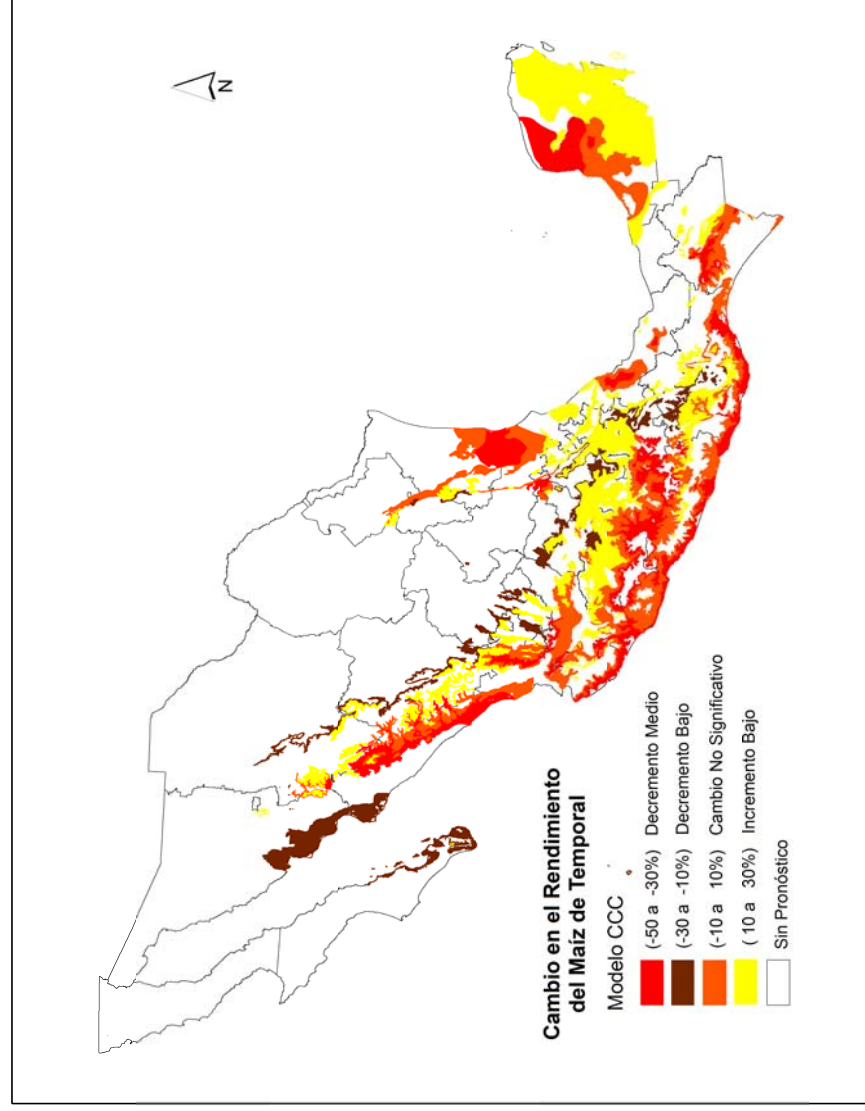


Figura 11. Cambios en la productividad de maíz de temporal en México utilizando los escenarios climáticos generados con el modelo climático CCC

Para el caso del trigo de temporal se tienen pronósticos contrarios de cambio en los rendimientos en una amplia franja central del país que recorre desde las llanuras de Querétaro, las del norte de Guanajuato, potosinas y zacatecanas, hasta las llanuras de Durango y meseta Chihuahuense. El modelo GFDL-R30 permite pronosticar incrementos altos y el modelo CCC decrementos bajos, lo que claramente muestra la restricción debida a la necesidad de un mejor balance de humedad. Solo algunos pequeños valles de las Sierras de B.C.N. tienen pronósticos de cambios no significativos con los dos modelos debido a que éstos no tienen cambios importantes

en sus pronósticos en la estación de crecimiento correspondiente al otoño-invierno, la estación donde se cultiva el trigo de manera muy marginal.

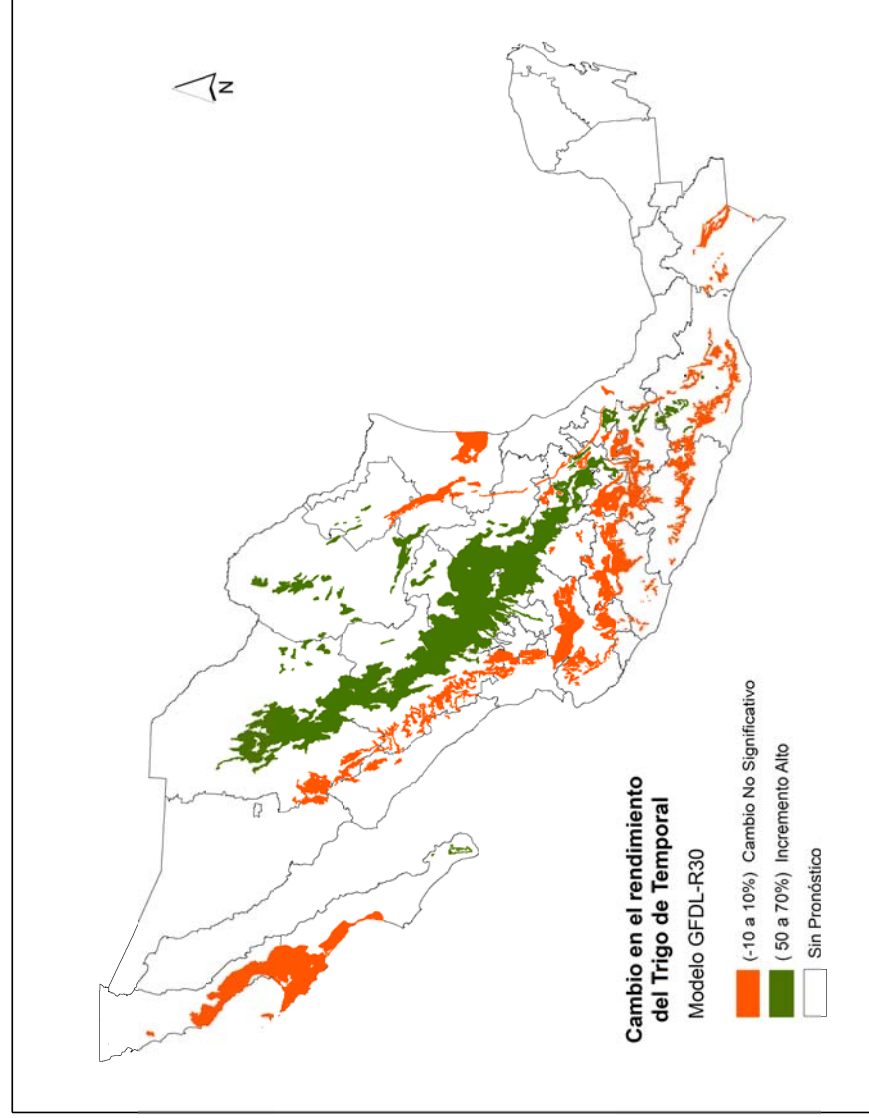


Figura 12. Cambios en la productividad del trigo de temporal con bajo nivel de insumos en México utilizando los escenarios climáticos generados con el modelo climático GFDL-R30.

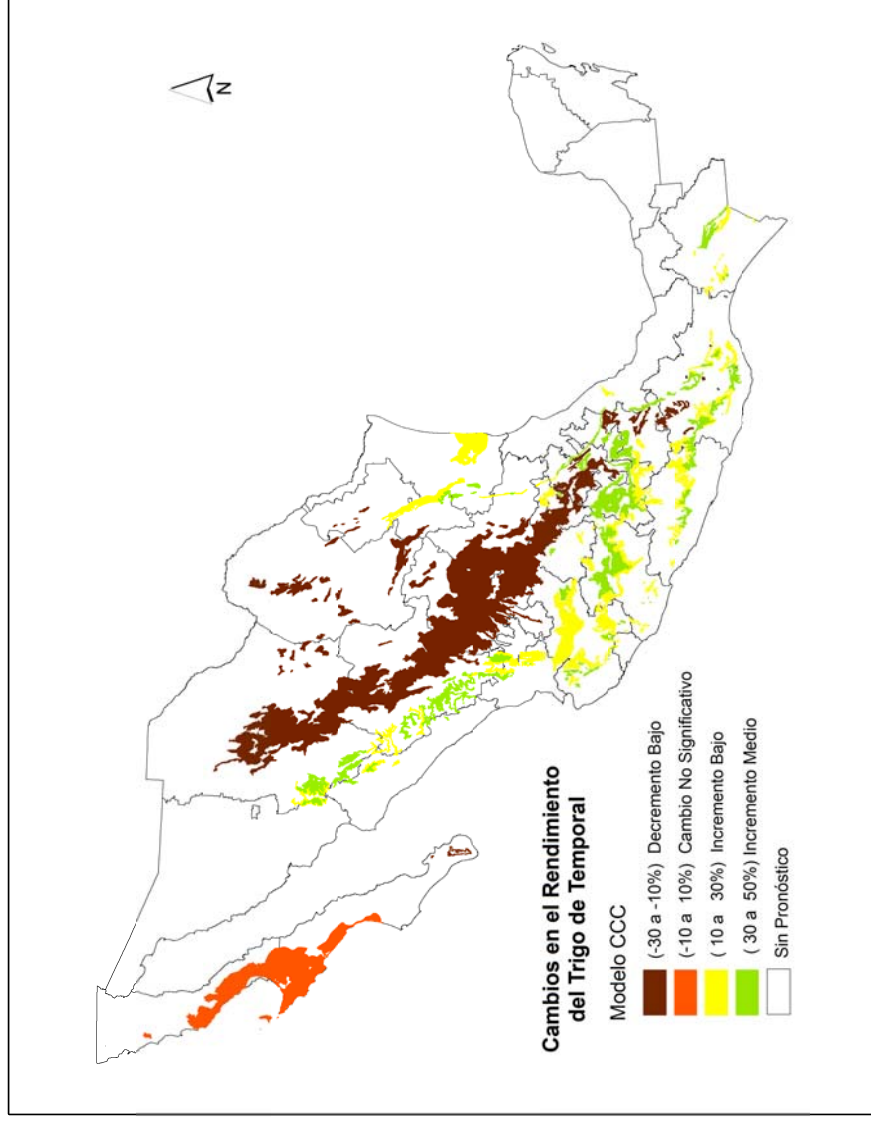


Figura 13. Cambios en la productividad de trigo de temporal con bajo nivel de insumos en México utilizando los escenarios climáticos generados con el modelo climático CCC

5.6. Medidas de mitigación del deterioro de la productividad agrícola por el cambio climático

El desarrollo de medidas de mitigación o adaptación para la agricultura de temporal es necesario aun en los sitios donde aparentemente un cambio en el clima puede resultar benéfico en algunos sentidos. Por ejemplo, en el municipio Jesús María de los Altos de Jalisco, actualmente considerado área de siembra subóptima de la variedad de maíz V-223 (Flores, 1994), un incremento en las temperaturas acorta significativamente el ciclo de desarrollo el cultivo de maíz (de 163 a 120 días) librándolo del peligro que significan las heladas tempranas que comienzan el 24 de octubre (Anexo I y Cuadro 19). Sin embargo, un escenario climático con una disminución de la precipitación puede significar deficiencia hídrica que puede

impactar en el rendimiento de manera negativa, pues acorta de manera significativa la estación de crecimiento por disponibilidad de humedad.

El cambio en la duración del ciclo del cultivo de 163 a 122 días resulta significativo en casos como éste, por lo que es conveniente considerar este aspecto en la aplicación del método del IHT en la Ecuación 16, en el caso de aplicarlo con el propósito de generar medidas de mitigación y adaptación más específicas, para estimar el impacto del cambio climático sobre la productividad potencial.

Cuadro 19. Efecto del cambio climático al final del siglo XXI sobre las características de la estación de crecimiento en el municipio Jesús María de los Altos de Jalisco y en la fenología de la variedad de maíz de temporal V-223 (con requerimientos térmicos de 1279 Grados Día Desarrollo)

Variable	Escenario		
	Actual	GFDL-R30	GFDL-R30 CCC
EC (días)	140	146	131
	(25 may-12 oct)	(22 may-15 oct)	(22 may-15 oct) (30 may-8 oct)
Tdía (°C)	18.1	20.5	20.4
Pr (mm)	791.9	896.0	902.5
ETP (mm)	397.9	350.5	347.2
GDDEC (°C)	1128	1537	1437
R1-R6 (días)	95	69	69
n (días)	163	120	122
DCC	25 may-4 nov	22 may-19 sep	30 may-29 sep 30 may-2 oct

Nota 1: EC - Duración de la estación de crecimiento por disponibilidad de humedad de acuerdo con el método de la FAO; Tdía - Temperatura media diaria durante el ciclo de desarrollo del maíz; Pr - Precipitación media durante el desarrollo del maíz; ETP - Evapotranspiración potencial por el método de Thornthwaite durante el desarrollo del maíz; GDDEC - Grados Días Desarrollo durante la estación de crecimiento por disponibilidad de humedad; R1-R6 - Días de aparición de flor femenina a madurez fisiológica; n - Duración del ciclo del cultivo para la fecha de siembra especificada; DCC - Duración del ciclo del cultivo.

Nota 2: Los cálculos se realizaron con ayuda del programa Agroclim V.1.0 del Dr. Lorenzo Armando Aceves Navarro, Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco.

La etapa fenológica del maíz que va de aparición de la flor femenina a madurez fisiológica (R1-R6) está fuertemente correlacionada con el rendimiento (Flores, 1994). Un acortamiento de los días en esta etapa de unos 25 días puede que no signifique en este caso una disminución en el rendimiento, debido a que el incremento de las temperaturas nocturnas apenas logra alcanzar valores cercanos al intervalo óptimo.

Sin embargo, en las zonas tropicales secas y semiáridas del país, un cambio climático también significa aumentos en igual magnitud de la temperatura diurna y

nocturna (IPCC, 2007a), lo cual puede tener un significado diferente. Primero, los incrementos de la temperatura media aumentarán la tasa de desarrollo del cultivo de maíz. Segundo, las altas temperaturas nocturnas pudieran disminuir la duración del periodo de llenado de grano (Wilson *et al.*, 1973), lo que significa que incrementos paulatinos en las temperaturas nocturnas implicarán disminuciones progresivas en el rendimiento (Duncan, 1975).

Lo anterior permite concluir que si se tiene un incremento de las temperaturas nocturnas en estas zonas de cultivo, necesariamente el sostenimiento de los rendimientos debe implicar un desplazamiento de las zonas de cultivo a las partes más altas. En general, de lo anterior puede concluirse que son las regiones tropicales secas y áridas del país las que serán más perjudicadas por un escenario de disminución de las precipitaciones.

El conjunto de medidas de mitigación o adaptación deberán considerar las condiciones socioeconómicas de las comunidades que desarrollan estos sistemas de producción implementando un conjunto de prácticas de manejo de la humedad y del calor en el ambiente aéreo, probablemente utilizando barreras vivas, cortinas rompevientos, cultivos de cobertura, cambios en las fechas de siembra, variedades y cultivos más resistentes al estrés hídrico y calor, y otras estrategias.

En forma general, se pueden considerar los casos de pérdida potencial de cosecha de los cultivos agrícolas por incremento de la temperatura del aire y cambio de precipitación, principalmente, y en forma resumida sugerir las siguientes medidas de mitigación diferenciadas para las zonas climáticas de México:

1. En las partes de las zonas áridas donde se espera decremento de la precipitación se pueden recomendar medidas relacionadas con:
 - Captación de la lluvia a través de la formación de microcuencas u otras medidas, y conservación de la humedad del suelo con “mulch”
 - Cambio de la fechas de la siembra
 - Cambio de tipo de uso de los terrenos agrícolas considerando el establecimiento de cultivos más resistentes a la sequía.

2. En las partes de las zonas semiáridas, así como de las zonas tropicales secas y semisecas donde se espera decremento en la precipitación, se pueden considerar medidas relacionadas con el cambio de la fecha de siembra.
3. En las partes de las zonas tropicales húmedas donde se espera incremento en la precipitación se pueden considerar medidas relacionadas con la prevención de la inundación de los terrenos agrícolas y el combate de la sobrehumedad del suelo:
 - Prevención de desbordamiento de los ríos a través de obras de regularización de sus regímenes hidrológicos
 - Aplicación del drenaje agrícola superficial conjuntamente con otros tipos correspondientes a las condiciones topográficas, edáficas e hidrogeológicas de cada terreno y al tipo de su uso.
 - Promoción del desarrollo de estrategias productivas adaptativas de comunidades locales con tradición cultural (Toledo, 1992).

El conjunto de medidas de mitigación y/o adaptación propuestas, para tener un mayor nivel de adopción por los agricultores, deben ser acordes con su situación socioeconómica, no ser contradictorias a las políticas de desarrollo agropecuario regional y nacional dictadas en el país, y observar el principio de precaución que aconseja tomar las medidas necesarias ante una problemática que, si bien aún incierta, si se produce podría tener efectos negativos de gran alcance si no se hace nada al respecto. Por esto deben ser medidas a implementarse desde el corto plazo, y con beneficios concretos aún cuando el escenario pronosticado no se presente. Es decir, construir una cultura de acción a corto plazo que permita afrontar problemáticas que podrían agudizarse a largo plazo.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Se desarrolló la metodología para evaluar la vulnerabilidad de los cultivos agrícolas de temporal al cambio climático global durante el siglo XXI en México, considerando también el factor de alteración de la fertilidad de los

suelos agrícolas atribuible al mismo cambio climático, el cual prácticamente no se ha considerado en las investigaciones realizadas hasta el momento.

- Utilizando la información recién publicada sobre las propiedades químicas, biológicas y físicas de los suelos vírgenes ubicados en diferentes zonas climáticas de México en los terrenos poco inclinados (con pendientes menores de 3%) se han obtenido las relaciones cuantitativas entre los valores modales regionales de algunas de estas propiedades y el índice integral de fertilidad de los suelos y el índice hidrotérmico local (IHT) para las condiciones climáticas promedio anuales al inicio del siglo XXI.
- Se comprobó la hipótesis de que el índice IHT (o índice de aridez de Budyko) se puede utilizar para pronosticar la alteración en la fertilidad de los suelos agrícolas atribuible al cambio climático global.
- Los pronósticos de rendimientos de maíz y trigo de temporal realizados con la metodología de la FAO considerando los cambios de CO₂ en la atmósfera, radiación fotosintéticamente activa, temperatura, precipitación y adicionalmente el factor de alteración de la fertilidad del suelo atribuible al cambio climático global permite concluir que en las regiones de país (como, por ejemplo, los estados Sonora, Zacatecas, San Luis Potosí, Guanajuato, Puebla y Estado de México) donde se pronostican incrementos en la temperatura del aire y aumentos en la precipitación, se esperan incrementos significativos en el rendimiento (hasta 70 %) de estos cultivos y mejoramiento de la fertilidad del suelo. Sin embargo, en zonas semihúmedas y húmedas tropicales (como, por ejemplo, los estados Jalisco, Guanajuato, México y Veracruz) el aumento en la precipitación puede ocasionar un deterioro de la fertilidad de los suelos. El deterioro de la fertilidad natural de los suelos probablemente afectará negativamente la productividad de los terrenos agrícolas en algunas zonas, causando una disminución en los rendimientos hasta de 24%.
- Los resultados de este trabajo indican que se espera menor vulnerabilidad del maíz al cambio climático en comparación con los pronósticos hechos anteriormente por Flores *et al.* (2003) y Conde *et al.* (2003); lo que puede

explicarse por razón del uso en este trabajo de un modelo diferente de estimación de la productividad potencial agrícola; que aun cuando considera un menor nivel de detalle en la modelación de los procesos ecofisiológicos, es ampliamente utilizado y aceptado a nivel mundial, y útil para cualquier cultivo. Además, debido a la consideración del factor de cambio en la fertilidad de los terrenos agrícolas de temporal atribuible al cambio climático, utilizando el índice integral de fertilidad del suelo.

- En las regiones del país donde se espera pérdida significativa de cosecha de maíz y trigo por (por ejemplo, en los estados de Jalisco, San Luis Potosí, Zacatecas, Guanajuato, Guerrero, Puebla y México) se puede reducir el impacto negativo del cambio climático a través de cambio de la fecha de siembra acorde a las nuevas estaciones de crecimiento por disponibilidad de humedad y otras medidas de mitigación y adaptación.
- El análisis de vulnerabilidad de los componentes del rendimiento final de los cultivos agrícolas, tales como rendimiento potencial, índice de disponibilidad de agua en el suelo e índice de fertilidad, indica que es importante considerar la alteración de la fertilidad del suelo agrícola atribuible al cambio climático. Ignorar este factor puede causar errores significativos, en más de 25%, en las estimaciones de los rendimientos.
- Las predicciones preliminares realizadas con el método del IHT muestra que el cambio climático esperado durante el siglo XXI probablemente causará los efectos siguientes en alteración de fertilidad del suelo agrícola:
 - Un moderado y débil decremento en la fertilidad de la capa arable de los suelos vírgenes, principalmente en la región central de México, donde la producción de granos es importante ahora;
 - Un relativamente significativo decremento (mayor del 20%) en la fertilidad de los suelos en las zonas tropicales húmedas del sureste de México donde está concertada la producción de caña de azúcar y otros cultivos tropicales de importancia.

Lamentablemente no se puede comparar los pronósticos de alteración de fertilidad del suelo agrícola hechos con el método del IHT con otros debido a la prácticamente ausencia de tales trabajos en México.

- En caso de duplicación de la concentración del CO₂ actual en la atmósfera se espera una estimulación de la asimilación de carbono en las plantas C3 (como el trigo) en mayor medida, en comparación con las plantas C4 (como el maíz). Esto traerá como consecuencia un incremento en los rendimientos potenciales (relacionados con la concentración de CO₂, la radiación solar y temperatura del aire) del orden del 13 al 27%; los incrementos más bajos se asocian a los casos cuando la temperatura del aire rebasa los límites térmicos óptimos para los cultivos.
- Las estimaciones de vulnerabilidad de los cultivos agrícolas al cambio climático en las zonas tropicales húmedas consideran la necesidad de realizar medidas de protección de los terrenos contra su inundación y exceso de agua en el suelo tales como prevención de desbordamiento de ríos y aplicación del drenaje agrícola parcelario de apoyo. En caso de no cumplir con estas medidas, las consecuencias obvias de incremento de la precipitación y decremento del índice climático IHT consistirán en daños mucho más significativos que los pronosticados anteriormente.

6.2. Recomendaciones

- Utilizar la metodología desarrollada y descrita en el presente trabajo para:
 - Ampliar el área de estudio para la estimación de la vulnerabilidad de maíz y trigo y otros cultivos de importancia nacional de temporal considerando otros estados de México y otras regiones climáticas.
 - Pronosticar la vulnerabilidad de diferentes cultivos agrícolas al cambio climático en los terrenos con diferente geomorfología.
 - Pronosticar la vulnerabilidad de diferentes cultivos agrícolas utilizando los escenarios climáticos más recientes, los cuales se supone deben

publicarse posteriormente y en los cuales debería resolverse el problema del pronóstico más confiable de cambio de precipitación.

- Considerar los resultados de una valoración reciente de los escenarios climáticos, relacionados con sequías mas largas e intensas durante la estación de crecimiento de los cultivos y la intensificación de los eventos de precipitación, factible de ocurrir principalmente en las zonas tropicales e intertropicales(IPCC, 2007a).
- Establecer la relación entre el índice hidrotérmico local y el índice integral de fertilidad para los suelos agrícolas de temporal ubicados en terrenos con diferente geomorfología y contrastarla con la relación similar para los suelos vírgenes no usados en la agricultura, pero ubicados en los terrenos con la misma geomorfología.
- Realizar estimaciones de la vulnerabilidad de cultivos para zonas productoras importantes en México, considerando:
 - Composición de variedades de importancia en la zona.
 - Los cambios en la fenología de los cultivos considerando los conceptos de grados días desarrollo.
 - Introduciendo el probable impacto de las principales plagas y malezas agrícolas utilizando el conocimiento de sus ciclos biológicos con los Grados Días Desarrollo.
- Realizar valoraciones relacionadas con impactos económicos y análisis relacionados con la búsqueda de medidas de mitigación del impacto del cambio climático en los sistemas de producción agrícolas.
- En forma preliminar y resumida, considerando los resultados de esta investigación, para prevenir pérdida de cosecha por el cambio climático global, pronosticada en algunas regiones del país, se puede recomendar las siguientes medidas de mitigación:

En las partes de las zonas áridas donde se espera decremento de la precipitación se pueden recomendar medidas relacionadas con:

- Captación de la lluvia a través de la formación de microcuencas u otras medidas, y conservación de la humedad del suelo con “mulch”
- Cambio de la fechas de la siembra
- Cambio de tipo de uso de los terrenos agrícolas considerando el establecimiento de cultivos más resistentes a la sequía.

En las partes de las zonas semiáridas, así como de las zonas tropicales secas y semisecas donde se espera decremento en la precipitación, se pueden considerar medidas relacionadas con el cambio de la fecha de la siembra.

En las partes de las zonas tropicales húmedas donde se espera incremento en la precipitación se pueden considerar medidas relacionadas con la prevención de la inundación de los terrenos agrícolas y el combate de la sobrehumedad del suelo mediante:

- Prevención de desbordamiento de los ríos a través de obras de regularización de sus regimenes hidrológicos
- Aplicación del drenaje agrícola superficial conjuntamente con otros tipos correspondientes a las condiciones topográficas, edáficas e hidrogeológicas de cada terreno.

7. LITERATURA CITADA

- Acock, B. 1990. Effects of carbon dioxide on photosynthesis, plant growth, and other processes. *En*: 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 CO₂ 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.
- Arnold, R.W., I. Szabolcs, V.O. Targulian (Eds.). 1990. Global soil change. Publ. IIASA, Laxenburg, Austria, 109 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 regimenes hídrico, salino y de nutrientes en suelos bajo riego. Ed. Agropromizdat, Moscú, URSS, 204 p. (en ruso)
- Balbontín N., C.A. 2004. Estimación de las alteraciones en las propiedades de los suelos atribuibles al cambio climático global. Tesis de Maestría en Ciencias. Especialidad de Hidrociencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México, 98 p.
- Barradas, V. 1995. Fenología cambio climático. *En*: México ante el cambio climático. Memorias. Segundo taller de Estudio de País: México. Cuernavaca, Morelos, México, 8 a 11 de mayo. 197-201 p.
- Bautista C., M. A. 2001. Indicadores de calidad del suelo en tres cronosecuencias de bosque mesófilo, Sierra Norte, Oaxaca. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Bazzaz, F., W. Sombroek (Eds.). 1996. Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes. FAO. Roma, Italia. 146 p.
- 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.
- Brunt D. 1934. *Physical and Dynamical Meteorology*. Cambridge Univ. Press, London. 441 p.

- 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.
- Chang, J. 1981. Corn yield in relation to photoperiod, night temperature and solar radiation. *Agricultural Meteorology*, 24: 253-262.
- Chang, C. C. 2002. The potential impact of climate change on Taiwan's agriculture. *Agric. Econ.* 27, 51-64.
- Conde C.A.C., D. Liverman, M. Flores, R. Ma. Ferrer, R. Araujo. 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>
- Conde, C., R.M. Ferrer, C. Gay y R. Araujo. 2004. Impactos del cambio climático en la agricultura de México. 227-238. *En: J. Martínez y A. Fernández B. (Comp.). Cambio climático: Una visión desde México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. México.*
- Conde, C., R. Ferrer, S. Orozco. 2006. *Climate Change and Climate Variability Impacts on Rainfed Agricultural Activities and Possible Adaptation Measures. A Mexican Case Study. Atmosfera* 19(3):181-194.
- 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.
- Cooper, P.I. 1969. The absorption of solar radiation in solar stills. *Solar Energy*, 12(3):333-336.
- 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
- 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.
- Dokuchaev, V.V.1898. Estudio de zonas naturales. Las zonas horizontales y verticales. Sociedad Rusa de Naturalistas. Rusia (en ruso). 210 p.
- Doorenbos J., A.H. Kassam. 1980. Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Publ. No.33. FAO. Roma, Italia. 212 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.
- Duffie, J.A. and W.A. Beckman. 1980. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley and Sons. New York.
- Duncan, W.G., 1975. Maize. *In*: L.T. Evans (Ed.). *Crop physiology*. Cambridge University Press. London. 23-50 p.
- Eakin, H. 2000. Small holder maize production and climatic risk: A case study from central México. *Climatic Change* 45(1), 19–36.
- Evans, L.T., R.A. Fischer. 1999. Yield potential: Its definitions, measurement, and significance. *Crop Sci.*, 39: 1544-1551.
- 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>
- Flores-López, H.E. 1994. Análisis agroclimático del noreste de Jalisco, México, para el manejo en la producción de Maíz (*Zea mays* L.) de temporal. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 155 p.
- Flores, M., R. Araujo y E. Betancourt. 2003. Vulnerabilidad de las zonas potencialmente aptas para maíz de temporal en México ante el cambio climático. *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>
- Frère M., G.F. Popov. 1986. Pronóstico agrometeorológico del rendimiento de los cultivos. FAO. Roma, Italia. 194 p.
- 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

- 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).
- Hagan R.M., H.R. Haise, T.W. Edminster. (Eds.). 1987. Irrigation of agricultural lands. *Am. Soc. Agron. Publ.*, No. 11. Madison, USA, 1180 p.
- 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.
- Hansen, J., L. Nazarenko, R. Ruedy, M. Sato, J. Willis, A. Del Genio, D. Koch, A. Lacic, K. Menon, S. Lo, T. Novakov, J. Perlwitz, G. Russell, G. A. Schmidt y N. Tausnev. 2005. Earth's Energy Imbalance: Confirmation and Implications. *Science*, 308: 1431-1435.
- 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>
- Hussain, I., K. R. Olsen, M. M. Wander, and D. L. Karlen. 1999. Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil & Tillage Research* 50:237-249.
- Hyams, D. 1997. A curve fitting system for Windows (computer program). Versión 1.3.4. Microsoft. San Francisco, EEUU. 71 p.
- Ingram, J. 1996. The effects of Global Change on Soils. *Bulletin of the ISSS*. 90(2):63-65.
- 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.
- IPCC. 2001a. Cambio climático. La base científica. Tercer informe de evaluación. OMM-PUMA, 83 p.
- 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

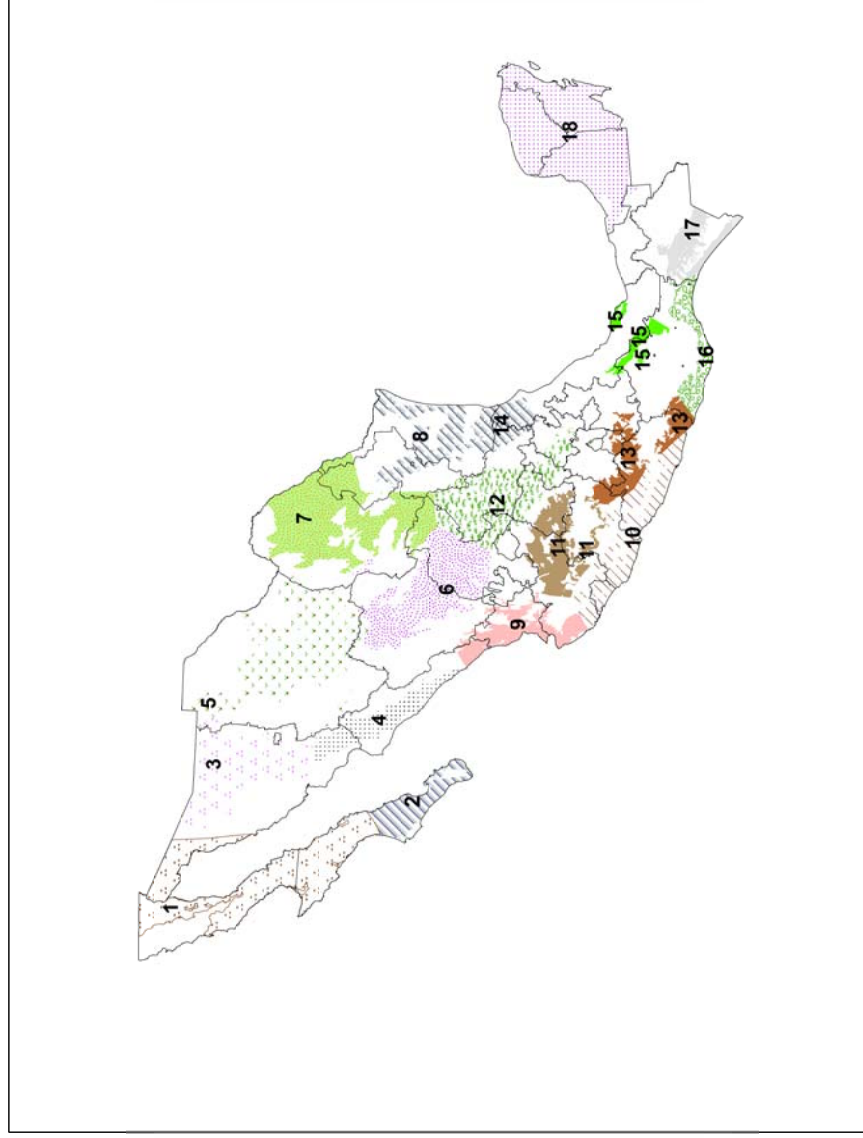
- IPCC. 2007b. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. Summary for Policymakers. Brussels, April 2007. 22 p.
- Jones, C.A. and J.R. Kiniry, 1986, CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development, Texas A&M Press, College Station, 194 p.
- Karlen, D.L., Wollenhaupt, N.C., Erbach, D.C., Berry, E.C., Swan, J.B., Each, N.S. y Jordahl, J.L. 1994. Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. *Soil Tillage Research* 31: 149-167.
- 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
- Keeling, C.D., T.P. Whorf. 2005. Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. En *Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, TE. EEUU. <http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/contents.htm>*
- Kevin J. Young and Steve P. Long. 2000. Crop ecosystem response to climate change: maize and sorghum. In: K.R. Reddy and H.F. Hodges. (Eds.). 2000. *Climate change and global crop productivity*. CABI Publishing. 107-131 p.
- 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.
- Knorr, W., I. C. Prentice, y E. A. Holland. 2005. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature* 433:298-301.
- Koster R.D., Suárez M.J. 1999. A simple framework for examining the interannual variability of land surface moisture fluxes. *Journal of climate*, 12: 1911-1917.
- 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. 1994. An strategy to determine regional climate change. En: México ante el cambio climático. Primer Taller Estudio de País: México, Cuernavaca, Morelos, México, pp. 45-51.
- Magaña, V., C. Conde, O. Sánchez., C. Gay. 1997. Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico. *Climate Res.* 9: 107-114.
- Magrin, G., C. Gay G., D. Cruz C., J.C. Jiménez, A.R. Moreno, G.J. Nagy, C. Nobre and A. Villamizar, 2007. *Latin America. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 581-615.

- 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.
- Muñoz, P. D. y R. G. Hernández. 2004. Situación actual y perspectiva del maíz. Sistema de información y estadística agroalimentaria y pesquera (SIAP), SAGARPA. México, D.F. 136 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. Bakhaeva 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.
- 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.
- Palma, B., C. Conde, R. Morales y G. Colorado. 2007. Escenarios de Cambio Climático para Veracruz. En: Tejeda-Martínez, A. Plan Estatal de Acción Climática del Estado de Veracruz. http://www.atmosfera.unam.mx/cambio/escenarios/Escenarios_Cambio_Climático_para_Veracruz.htm
- Parry, M., 1993. Climate change and the future of Agriculture. International Journal of Environment and Pollution, 3(1 -3):. 13-30.
- Pegov, C.A., P.M. Jomyakov. 1991. Modelación del desarrollo de los sistemas ecológicos. Gidrometeoizdat. San Petersburgo, Rusia. 223 p. (en ruso).
- Peters, D. B., J.W. Pendleton, R.H. Hageman and C.M. Browth. 1971. Effect of night temperature on grain yield of corn, wheat, and soybeans. Agron. J. 63:809.
- 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.
- Reddy, K.R., H.F. Hodges (Eds.). 2000. Climate change and global crop productivity. CABI. Nueva York, EEUU. 472 p.
- Reichstein, M., T. Kätterer, O. Andren, P. Ciais, E.D. Schuize, W. Cramer, D. Papale y R. Valentini. 2005. Does the temperature sensitivity of decomposition vary with soil organic matter quality? Biogeosciences discussions, 2:738-747.
- Ritchie, J., U. Singh, D., Godwin and I. Hunt. 1989. A User's Guide to CERES - Maize V2.10, Michigan State University, International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, EUA.
- Richter, D.D. and D. Markewitz. 2001. Understanding soil change over millennia, centuries and decades. Cambridge. University Press. 255 p.
- Ruelle, D. 1989. Chaotic evolution and strange attractors. The statistical analysis of time series for deterministic nonlinear systems. Cambridge University Press. Cambridge, RU. 96 p.

- 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.
- Sellers, W. D. 1965. *Physical Climatology*. University of Chicago Press.
- Shishov L.L., D.N. Durmanov, I.I. Karmanov, V.V. Efremov. 1991. *Fundamentos teóricos y estrategias de manejo de productividad de suelos*. Publ. Agropromizdat, Moscú, Rusia, 304 p. (en ruso)
- SIAP (Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera). 2005. *Anuario estadístico de la producción agrícola*. <http://www.siap.sagarpa.gob.mx/Publicaciones/Archivos/maiz90-04.pdf>
- Smith, J. L., J. J. Halvorson J. J., and R. I. Papendick. 1993. Using multiple-variable indicator kriging for evaluating soil quality. *SSSAJ* 57:743-749.
- SQL-Soil Quality Institute. 1996. *Indicators for Soil Quality Evaluation*. USDA Natural Resources Conservation Service. Prepared by the National Soil Survey Center in cooperation with The Soil Quality Institute, NRCS, USDA, and the National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.
- Sys, C., E. Van Ranst, J. Debaveye. 1991. Land evaluation. Part II. Methods in land evaluation. General Administration for Development Cooperation. Brussels, Bélgica. 247 p.
- Taylor S.A. 1972. *Physical edafology. The physics of irrigated and nonirrigated soils*. San Francisco. Freeman and Co., USA, 533 p.
- Tejeda-Martínez, A., J. L. Vásquez-Aguirre y D. A. Rivas-Camargo. 1999. Algoritmos simples para estimar datos mensuales de irradiación solar y horarios termohigrométricos en la república mexicana. IV Congreso de Meteorología de la CFE. México, D.F. 29-30 de abril de 1999. *Licenciatura en Ciencias Atmosféricas*, Facultad de Instrumentación Electrónica de la Universidad Veracruzana. 5 p.
- 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.
- Toledo, V. M. 1992. What is ethnoecology?: origins, scope and implications of a rising discipline. *Etnoecológica* 1:5-21.
- Torres R., E. 1995. *Agrometeorología*. Trillas. D.F., México. 154 p.
- 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. 585-602 p.

- Villaseñor M., H.E., E. Espitia R. 2000. El trigo de temporal. Libro técnico No. 1. División Agrícola. INIFAP. México. 311 p.
- Volobuev, V. R. 1974. Introducción a la energía de formación de suelos. Nauka Publ., Moscú, URSS. 127 p. (en ruso).
- Wielicki, B.A., T. Wong, N. Loeb, P. Minnis, K. Priestley, R. Kandel. 2005. Changes in Earth's albedo measured by satellite. *Science*, 308(5723):806.
- Wilson, J.H., M.St. J. Clowes and J.C.S. Allison. 1973. Growth and yield of maize at different altitudes in Rhodesia. *Ann. Appl. Biol.*, 73:77-84.
- Young, A. 1994. Modelling changes in soil properties. *En: Soil Resilience and Sustainable Land Use*. CABI. Bristol, RU. 423-447 p.

8. ANEXOS



Anexo A. Mapa de ubicación de las zonas de Douglas donde se tienen pronósticos de cambio climático en México con los modelos climáticos GFDL-R30 y CCC por Gay (2003)

Anexo B. Escenarios climáticos de las variables Temperatura, Precipitación y Radiación Global por zonas de Douglas en la República Mexicana (Gay, 2003)

Modelo Climático: GFDL-R30. Cambio en la temperatura mensual por región (°C)

MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Enero	4.1	3.9	4.3	4.1	3.8	3.4	2.9	2.9	3.9	3.7	3.6	2.9	2.7	2.6	2.3	2.2	2.1	2.4
Febrero	3.8	3.5	3.9	3.7	4.0	3.8	4.1	3.7	3.6	3.3	3.3	2.9	3.1	2.9	3.2	2.9	2.8	2.9
Marzo	4.4	4.1	5.5	5.0	5.6	4.7	4.4	3.6	4.0	3.5	3.7	3.3	3.2	3.2	2.9	2.7	2.6	2.6
Abril	3.0	2.6	4.0	3.6	4.8	4.0	4.7	3.7	2.9	2.7	3.1	3.0	3.2	2.4	2.1	2.0	1.5	1.2
Mayo	3.3	2.6	4.0	3.3	4.2	3.2	3.5	3.0	2.5	2.4	2.5	2.3	2.1	2.5	2.1	2.3	2.9	2.9
Junio	3.5	2.9	3.5	3.1	3.4	2.8	2.9	2.7	2.5	2.6	2.6	2.7	2.6	2.7	2.5	2.4	2.5	2.4
Julio	2.8	2.2	3.3	2.4	3.0	2.6	3.2	2.0	2.2	2.2	2.4	2.4	2.4	2.8	2.6	2.6	2.8	3.3
Agosto	2.7	2.0	2.2	2.0	1.9	2.0	2.4	2.9	2.2	2.3	2.4	2.5	2.4	3.0	2.4	2.3	2.4	2.8
Septiembre	3.3	2.5	2.8	2.5	2.6	2.6	3.0	3.2	2.4	2.5	2.6	2.7	2.6	3.1	2.6	2.5	2.5	3.0
Octubre	3.6	2.8	3.8	3.2	3.8	3.1	3.2	3.0	2.7	2.7	2.7	2.7	2.6	2.9	2.6	2.6	2.7	2.9
Noviembre	2.7	2.7	3.4	3.2	3.6	3.5	3.7	3.6	2.7	2.5	2.7	0.7	2.5	3.2	2.5	2.5	2.8	2.9
Diciembre	3.2	3.6	3.5	3.5	3.5	3.6	4.1	4.0	3.7	3.7	3.7	3.8	3.5	3.3	3.5	2.9	2.7	2.7

REGIONES DE DOUGLAS

REGION	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Enero	0.7	0.9	0.8	0.9	0.8	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.6	1.6	1.5	0.9	0.9
Febrero	0.7	0.5	0.8	0.7	0.8	0.9	0.9	1.0	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.8	0.9	0.8
Marzo	1.1	0.8	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9	1.1	1.1	1.1	1.3	1.3	1.2	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3
Abril	0.8	1.0	0.9	1.0	0.9	0.8	0.8	0.9	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	1.1	1.3
Mayo	1.1	2.0	1.3	1.5	1.3	1.0	1.1	1.4	1.3	1.3	1.3	1.1	1.0	1.2	0.9	0.9	0.9	1.1
Junio	1.1	1.0	0.8	0.6	0.9	0.8	1.0	1.2	1.4	1.3	1.4	1.5	1.2	1.5	1.5	1.5	1.3	1.0
Julio	1.3	1.5	1.1	1.3	1.2	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.2	1.3	1.3	1.2	1.1	1.0
Agosto	1.6	1.4	1.8	1.6	1.8	1.5	1.6	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1	1.0
Septiembre	2.7	1.5	1.1	1.3	1.0	1.2	1.1	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.3	1.5	1.7	1.7	1.4
Octubre	0.5	0.9	0.9	1.0	1.3	1.1	1.3	1.1	1.0	1.1	1.1	1.0	1.2	1.0	1.3	1.6	1.5	1.1
Noviembre	0.8	1.0	0.9	1.1	1.0	1.3	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.1	1.2	1.1	1.2	1.4	1.2
Diciembre	1.0	1.0	1.2	1.2	1.3	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.1

REGIONES DE DOUGLAS

Modelo Climático: GFDL-R30. Cambio en la precipitación mensual por región (razón de cambio)

Anexo B. Escenarios climáticos de las variables Temperatura, Precipitación y Radiación Global por zonas de Douglas en la República Mexicana (Gay, 2003) (Continuación)

Modelo Climático: GFDL-R30. Cambio en la radiación mensual por región (razón de cambio)

REGION	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Enero	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
Febrero	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1
Marzo	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Abril	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.3	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Mayo	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Junio	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
Julio	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1
Agosto	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1
Septiembre	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0
Octubre	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	0.9	1.0	1.0
Noviembre	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	0.9	1.0	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Diciembre	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9

Modelo Climático: CCC. Cambio en la temperatura mensual por región (°C)

REGION	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Enero	3.5	2.5	2.2	2.2	2.1	1.4	2.2	1.9	1.8	1.8	1.7	1.5	1.6	1.6	1.5	1.6	1.8	1.8
Febrero	3.7	2.5	2.8	3.0	3.7	2.6	3.6	2.2	1.9	1.9	1.9	1.8	1.7	1.7	1.9	1.8	2.0	2.0
Marzo	3.7	2.7	3.1	3.4	4.3	2.8	3.2	2.1	2.0	2.0	2.0	1.8	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	1.8
Abril	3.5	2.7	3.2	3.3	4.7	3.5	3.2	2.3	2.1	2.2	2.1	2.3	2.4	2.2	2.1	2.1	2.2	2.1
Mayo	3.3	2.6	3.3	3.7	4.7	3.5	3.2	2.3	2.3	2.3	2.1	2.2	2.2	2.1	2.4	2.1	2.2	2.1
Junio	3.2	2.6	2.5	2.5	2.9	2.3	2.4	2.1	2.0	2.0	1.9	1.7	1.7	1.7	1.8	1.9	2.0	2.0
Julio	3.4	2.7	3.3	3.4	4.2	2.6	2.6	2.0	2.2	2.1	2.1	1.9	1.9	2.0	2.0	1.9	2.0	2.0
Agosto	3.3	2.7	2.9	3.1	3.7	2.8	3.0	2.1	2.4	2.3	2.3	2.2	2.1	2.3	2.1	2.2	2.3	1.9
Septiembre	3.0	2.6	2.6	2.6	3.0	2.6	3.0	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.4	2.1	2.2	2.3	2.0
Octubre	3.0	2.4	3.4	3.3	4.0	3.2	3.7	2.7	2.3	2.3	2.3	2.5	2.6	2.9	2.4	2.5	2.6	2.3
Noviembre	3.2	2.4	2.9	3.0	3.5	2.9	2.8	2.4	2.2	2.2	2.1	2.2	2.2	2.2	2.3	2.3	2.4	2.4
Diciembre	3.3	2.4	2.4	2.5	2.7	2.2	2.3	2.0	1.9	1.9	1.8	1.7	1.7	1.7	1.9	2.1	2.2	2.1

Anexo B. Escenarios climáticos de las variables Temperatura, Precipitación y Radiación Global por zonas de Douglas en la República Mexicana (Gay, 2003) (Continuación)

Modelo Climático: CCC. Cambio en la precipitación mensual por región (razón de cambio)

REGION	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Enero	0.6	0.9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9	0.9	0.7	0.9	1.0	0.9	1.4
Febrero	1.0	0.8	1.1	0.9	1.0	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.9	1.0	1.1	1.0	1.4
Marzo	1.0	0.7	0.9	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	1.0	0.9	0.7	1.0	1.0
Abril	1.4	0.8	1.3	0.9	1.1	0.7	1.0	1.3	0.8	1.0	1.1	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.2	1.5	1.5
Mayo	1.0	1.1	1.6	1.5	1.6	0.9	1.0	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2	1.1	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.8
Junio	1.6	1.7	1.3	1.2	1.1	0.9	0.8	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8
Julio	1.2	1.4	0.9	0.7	0.7	0.6	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6	0.7	1.0	1.0
Agosto	1.1	1.1	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1
Septiembre	1.8	1.6	1.2	1.2	1.0	0.9	0.9	1.3	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9
Octubre	0.6	1.0	0.9	1.4	1.4	1.9	1.6	1.5	1.3	1.2	1.3	1.2	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.4	1.4
Noviembre	0.6	1.1	0.7	0.9	0.9	1.0	1.2	1.0	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	0.9	1.1	1.2	1.4	1.3	1.3
Diciembre	0.4	0.6	0.4	0.5	0.4	0.7	0.7	0.7	1.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	1.0	1.2	1.4	1.4	1.4

Modelo Climático: CCC. Cambio en la radiación mensual por región (razón de cambio)

REGION	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Enero	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Febrero	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9
Marzo	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Abril	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9
Mayo	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
Junio	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Julio	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9
Agosto	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9
Septiembre	1.0	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Octubre	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Noviembre	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9
Diciembre	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Anexo C. Propiedades de los suelos y estimación del IHT en los pozos edafológicos usados para establecer las relaciones ϕ (IHT) actualizadas

Coordenadas		Clave Carta	Pozo	MO	P	K	pH	Albedo	Pr	Rg	Rb	Rn	IHT
X	Y		%	ppm	adim	adim	mm	adim	mm	adim	adim	adim	adim
3518674.000	373469.200	D1502	96	5.4	10.5	0.5	5.2	0.32	2934.0	156	25	81	0.46
3491512.000	389285.600	D1502	85	2.8	15.8	1.0	6.5	0.32	3201.0	158	23	84	0.44
2283313.000	772463.000	E1302	86	2.1	8.1	3.3	8.7	0.32	863.0	168	34	80	1.55
2146463.000	882687.900	E1302	14	2.1	26.0	0.9	7.1	0.29	962.0	166	35	83	1.44
2495863.000	670160.700	E130609	79	5.1	1.9	0.3	5.6	0.29	848.0	172	32	90	1.77
2814921.000	830342.600	E1402	52	0.1	53.4	8.1	10.3	0.29	587.0	164	64	52	1.49
2812021.000	841964.800	E1402	43	2.1	0.1	9.6	10.3	0.29	607.0	163	65	51	1.39
2979779.000	838541.000	E1403	54	1.6	13.3	6.1	8.9	0.29	459.0	162	67	48	1.74
2959290.000	816457.300	E1403	77	1.6	36.5	4.7	10.5	0.32	470.0	163	66	45	1.59
2954011.000	806623.900	E1403	85	0.6	4.4	3.1	10.5	0.29	618.0	166	66	52	1.40
2951728.000	808501.000	E1403	82	1.2	17.5	3.0	10.8	0.32	619.0	165	66	46	1.24
3090172.000	847264.300	E1403	49	0.1	6.8	0.2	6.6	0.32	1281.0	168	33	81	1.06
3110219.000	782533.500	E1406	5	1.0	37.9	0.6	6.5	0.29	1408.0	160	31	83	0.98
2560246.000	622306.300	E140710	30	1.0	4.5	0.3	6.5	0.29	1095.0	168	35	84	1.28
2771534.000	530249.100	E1411	24	3.5	16.1	0.8	6.4	0.29	1228.0	171	30	91	1.24
2777658.000	523673.300	E1411	33	1.1	5.5	0.0	4.6	0.32	1268.0	173	31	87	1.14
2848382.000	507881.900	E1411	48	0.1	2.5	0.1	6.0	0.29	1301.0	171	35	86	1.11
2848898.000	509274.500	E1411	46	2.0	2.9	0.2	4.9	0.29	1309.0	171	35	86	1.10
2830762.000	516615.800	E1411	40	1.9	2.9	0.3	5.4	0.29	1362.0	174	38	86	1.05
2828967.000	509690.600	E1411	45	1.0	2.9	0.2	5.9	0.32	1364.0	174	37	81	0.99
3142035.000	700925.800	E150104	52	4.6	4.9	0.2	7.6	0.29	1648.0	171	30	91	0.92
3286273.000	693455.900	E150104	67	4.1	3.1	0.1	4.6	0.32	2220.0	167	28	86	0.64
3718463.000	937017.800	E1503	1	5.9	1.1	1.0	7.3	0.29	1023.0	167	30	89	1.44
3724228.000	928849.000	E1503	6	4.5	3.1	1.0	7.3	0.29	1056.0	167	32	87	1.37
3749787.000	904634.100	E1503	24	12.2	1.5	0.9	7.5	0.29	1134.0	164	34	82	1.21
3722627.000	910859.200	E1503	17	2.4	2.4	0.8	7.4	0.29	1201.0	166	34	84	1.16
3680227.000	868555.000	E1503	48	4.0	1.6	0.1	8.0	0.29	1241.0	156	31	80	1.07
3684380.000	867486.800	E1503	49	4.9	2.3	1.3	6.8	0.29	1268.0	156	32	79	1.04
3738843.000	829851.400	E1503	85	4.1	7.3	0.3	7.4	0.29	1290.0	162	35	80	1.03
3738669.000	839450.100	E1503	73	7.4	3.4	0.5	7.9	0.29	1313.0	162	35	80	1.02
3700073.000	844388.500	E1503	66	4.7	13.8	0.9	7.3	0.29	1316.0	159	34	79	1.00
3678416.000	847102.300	E1503	63	6.7	0.1	0.1	6.7	0.32	1332.0	157	32	75	0.94
3656583.000	836486.400	E1503	70	6.6	4.2	0.4	7.9	0.29	1339.0	160	30	84	1.04
3729993.000	887163.900	E1503	30	3.0	6.1	0.6	7.2	0.32	1362.0	163	36	75	0.92
3686371.000	830435.000	E1503	76	5.5	0.1	0.1	7.9	0.29	1395.0	160	33	81	0.96
3662253.000	827824.300	E1503	78	6.8	2.8	0.3	7.6	0.29	1402.0	161	31	83	0.99
3502947.000	771280.400	E1505	2	1.4	2.9	0.3	7.9	0.32	1523.0	159	25	83	0.91
3480852.000	766534.800	E1505	5	2.4	0.9	0.3	8.4	0.32	1728.0	157	25	82	0.79
3397860.000	729306.400	E1505	20	1.0	2.5	0.1	6.6	0.32	2076.0	153	25	79	0.63
3746554.000	798850.400	E1506	22	10.8	1.8	0.6	7.5	0.29	1178.0	163	35	81	1.14
3745679.000	822201.800	E1506	7	5.4	2.3	0.3	6.8	0.29	1180.0	162	35	80	1.13
3738654.000	792996.400	E1506	28	1.3	1.3	0.2	6.9	0.29	1205.0	163	35	81	1.12
3760433.000	726277.600	E1506	88	6.3	3.5	0.2	6.1	0.29	1240.0	161	35	79	1.07
3717328.000	744120.600	E1506	69	9.5	9.3	0.2	6.1	0.29	1279.0	162	35	80	1.04
3715458.000	768881.400	E1506	48	9.5	0.1	0.3	7.6	0.29	1287.0	165	35	82	1.06
3675630.000	717515.300	E1506	91	0.8	1.3	0.1	7.6	0.32	1317.0	163	33	78	0.99
3695431.000	817430.100	E1506	9	2.3	2.0	0.1	6.1	0.29	1319.0	162	34	81	1.02
3575506.000	778060.100	E1506	29	6.0	2.5	0.1	7.8	0.29	1377.0	169	25	95	1.15
3663672.000	764459.300	E1506	49	10.1	2.0	0.6	7.6	0.29	1382.0	169	33	87	1.05
3633462.000	768121.000	E1506	40	0.9	5.7	0.1	5.1	0.32	1391.0	166	31	82	0.98
3674185.000	787896.400	E1506	27	4.5	1.6	0.4	6.8	0.29	1412.0	169	33	87	1.03
3683098.000	822414.100	E1506	1	3.2	0.5	0.1	7.6	0.29	1422.0	161	33	81	0.95
3617081.000	743836.100	E1506	63	3.7	5.4	0.1	5.1	0.29	1529.0	164	32	84	0.92
3573297.000	706216.400	E1506	97	2.1	1.6	0.2	5.1	0.32	2129.0	159	27	81	0.64
3169669.000	681123.700	E1507	1	1.3	3.4	0.2	6.3	0.29	1833.0	172	28	94	0.86
3345843.000	665417.900	E1507	34	5.2	4.6	0.4	5.1	0.32	2573.0	152	26	77	0.50
3388068.000	661284.100	E1508	25	10.7	1.7	0.1	4.7	0.32	2422.0	153	27	77	0.53
3544133.000	687183.900	E1508	13	3.6	1.7	0.1	4.7	0.32	2491.0	157	25	82	0.55
3358669.000	669903.000	E1508	19	3.7	0.7	0.3	5.0	0.32	2506.0	152	26	77	0.51
3590766.000	706546.400	E1509	1	2.3	13.3	0.1	4.5	0.32	1877.0	158	28	79	0.71
3589900.000	674429.300	E1509	16	4.3	1.2	0.3	5.5	0.29	2369.0	160	26	88	0.62

Anexo C. Propiedades de los suelos y estimación del IHT en los pozos edafológicos usados para establecer las relaciones ϕ (IHT) actualizadas

Coordenadas		Clave Carta	Pozo	MO %	P ppm	K	pH adim	Albedo adim	Pr mm año ⁻¹	Rg kcal cm ⁻² año ⁻¹	Rb cm ² año ⁻¹	Rn	IHT adim
X	Y												
3310044.000	520520.200	E1510D15	74	2.0	51.2	0.4	7.2	0.29	1412.0	173	32	91	1.07
3565061.000	500078.900	E1511	90	1.8	2.7	0.1	7.2	0.32	1389.0	172	52	65	0.78
362588.000	488165.800	E1511	87	1.3	3.5	0.1	6.1	0.29	1834.0	170	28	93	0.84
3698261.000	564903.300	E1512D153	45	0.9	1.8	0.1	4.7	0.29	1782.0	157	29	82	0.77
3684422.000	571808.900	E1512D153	40	7.1	2.7	0.3	6.6	0.29	1847.0	160	30	84	0.75
3855434.000	887906.800	E1601	77	6.6	2.3	0.4	7.2	0.29	920.0	163	33	83	1.50
3887388.000	867538.400	E1601	93	3.5	1.9	0.5	6.0	0.29	944.0	165	33	84	1.49
3916310.000	858007.600	E1601	96	4.3	3.2	0.9	7.7	0.29	958.0	165	31	86	1.50
3808763.000	885180.600	E1601	74	1.9	1.6	1.7	6.9	0.29	974.0	162	32	83	1.42
3905908.000	912621.200	E1601	60	7.1	1.1	0.8	7.2	0.29	996.0	168	34	85	1.43
3861889.000	923463.700	E1601	41	3.8	1.1	1.0	7.3	0.29	1004.0	161	34	80	1.33
3910152.000	873337.800	E1601	91	2.8	1.4	0.7	7.2	0.29	1004.0	167	32	87	1.44
3804467.000	876356.800	E1601	82	3.7	5.5	1.4	7.4	0.32	1013.0	161	32	77	1.27
3915820.000	926973.700	E1601	43	6.0	2.2	0.7	7.1	0.29	1047.0	168	33	86	1.37
3754287.000	909888.100	E1601	48	5.5	1.9	1.4	7.3	0.29	1128.0	164	33	83	1.23
3765360.000	887133.300	E1601	70	3.8	1.7	1.2	7.4	0.29	1142.0	162	33	82	1.20
3931240.000	891969.600	E1601	78	7.1	2.5	1.7	7.4	0.29	1145.0	166	32	86	1.25
3897535.000	931644.300	E1601	33	7.1	1.6	0.8	7.2	0.29	1152.0	167	35	84	1.21
3954433.000	879216.100	E1601	90	11.5	1.4	1.2	7.1	0.29	1165.0	165	32	85	1.22
3914266.000	951213.400	E1601	7	6.8	1.8	0.6	7.6	0.29	1178.0	167	34	85	1.20
3767841.000	858708.300	E1601	92	5.5	2.0	1.8	7.7	0.29	1240.0	160	33	81	1.08
3958578.000	903211.500	E1601	73	4.8	2.5	0.5	7.4	0.29	1242.0	162	32	83	1.11
3949790.000	934025.600	E1601	38	7.0	2.5	1.3	7.6	0.29	1256.0	162	32	83	1.10
3878725.000	929607.300	E1601	34	6.6	1.2	1.1	7.4	0.29	1258.0	164	36	80	1.07
3957850.000	849206.100	E1601	100	7.0	1.7	1.1	7.1	0.29	1258.0	164	29	87	1.16
3945373.000	915156.400	E1601	62	5.5	1.4	0.3	7.2	0.29	1261.0	164	32	84	1.12
4001145.000	824885.800	E160205	22	12.5	2.1	0.2	7.6	0.29	1192.0	163	29	87	1.21
3993146.000	771455.500	E160205	27	3.7	1.8	0.1	7.6	0.32	1230.0	165	29	83	1.13
3965060.000	924983.500	E160205	9	12.9	2.0	0.9	7.3	0.29	1230.0	161	31	83	1.13
3992645.000	833271.900	E160205	18	6.6	1.5	0.2	7.6	0.29	1235.0	163	29	87	1.17
4013838.000	942013.100	E160205	5	1.0	2.2	0.1	7.8	0.32	1250.0	163	29	82	1.09
4007144.000	844641.700	E160205	16	1.7	1.0	0.1	8.0	0.32	1269.0	165	30	82	1.08
3982551.000	842649.900	E160205	15	6.8	1.3	0.2	7.6	0.29	1291.0	164	29	87	1.13
3973493.000	846250.900	E160205	14	6.0	0.1	0.1	7.6	0.32	1318.0	164	29	83	1.54
3883620.000	840475.900	E160407	1	7.5	0.1	1.2	7.4	0.29	923.0	163	32	84	1.01
3919738.000	835820.300	E160407	11	1.2	2.0	0.7	6.6	0.29	1062.0	163	29	87	1.36
3770119.000	806905.200	E160407	20	13.2	3.2	1.5	7.6	0.29	1065.0	161	35	79	1.24
3829286.000	835802.500	E160407	12	4.2	1.6	2.2	7.4	0.29	1074.0	163	29	87	1.35
3849287.000	823484.600	E160407	15	6.2	2.9	0.6	7.1	0.29	1141.0	163	33	83	1.21
3826124.000	878789.600	E160407	37	7.8	2.5	0.7	7.7	0.29	1147.0	161	35	79	1.15
3825513.000	779386.300	E160407	51	4.3	2.2	0.6	7.7	0.29	1160.0	163	35	81	1.16
3941603.000	808747.800	E160407	32	0.6	2.2	1.2	7.6	0.32	1183.0	163	29	82	1.15
3944150.000	833262.000	E160407	14	5.7	2.7	1.5	6.9	0.29	1212.0	164	28	88	1.22
3825465.000	729262.700	E160407	96	5.4	2.5	0.1	6.6	0.29	1227.0	163	34	82	1.11
3797394.000	720798.600	E160407	99	0.8	0.8	0.3	7.2	0.29	1250.0	162	34	81	1.08
3855662.000	744463.400	E160407	85	9.1	2.6	0.3	7.1	0.29	1286.0	164	32	84	1.09
3961124.000	847068.500	E160407	3	12.7	1.2	2.9	7.7	0.29	1296.0	164	29	87	1.12
3965323.000	847337.400	E160407	4	6.0	0.1	0.1	7.5	0.29	1314.0	164	29	87	1.11
3869948.000	751693.800	E160407	80	6.3	1.4	0.3	6.2	0.29	1328.0	165	32	85	1.07
1632952.375	1320669.125	F1202	28	0.4	19.7	0.8	7.7	0.32	136.0	166	55	58	7.09
2468257.750	1322902.750	F1303	8	1.7	10.5	1.3	8.3	0.29	301.0	163	66	50	2.75
2477190.000	1310965.000	F1303	20	2.7	0.1	2.0	7.8	0.29	379.0	163	67	49	2.14
2438654.250	1250622.125	F1303	71	1.7	3.0	1.2	8.3	0.29	420.0	167	68	51	2.01
2498806.000	1277452.500	F1303	46	2.3	5.2	1.5	8.4	0.29	497.0	168	71	48	1.62
2484813.500	1228367.375	F1303	89	2.3	9.6	2.4	8.1	0.32	510.0	169	70	45	1.47
2117437.500	1190214.750	F1305	36	1.5	67.6	0.5	7.2	0.32	949.0	165	37	75	1.32
2120797.000	1170966.625	F1305	51	0.8	40.5	2.0	8.3	0.32	1193.0	165	36	76	1.06
2158536.500	1155382.750	F1305	64	2.6	4.3	0.7	4.8	0.32	1449.0	164	39	73	0.83
2138500.000	1111017.000	F1308	1	1.9	10.7	1.0	6.7	0.32	1235.0	166	30	83	1.12
2143376.000	1101355.000	F1308	13	1.6	11.6	3.1	6.2	0.32	1251.0	167	30	84	1.11
2146440.000	1096664.000	F1308	21	0.7	15.1	1.0	6.5	0.32	1253.0	167	30	84	1.11

Anexo C. Propiedades de los suelos y estimación del IHT en los pozos edafológicos usados para establecer las relaciones ϕ (IHT) actualizadas

Coordenadas		Clave Carta	Pozo	MO %	P ppm	K	pH adim	Albedo adim	Pr mm año ⁻¹	Rg kcal cm ⁻² año ⁻¹	Rb cm ⁻² año ⁻¹	Rn adim	IHT adim
X	Y												
2472238.000	1054603.000	F1309	45	1.5	0.8	1.6	7.6	0.15	601.0	166	65	76	2.11
2339612.000	892105.500	F1312	100	1.0	91.9	4.1	9.6	0.29	754.0	164	60	56	1.25
2430979.000	985449.900	F1312	12	1.4	2.4	0.5	5.9	0.22	891.0	162	60	66	1.24
2366665.000	948526.800	F1312	47	0.1	2.0	3.5	8.6	0.32	897.0	167	58	56	1.03
2647497.500	1247409.250	F1401	72	1.1	0.6	0.1	7.6	0.29	303.0	168	63	56	3.10
2560390.750	1229934.375	F1401	92	0.6	4.7	6.6	9.9	0.32	513.0	169	67	48	1.56
2539195.250	1242038.375	F1401	75	2.4	5.8	2.1	8.1	0.29	558.0	171	72	49	1.48
2525311.750	1237944.250	F1401	78	2.3	4.7	2.5	8.4	0.32	610.0	171	73	43	1.18
2504344.000	1252772.375	F1401	65	2.0	0.6	3.0	8.2	0.29	628.0	170	73	48	1.27
2724429.500	1224847.125	F1402	93	5.1	2.3	1.3	7.8	0.29	371.0	172	58	64	2.88
2710051.250	1288648.500	F1402	36	1.7	1.8	0.5	8.5	0.32	407.0	161	63	46	1.90
2707305.000	1293055.500	F1402	31	2.6	2.1	1.4	8.3	0.29	410.0	161	63	51	2.09
2832204.250	1300345.625	F1402	29	5.9	2.3	1.1	7.7	0.27	830.0	164	43	77	1.54
2881023.750	1316770.500	F1402	15	1.3	0.1	1.8	8.1	0.29	851.0	164	40	76	1.50
2813880.750	1300450.250	F1402	26	3.8	0.1	0.4	7.7	0.29	862.0	167	45	74	1.42
2838045.500	1316100.375	F1402	13	6.4	0.8	0.7	8.2	0.29	865.0	163	41	75	1.44
2892527.500	1302068.000	F1402	27	9.2	1.8	0.5	7.4	0.29	941.0	165	39	78	1.38
2928669.000	1315412.750	F140306	8	1.9	0.2	1.6	8.2	0.29	1045.0	164	37	79	1.27
2930829.000	1314091.625	F140306	9	1.8	9.3	1.2	7.8	0.29	1056.0	164	37	79	1.25
2932219.000	1313718.500	F140306	10	0.3	0.6	0.2	8.4	0.32	1069.0	164	37	75	1.16
2919880.500	1174122.375	F140306	36	2.3	3.7	4.1	7.3	0.29	1098.0	167	33	86	1.30
2912156.000	1152957.500	F140306	40	2.5	0.9	0.3	8.6	0.32	1121.0	170	33	83	1.23
2915674.000	1137790.250	F140306	44	0.2	2.2	0.9	7.8	0.32	1176.0	169	33	82	1.16
2919522.000	1138880.750	F140306	43	0.7	4.3	0.3	8.3	0.29	1177.0	168	32	87	1.24
2926035.000	1123329.375	F140306	46	2.5	12.8	0.9	7.2	0.32	1211.0	168	33	81	1.12
2928212.000	1292368.625	F140306	15	0.4	0.4	0.4	7.4	0.29	1278.0	166	37	81	1.05
2529462.250	1180938.750	F1404	38	0.9	4.4	2.1	9.4	0.32	338.0	167	65	49	2.39
2554943.750	1166199.625	F1404	49	1.5	5.0	2.6	8.4	0.32	381.0	169	64	51	2.23
2603523.250	1205698.625	F1404	14	4.6	2.1	3.1	8.4	0.29	413.0	169	63	57	2.30
2701801.000	118170.750	F1404	92	4.9	10.8	2.6	8.0	0.15	443.0	167	55	87	3.27
2535530.000	1210797.125	F1404	6	3.6	2.4	2.8	8.2	0.32	447.0	169	68	47	1.75
2502619.500	1203494.625	F1404	12	1.5	11.7	2.4	8.5	0.26	469.0	168	68	56	2.00
2704033.750	1142752.625	F1404	74	5.5	3.1	1.0	8.4	0.32	483.0	166	57	56	1.93
2643646.250	1174894.250	F1404	47	1.5	25.1	2.5	7.6	0.29	594.0	171	62	59	1.67
2730333.500	1129479.750	F1405	79	0.5	2.5	0.1	8.1	0.29	368.0	168	57	62	2.82
2720697.500	1142385.125	F1405	64	1.0	9.1	0.4	8.3	0.32	377.0	167	57	57	2.50
2715261.500	1121341.750	F1405	85	5.7	9.8	1.0	8.2	0.32	393.0	168	57	57	2.43
2726301.500	1208577.000	F1405	11	1.8	1.3	0.6	7.8	0.15	437.0	173	55	92	3.51
2715996.250	1184329.625	F1405	33	3.9	18.7	1.3	8.2	0.29	561.0	169	56	64	1.90
2823571.750	1222204.250	F1405	1	2.4	2.0	0.5	7.9	0.29	944.0	162	37	78	1.38
2867662.250	1195571.125	F1405	27	3.1	1.7	0.7	7.9	0.15	965.0	165	36	104	1.80
2622196.000	1100566.000	F1407	10	1.7	6.8	4.5	6.0	0.26	424.0	170	63	63	2.47
2501073.000	1019122.000	F1407	83	1.2	3.9	0.8	6.6	0.22	755.0	167	65	65	1.44
2902303.000	1109627.000	F1408	5	2.0	1.8	0.3	7.6	0.29	1027.0	167	34	85	1.37
2960721.000	1085765.000	F1409	4	0.1	1.4	0.1	8.4	0.32	1436.0	167	36	78	0.90
2976838.000	1015183.000	F1409	23	2.7	8.0	0.2	7.6	0.32	1510.0	158	28	79	0.88
2970828.000	1073774.000	F1409	8	2.6	3.4	0.1	4.8	0.29	1530.0	167	35	84	0.91
2955535.000	1054926.000	F1409	11	1.4	7.8	0.1	7.1	0.29	1587.0	165	33	84	0.88
2970677.000	1032366.000	F1409	18	6.3	12.9	0.7	7.9	0.32	1688.0	161	30	79	0.78
2514213.000	970463.600	F1410	28	1.7	45.8	1.6	8.0	0.15	723.0	168	63	80	1.84
2984850.000	1001907.000	F1412	5	4.5	2.2	0.9	7.4	0.32	1472.0	157	28	79	0.89
2982424.000	1000140.000	F1412	7	4.1	1.2	0.5	7.7	0.32	1478.0	156	27	79	0.84
3011354.000	952856.200	F1412	40	1.2	1.3	0.2	7.8	0.32	1509.0	161	33	76	0.89
3016994.000	947506.200	F1412	48	1.5	1.6	0.6	7.6	0.32	1544.0	163	33	78	0.84
3712740.000	1053799.000	F150912	7	1.9	1.8	0.3	9.0	0.32	714.0	169	28	87	2.03
3737003.000	1034732.000	F150912	14	10.1	2.3	0.4	7.9	0.29	757.0	167	29	90	1.97
3721955.000	1016903.000	F150912	20	5.4	1.0	0.3	7.7	0.32	777.0	166	28	85	1.82
3733564.000	1016826.000	F150912	21	6.1	1.8	1.2	7.7	0.29	795.0	165	29	88	1.85
3741122.000	1007618.000	F150912	26	13.7	1.2	0.4	7.9	0.29	841.0	163	31	85	1.68
3742264.000	1006968.000	F150912	27	5.1	1.8	0.6	7.2	0.29	846.0	163	31	85	1.67
3697468.000	996673.500	F150912	32	7.5	0.3	0.4	8.0	0.29	859.0	166	25	93	1.80

Anexo C. Propiedades de los suelos y estimación del IHT en los pozos edafológicos usados para establecer las relaciones ϕ (IHT) actualizadas

Coordenadas		Clave Carta	Pozo	MO	P	K	pH	Albedo	Pr	Rg	Rb	Rn	IHT
X	Y		%	ppm	adim	adim	adim	adim	mm	mm	adim	adim	adim
3719733.000	1020103.000	F150912	19	5.6	0.9	0.3	8.0	0.32	861.0	166	28	85	1.64
3712985.000	996244.100	F150912	36	7.0	2.1	0.3	8.1	0.32	874.0	165	27	85	1.62
3718525.000	1008906.000	F150912	24	8.9	1.9	0.4	7.9	0.32	886.0	165	28	84	1.58
3705686.000	1032294.000	F150912	13	10.7	0.1	0.2	7.9	0.32	888.0	168	27	87	1.64
3700944.000	1033173.000	F150912	11	3.4	9.5	0.1	8.5	0.32	890.0	168	26	88	1.65
3743285.000	996434.600	F150912	39	4.8	1.3	1.1	7.8	0.29	912.0	161	31	83	1.52
3745107.000	988215.400	F150912	41	3.1	2.1	0.8	7.4	0.29	944.0	160	31	83	1.46
3728118.000	984893.400	F150912	42	7.7	1.6	0.4	8.0	0.29	946.0	162	28	87	1.53
3726235.000	977327.900	F150912	43	12.2	0.3	0.4	7.7	0.29	968.0	163	28	88	1.51
3724655.000	966283.300	F150912	51	9.0	0.7	0.5	7.6	0.29	1017.0	164	29	87	1.43
3730255.000	974106.100	F150912	46	6.2	0.7	1.3	7.0	0.29	1019.0	163	29	87	1.42
3739091.000	970597.300	F150912	48	13.6	2.1	0.6	7.3	0.29	1051.0	162	30	85	1.35
3729240.000	947824.400	F150912	61	12.4	1.0	0.2	7.7	0.29	1088.0	165	30	87	1.34
3731893.000	958690.100	F150912	55	5.1	0.9	1.0	7.3	0.29	1125.0	164	30	86	1.28
3796531.000	1090063.000	F1607	23	6.9	0.1	0.4	7.9	0.32	585.0	167	27	87	2.47
3756454.000	1076955.000	F1607	38	9.8	4.5	0.9	8.1	0.29	602.0	168	29	85	2.55
3743318.000	1066057.000	F1607	54	12.9	3.2	1.0	7.6	0.32	642.0	168	29	86	2.21
3931579.000	1135552.000	F1607	1	1.0	2.2	0.1	7.9	0.32	651.0	165	26	86	2.21
3936700.000	1134352.000	F1607	2	0.9	0.1	0.4	9.0	0.29	672.0	165	26	91	2.26
3932419.000	1132063.000	F1607	3	7.1	0.1	0.1	8.0	0.32	687.0	165	26	86	2.09
3800494.000	1076699.000	F1607	45	13.8	2.8	0.9	7.8	0.29	761.0	165	28	89	1.94
3756135.000	1052493.000	F1607	74	13.3	1.7	0.6	8.1	0.29	771.0	167	29	90	1.94
3827299.000	1059446.000	F1607	73	6.9	1.7	0.5	7.6	0.29	971.0	159	30	83	1.42
3940569.000	1096130.000	F1607	34	6.1	8.6	0.7	7.7	0.29	1121.0	165	33	84	1.25
3906047.000	1070360.000	F1607	69	3.8	1.4	1.8	7.2	0.29	1178.0	162	35	80	1.13
3889267.000	1070064.000	F1607	66	13.8	14.0	2.2	7.6	0.29	1221.0	159	35	78	1.06
3937130.000	1073869.000	F1607	67	5.8	1.8	1.9	7.2	0.29	1224.0	164	36	80	1.10
3967432.000	1129874.000	F1608	1	0.3	0.1	0.1	7.9	0.32	776.0	161	26	83	1.79
3969334.000	1116082.000	F1608	11	9.2	0.7	0.6	7.9	0.29	938.0	161	29	85	1.52
3945129.000	1112677.000	F1608	12	8.2	0.5	1.5	7.3	0.29	943.0	164	30	86	1.53
3971797.000	1115207.000	F1608	13	10.8	1.3	1.8	7.0	0.29	959.0	160	29	85	1.47
3979876.000	1106319.000	F1608	20	8.7	0.7	0.7	7.3	0.29	1106.0	159	32	81	1.22
3970171.000	1099743.000	F1608	29	9.4	0.9	0.6	7.4	0.29	1125.0	160	33	81	1.19
3964116.000	1075063.000	F1608	55	10.3	1.3	0.5	7.5	0.29	1157.0	162	35	80	1.15
4047051.000	1098466.000	F1608	43	9.2	1.3	0.6	7.4	0.29	1190.0	163	29	87	1.21
4050032.000	1081216.000	F1608	61	10.9	1.1	0.3	7.3	0.29	1209.0	163	28	88	1.21
4035786.000	1079787.000	F1608	60	10.6	0.9	1.4	7.1	0.29	1223.0	162	30	85	1.16
3986974.000	1093374.000	F1608	41	12.5	0.3	0.2	7.5	0.29	1239.0	158	35	77	1.04
4014488.000	1080227.000	F1608	56	11.9	2.0	1.4	7.5	0.29	1243.0	160	34	80	1.07
4015864.000	1106093.000	F1608	25	12.5	1.0	0.2	7.4	0.29	1254.0	159	35	78	1.04
4002136.000	1110061.000	F1608	19	10.8	0.8	1.0	7.6	0.29	1269.0	157	36	75	0.99
4009677.000	1111212.000	F1608	18	9.1	1.0	1.1	7.5	0.29	1270.0	158	36	76	1.00
3995193.000	1088391.000	F1608	45	12.0	0.3	0.2	7.5	0.29	1296.0	158	36	76	0.98
3772512.000	1033487.000	F1610	20	8.4	0.7	0.6	7.7	0.29	956.0	164	31	85	1.49
3754901.000	979834.800	F1610	64	10.6	1.3	1.0	7.6	0.29	965.0	160	34	80	1.37
3818921.000	968490.400	F1610	82	5.3	3.2	0.1	7.0	0.29	974.0	158	36	76	1.30
3794616.000	1043699.000	F1610	10	13.2	1.3	0.2	7.5	0.29	1014.0	162	29	86	1.41
3802554.000	950360.100	F1610	97	5.5	1.3	0.5	7.4	0.29	1018.0	159	35	78	1.28
3791760.000	993755.200	F1610	55	3.9	1.0	0.5	7.6	0.29	1037.0	161	39	75	1.21
3825560.000	981969.900	F1610	69	8.1	1.1	0.8	7.4	0.29	1042.0	158	36	76	1.22
3806116.000	987824.400	F1610	61	5.8	1.5	1.1	7.3	0.29	1092.0	160	37	77	1.17
3834225.000	1038364.000	F1610	21	9.6	1.2	1.1	6.9	0.29	1107.0	156	31	80	1.20
3941131.000	965051.700	F1610	95	9.0	1.6	0.5	7.1	0.29	1197.0	164	33	83	1.16
3941914.000	1026049.000	F1610	38	7.9	0.7	0.3	7.4	0.29	1198.0	163	35	81	1.12
3936032.000	1055968.000	F1610	12	8.5	1.4	1.2	7.3	0.29	1221.0	162	36	79	1.08
3886083.000	1060393.000	F1610	3	11.6	2.2	2.0	7.6	0.29	1229.0	158	34	78	1.06
3932122.000	1009006.000	F1610	52	11.5	2.9	0.6	7.7	0.29	1232.0	165	35	82	1.11
3880486.000	986391.800	F1610	70	6.1	1.3	1.1	7.1	0.29	1242.0	162	37	78	1.05
3875201.000	1031243.000	F1610	28	7.8	1.3	1.8	7.1	0.29	1264.0	158	34	78	1.03
3895071.000	972471.400	F1610	83	8.0	3.5	0.1	7.8	0.29	1264.0	165	36	81	1.07
3933182.000	1023108.000	F1610	40	10.6	0.8	0.4	7.6	0.29	1264.0	164	35	81	1.07

Anexo C. Propiedades de los suelos y estimación del IHT en los pozos edafológicos usados para establecer las relaciones ϕ (IHT) actualizadas

Coordenadas		Clave Carta	Pozo	MO %	P ppm	K	pH	Albedo adim	Pr mm a ϕ o $^{-1}$	Rg kcal cm $^{-2}$ a ϕ o $^{-1}$	Rb	Rn	IHT adim
X	Y												
3884707.000	1000926.000	F1610	56	11.7	2.1	0.7	7.7	0.29	1269.0	163	37	79	1.03
3915742.000	1025224.000	F1610	36	11.7	1.3	0.9	7.5	0.29	1271.0	164	35	81	1.07
3899246.000	978551.500	F1610	77	7.6	2.0	1.4	6.6	0.29	1276.0	166	36	82	1.09
3911590.000	994662.100	F1610	63	13.1	2.0	0.6	7.5	0.29	1276.0	167	35	84	1.07
3923124.000	1060521.000	F1610	7	11.5	1.3	1.0	7.3	0.29	1302.0	162	36	79	1.01
3866839.000	1008956.000	F1610	49	8.6	1.6	1.8	7.4	0.29	1308.0	159	37	76	0.97
3905696.000	1036039.000	F1610	27	10.3	2.0	1.3	7.8	0.29	1321.0	162	35	80	1.01
3916983.000	1045493.000	F1610	22	8.9	1.3	1.9	7.3	0.29	1336.0	163	35	81	1.01
4066187.000	1026399.000	F1611	39	5.9	1.8	0.2	7.7	0.29	1015.0	164	26	90	1.49
4069911.000	1026169.000	F1611	40	7.9	2.8	0.2	7.3	0.29	1015.0	164	26	90	1.49
4071463.000	1021930.000	F1611	47	10.6	0.1	0.3	7.7	0.29	1024.0	164	26	90	1.47
4058222.000	1020562.000	F1611	46	4.2	2.2	0.4	7.6	0.29	1025.0	164	27	89	1.45
4050521.000	1046738.000	F1611	30	11.0	1.3	0.5	7.7	0.29	1085.0	164	27	89	1.37
3982796.000	1024315.000	F1611	35	8.5	1.0	0.4	7.5	0.29	1184.0	162	33	82	1.15
3985695.000	1014310.000	F1611	44	11.0	4.8	0.4	7.4	0.29	1199.0	162	32	83	1.15
3958014.000	1032815.000	F1611	32	4.5	0.9	0.2	7.3	0.29	1200.0	163	34	82	1.14
4010681.000	979909.900	F1611	59	3.8	1.9	0.3	7.9	0.32	1225.0	163	29	82	1.11
3957724.000	1004857.000	F1611	48	8.2	1.6	0.8	7.3	0.29	1237.0	164	34	82	1.11
4008157.000	1066009.000	F1611	9	11.6	0.9	0.8	7.6	0.29	1252.0	160	34	80	1.06
3953605.000	1053281.000	F1611	18	4.7	100.0	0.3	6.7	0.29	1253.0	163	36	80	1.06
3998733.000	1056891.000	F1611	20	9.6	1.1	0.6	7.2	0.29	1280.0	162	34	81	1.05
3963504.000	1051275.000	F1611	22	9.2	1.1	0.3	7.3	0.29	1319.0	164	35	81	1.03
3974922.000	1050251.000	F1611	23	8.7	1.0	0.6	7.3	0.29	1346.0	164	35	81	1.01
3991865.000	1070969.000	F1611	3	9.4	0.9	1.0	7.7	0.29	1351.0	159	35	78	0.96
1700427.625	1704212.875	G1202	44	0.1	19.7	0.5	8.5	0.29	268.0	157	48	63	3.95
1668956.125	1769530.500	G1202	23	1.8	28.5	0.9	8.0	0.32	314.0	158	50	57	3.05
1676652.625	1744037.875	G1202	33	1.2	14.9	1.6	8.1	0.15	318.0	158	50	84	4.42
1661445.125	1747013.000	G1202	32	1.1	22.0	1.1	8.2	0.32	326.0	157	50	57	2.90
1672474.000	1733553.625	G1202	35	1.7	18.0	2.1	8.2	0.32	327.0	158	50	57	2.93
1682162.375	1705213.000	G1202	45	2.6	19.7	1.7	8.3	0.32	351.0	158	49	58	2.77
1665264.125	1721749.500	G1202	42	1.0	50.9	1.4	7.6	0.32	355.0	157	49	58	2.71
1640407.625	1794794.375	G1202	3	3.4	16.6	3.0	8.4	0.29	361.0	157	51	60	2.79
1640553.500	1790201.875	G1202	12	0.5	11.4	1.0	8.4	0.32	362.0	157	51	56	2.57
1655003.000	1751949.000	G1202	30	0.5	6.8	1.0	7.7	0.32	365.0	157	50	57	2.59
1662584.875	1775536.500	G1202	20	1.3	25.0	0.7	7.6	0.32	366.0	157	50	57	2.58
1658889.125	1777108.875	G1202	18	1.4	27.4	1.2	7.5	0.32	371.0	157	49	58	2.59
1660753.875	1791885.125	G1202	9	0.3	10.9	0.6	7.9	0.29	383.0	155	49	61	2.66
1729029.625	1663943.625	G1206	21	0.3	16.6	1.0	8.3	0.29	235.0	155	47	63	4.47
1808044.625	1566016.500	G1206	96	2.0	26.7	0.4	6.8	0.29	300.0	162	49	66	3.67
1779765.375	1581624.500	G1206	84	0.4	4.8	0.6	7.7	0.29	318.0	163	45	71	3.71
1796152.250	1597378.250	G1206	74	0.7	9.8	1.2	8.1	0.29	320.0	162	45	70	3.65
1788566.000	1616425.375	G1206	60	1.2	11.9	0.1	8.3	0.24	320.0	159	47	74	3.85
1779956.750	1637021.500	G1206	45	0.8	9.8	0.2	6.5	0.24	354.0	157	47	72	3.40
1812218.125	1575134.250	G1206	88	1.3	19.8	1.0	7.0	0.29	364.0	161	48	66	3.04
1789887.750	1609199.625	G1206	66	1.0	5.3	0.5	7.6	0.32	372.0	161	46	63	2.84
1832122.125	1613632.750	G1206	61	1.4	2.3	0.8	6.2	0.22	520.0	157	45	77	2.48
1521335.875	1530456.375	G120708	21	1.2	167.9	1.8	7.8	0.29	140.0	168	58	61	7.30
1795983.625	1528632.375	G1209	34	0.5	19.7	0.6	7.7	0.32	353.0	160	43	66	3.11
1867898.750	1485204.000	G1209	57	1.1	7.8	1.2	7.4	0.32	467.0	158	45	62	2.23
1564923.250	1412208.875	G121011	50	0.1	99.5	0.7	7.7	0.29	138.0	167	57	62	7.44
1570044.375	1418776.750	G121011	41	0.5	7.8	0.4	8.2	0.29	142.0	167	56	63	7.34
1653711.500	1364394.000	G121011	71	1.2	23.4	0.8	7.5	0.22	225.0	169	55	77	5.69
2244466.000	1706712.125	G1302	67	1.2	1.1	4.2	8.4	0.22	258.0	156	59	63	4.05
2205990.500	1719318.000	G1302	50	1.5	0.3	4.3	8.1	0.22	296.0	156	60	62	3.47
2266934.750	1673800.375	G1302	87	1.0	4.8	2.6	8.1	0.22	301.0	157	59	63	3.51
2254135.500	1751841.625	G1302	20	1.1	5.6	1.6	8.5	0.22	306.0	154	59	61	3.33
2193871.250	1701433.625	G1302	68	1.8	14.5	2.8	8.2	0.32	327.0	157	61	46	2.33
2195296.000	1729750.125	G1302	42	1.7	5.8	2.2	8.4	0.22	336.0	156	60	62	3.06
2201369.000	1676629.000	G1302	85	1.0	5.0	1.1	8.6	0.22	346.0	154	61	59	2.85
2224059.500	1752618.500	G1302	19	0.9	1.1	1.7	8.3	0.22	359.0	154	59	61	2.84
2159749.500	1740736.625	G1302	31	1.8	0.0	2.2	8.4	0.29	360.0	158	60	52	2.42

Anexo C. Propiedades de los suelos y estimación del IHT en los pozos edafológicos usados para establecer las relaciones $\phi(\text{IHT})$ actualizadas

Coordenadas		Clave Carta	Pozo	MO	P	K	pH	Albedo	Pr	Rg	Rb	Rn	IHT
X	Y			%	ppm		adim	adim	mm	adim	mm	adim	adim
2182349.000	1720041.250	G1302	49	0.7	4.0	0.2	8.1	0.32	367.0	158	61	46	2.11
2187418.750	1674352.500	G1302	88	1.3	1.7	1.2	8.1	0.22	382.0	154	61	59	2.58
2292402.250	1661828.125	G1302	100	1.4	0.0	1.1	8.5	0.29	384.0	156	58	53	2.29
2176505.250	1681404.750	G1302	83	1.1	9.4	1.1	7.2	0.22	403.0	155	62	59	2.44
2253781.500	1768607.125	G1302	4	0.2	13.9	3.3	8.7	0.29	412.0	156	61	50	2.01
2482997.500	1678625.250	G1303	79	0.9	1.7	3.8	7.9	0.32	224.0	159	51	57	4.25
2476323.250	1684440.125	G1303	72	0.7	2.8	1.1	7.9	0.29	234.0	159	51	62	4.41
2481832.250	1698485.625	G1303	61	1.2	2.7	0.6	8.2	0.29	266.0	159	51	62	3.88
2490362.500	1709181.250	G1303	54	2.0	0.5	1.7	8.3	0.29	295.0	159	51	62	3.50
2464721.750	1718207.750	G1303	47	1.8	4.4	0.3	7.9	0.32	324.0	158	50	57	2.95
2386600.000	1754736.625	G1303	19	0.8	3.0	1.7	8.4	0.29	334.0	156	54	57	2.83
2352640.750	1768570.750	G1303	5	0.5	1.4	0.6	8.4	0.29	343.0	156	57	54	2.61
2361340.250	1660845.500	G1303	100	0.4	14.0	0.2	8.3	0.29	358.0	157	55	56	2.63
2364442.750	1751706.000	G1303	22	0.8	3.0	1.7	8.4	0.32	359.0	156	55	51	2.37
2403793.750	1706911.000	G1303	58	1.1	6.8	0.8	7.9	0.29	362.0	157	53	58	2.69
2410948.000	1735489.875	G1303	33	0.7	1.8	1.6	8.3	0.29	363.0	157	53	58	2.68
2373461.250	1739644.375	G1303	30	0.3	1.6	0.7	8.3	0.29	369.0	156	55	56	2.52
2442216.000	1761895.875	G1303	11	1.5	0.2	3.3	8.1	0.29	370.0	158	51	61	2.76
2318026.000	1748115.625	G1303	26	1.7	1.9	0.5	8.1	0.29	380.0	155	58	52	2.28
2323989.000	1728650.125	G1303	41	0.8	2.5	2.4	8.5	0.32	381.0	154	58	47	2.04
2298289.000	1605379.750	G1305	60	0.9	4.1	1.7	8.4	0.22	271.0	160	61	64	3.92
2233473.750	1661134.250	G1305	3	0.6	2.8	1.0	8.0	0.32	346.0	155	60	45	2.19
2176507.250	1655273.250	G1305	14	1.5	12.9	1.3	7.3	0.29	459.0	152	61	47	1.70
2167689.250	1655452.625	G1305	13	2.4	2.4	0.8	8.3	0.29	460.0	152	61	47	1.70
2392744.250	1560734.375	G1306	91	0.1	9.7	1.8	8.4	0.22	214.0	162	57	69	5.40
2385335.000	1566275.750	G1306	94	0.6	11.0	2.6	7.9	0.22	219.0	163	57	70	5.34
2387442.000	1602549.250	G1306	56	0.1	2.6	2.8	8.6	0.29	245.0	160	56	58	3.92
2331293.250	1611373.500	G1306	49	0.5	0.0	1.6	9.0	0.29	251.0	160	59	55	3.63
2350619.000	1557550.625	G1306	92	0.7	1.9	1.3	8.9	0.32	254.0	163	61	50	3.27
2317698.250	1610475.875	G1306	50	1.2	1.0	1.3	8.7	0.32	257.0	160	60	49	3.16
2448001.500	1563070.500	G1306	89	1.2	3.6	1.0	7.8	0.29	267.0	161	53	61	3.83
2422556.250	1582578.875	G1306	77	1.0	26.0	0.6	8.4	0.32	271.0	160	54	55	3.37
2334251.250	1568896.000	G1306	87	0.4	3.6	2.9	8.4	0.32	272.0	163	62	49	2.99
2423439.500	1601379.625	G1306	63	2.2	2.9	0.4	7.6	0.32	276.0	160	54	55	3.31
2323249.250	1569808.000	G1306	86	1.2	27.0	2.4	8.2	0.32	289.0	163	62	49	2.82
2331330.250	1635458.125	G1306	25	0.2	5.6	1.1	8.4	0.32	315.0	158	58	49	2.62
2391344.250	1655067.625	G1306	11	0.1	6.1	0.7	8.1	0.32	326.0	160	54	55	2.80
2319283.000	1643573.375	G1306	18	0.4	2.8	0.2	8.5	0.32	333.0	157	58	49	2.44
2343356.000	1642415.375	G1306	19	2.9	1.0	1.0	8.0	0.32	333.0	158	57	50	2.52
2355822.500	1663136.375	G1306	1	0.5	1.9	0.3	8.2	0.32	371.0	157	56	51	2.28
2309571.000	1657464.125	G1306	9	0.3	8.8	0.1	8.0	0.32	376.0	156	58	48	2.13
2322534.000	1659143.750	G1306	6	0.1	1.1	0.2	8.8	0.32	379.0	156	58	48	2.11
2294383.750	1476352.250	G1308	68	0.9	3.0	1.0	8.0	0.32	272.0	164	57	55	3.34
2407696.750	1513613.875	G1309	39	1.0	1.3	2.3	8.3	0.32	151.0	161	53	56	6.23
2405932.750	1536524.750	G1309	19	0.5	1.7	1.1	8.2	0.32	153.0	161	55	54	5.93
2400735.250	1502469.250	G1309	48	0.2	11.7	1.5	8.5	0.22	159.0	161	52	74	7.71
2398964.500	1540706.500	G1309	12	0.3	5.1	0.9	8.4	0.22	170.0	162	56	70	6.90
2425043.000	1477911.500	G1309	66	0.8	0.6	2.0	8.6	0.22	187.0	160	47	78	6.93
2435150.250	1519512.875	G1309	34	2.4	1.5	2.1	7.9	0.32	191.0	160	52	57	4.96
2450964.750	1534752.000	G1309	20	1.0	6.3	1.2	8.7	0.32	242.0	161	52	57	3.96
2426667.500	1439261.500	G1309	99	1.4	11.6	1.6	8.4	0.29	266.0	160	54	60	3.73
2353782.250	1481687.500	G1309	63	0.6	4.1	1.4	7.9	0.22	267.0	165	53	76	4.73
2336743.750	1548727.125	G1309	5	0.5	7.4	1.8	8.9	0.32	276.0	164	62	50	2.99
2346516.500	1461602.750	G1309	79	0.9	1.8	2.1	8.5	0.22	285.0	166	54	75	4.41
1946192.125	1377291.250	G1310	57	2.4	5.0	0.7	8.2	0.29	439.0	159	43	70	2.65
1952205.625	1388476.125	G1310	50	0.1	19.5	0.4	8.5	0.29	463.0	159	44	70	2.52
1914988.750	1408343.875	G1310	35	0.3	33.4	0.6	7.5	0.32	503.0	155	44	61	2.03
1905611.750	1414403.125	G1310	30	0.7	30.0	1.1	7.6	0.29	551.0	155	45	65	1.97
1903819.625	1443126.375	G1310	5	4.3	19.5	0.7	7.8	0.32	567.0	155	45	60	1.78
2252826.750	1358787.000	G1311	76	1.5	2.1	1.7	8.2	0.32	483.0	155	64	41	1.43
2223309.250	1412736.250	G1311	27	1.4	8.6	6.8	8.1	0.29	504.0	155	65	45	1.49

Anexo C. Propiedades de los suelos y estimación del IHT en los pozos edafológicos usados para establecer las relaciones ϕ (IHT) actualizadas

Coordenadas		Clave Carta	Pozo	MO	P	K	pH	Albedo	Pr	Rg	Rb	Rn	IHT
X	Y		%	ppm	adim	adim	adim	adim	mm	mm	adim	adim	adim
2442633.500	1361967.625	G1312	73	2.8	5.5	1.2	8.9	0.29	261.0	163	64	52	3.30
2410250.250	1421439.250	G1312	16	0.7	4.9	2.1	8.5	0.22	279.0	161	57	69	4.10
2437002.000	1404708.125	G1312	32	0.4	4.5	2.4	9.3	0.32	280.0	162	59	51	3.05
2451783.250	1401362.875	G1312	35	1.1	18.4	2.4	8.9	0.32	281.0	161	61	48	2.88
2454993.750	1337093.125	G1312	94	0.9	2.3	1.1	9.0	0.22	281.0	164	66	62	3.67
2436849.000	1401410.875	G1312	37	0.6	41.7	1.3	8.8	0.22	283.0	162	59	67	3.97
2456624.000	1390558.625	G1312	47	0.7	0.0	1.7	9.1	0.29	293.0	162	62	53	3.02
2367187.000	1433549.125	G1312	6	0.8	0.0	1.7	8.5	0.29	322.0	164	57	59	3.08
2470491.750	1329382.750	G1312	99	1.4	4.9	4.7	9.5	0.22	322.0	163	66	61	3.16
2492275.000	1362645.750	G1312	72	2.7	0.0	3.3	7.9	0.29	353.0	163	64	52	2.44
2321219.250	1374684.625	G1312	65	1.8	0.0	0.8	8.3	0.29	375.0	161	64	50	2.24
2537755.250	1667967.000	G1401	90	2.3	0.4	0.8	7.9	0.32	282.0	159	51	57	3.38
2535139.250	1693663.125	G1401	69	0.8	13.0	0.1	8.0	0.29	289.0	159	50	63	3.63
2533830.250	1700934.500	G1401	63	0.7	10.0	0.1	7.7	0.15	305.0	159	50	85	4.65
2591475.500	1711524.625	G1401	58	1.0	1.9	0.9	8.1	0.15	374.0	159	49	86	3.84
2610286.000	1714389.250	G1401	56	1.0	3.2	0.9	8.3	0.29	375.0	159	48	65	2.88
2595855.250	1724898.000	G1401	45	0.6	1.7	1.3	8.0	0.29	378.0	159	49	64	2.82
2623392.500	1735391.375	G1401	35	0.5	1.6	1.1	8.3	0.22	387.0	160	47	78	3.35
268119.250	1730687.000	G1401	42	0.9	4.1	1.5	8.3	0.29	392.0	158	46	66	2.81
2574419.250	1740803.125	G1401	27	1.4	4.2	0.6	8.0	0.15	411.0	159	49	86	3.49
2665058.000	1721139.625	G1401	48	1.3	0.1	1.0	8.2	0.29	420.0	159	46	67	2.65
2636914.000	1704964.125	G1401	61	1.2	1.3	0.6	8.2	0.29	422.0	160	46	68	2.67
2538314.750	1769914.875	G1401	3	3.6	10.0	1.9	7.9	0.29	424.0	157	48	63	2.49
2577199.750	1769331.500	G1401	5	1.6	5.0	0.9	8.1	0.29	428.0	158	48	64	2.50
2602334.750	1756025.750	G1401	19	1.3	4.1	0.8	8.2	0.32	442.0	159	48	60	2.27
2644872.250	1693330.250	G1401	71	1.0	0.7	0.8	8.2	0.29	449.0	160	46	68	2.51
2681414.000	1685491.500	G1401	79	1.4	3.4	0.4	8.0	0.29	523.0	159	43	70	2.23
2722797.250	1663558.250	G1402	34	1.0	3.7	0.4	5.7	0.29	358.0	158	42	70	3.27
2696868.000	1750103.875	G1402	4	0.3	35.5	0.5	7.2	0.29	389.0	159	45	68	2.91
2722138.750	1674820.750	G1402	30	1.2	12.4	0.5	7.9	0.32	399.0	158	42	65	2.73
2703375.250	1747864.250	G1402	5	1.0	7.3	0.3	7.6	0.15	407.0	158	44	90	3.70
2706764.000	1668381.250	G1402	32	2.3	0.1	0.8	7.9	0.32	418.0	158	43	64	2.57
2699529.250	1682568.250	G1402	26	1.3	51.1	1.0	7.9	0.15	456.0	158	43	91	3.34
2707358.250	1694107.875	G1402	24	1.4	4.9	0.9	7.8	0.32	466.0	157	43	64	2.28
2712324.250	1701370.000	G1402	21	1.2	9.5	0.3	7.1	0.29	481.0	157	43	68	2.37
2730405.250	1696062.625	G1402	23	0.6	4.4	0.5	7.9	0.29	481.0	157	41	70	2.44
2737172.250	1716178.125	G1402	15	0.9	7.0	1.0	7.9	0.32	495.0	157	41	66	2.21
2567994.250	1554787.750	G1404	96	2.5	0.1	1.2	7.7	0.32	264.0	164	53	59	3.69
2523399.250	1572202.625	G1404	78	4.3	1.1	0.7	8.1	0.32	373.0	162	52	58	2.60
2577873.250	1658830.250	G1404	5	1.7	0.8	1.0	8.3	0.29	411.0	158	53	59	2.40
2576160.750	1603404.125	G1404	55	0.9	4.0	1.0	7.5	0.29	417.0	163	52	64	2.55
2691140.000	1606505.625	G1404	52	2.3	0.7	2.2	7.6	0.29	444.0	158	46	66	2.48
2699117.750	1645676.375	G1405	5	2.8	0.9	0.3	7.9	0.15	342.0	159	44	91	4.44
2720833.000	1644953.750	G1405	6	1.2	3.0	0.2	8.0	0.29	359.0	158	43	69	3.21
2768255.000	1643659.625	G1405	7	0.7	22.0	0.7	7.8	0.15	434.0	159	41	94	3.62
2759377.000	1581217.125	G1405	44	1.1	3.3	0.6	7.5	0.15	435.0	158	41	93	3.57
2769944.000	1577708.625	G1405	50	0.9	3.3	0.8	7.9	0.29	436.0	158	41	71	2.72
2732550.500	1638955.250	G1405	9	1.3	0.7	0.4	8.1	0.15	437.0	159	42	93	3.55
2773180.750	1626866.625	G1405	16	0.8	2.8	0.3	7.6	0.29	441.0	159	41	72	2.72
2765419.750	1622503.000	G1405	19	0.6	6.9	0.5	7.0	0.15	446.0	159	42	93	3.48
2778384.000	1579679.000	G1405	46	1.7	7.8	0.5	7.4	0.29	464.0	158	40	72	2.59
2780334.250	1605050.500	G1405	30	1.0	2.5	0.4	7.9	0.29	513.0	155	41	71	2.31
2808915.750	1586939.750	G1405	39	1.0	3.1	0.5	8.3	0.29	519.0	155	39	71	2.28
2817430.000	1582317.125	G1405	45	1.2	14.0	0.9	8.1	0.29	521.0	154	39	70	2.25
2951508.000	1526278.625	G14060912	19	1.2	1.7	0.7	8.1	0.29	547.0	162	39	76	2.32
2951051.500	1516536.250	G14060912	24	1.2	3.1	1.5	7.6	0.32	549.0	161	39	70	2.14
2962424.000	1532975.875	G14060912	17	1.5	4.8	0.8	8.1	0.29	550.0	162	39	76	2.30
2964284.000	1506304.750	G14060912	30	2.1	2.1	1.1	7.6	0.32	554.0	161	39	70	2.12
2962782.250	1518877.625	G14060912	23	1.5	2.4	1.2	7.8	0.32	556.0	161	39	70	2.11
2978085.500	1516060.875	G14060912	25	0.1	5.1	0.1	8.0	0.29	564.0	161	39	75	2.23
2981047.250	1538963.500	G14060912	12	1.1	2.8	1.0	8.0	0.32	567.0	161	39	70	2.07

Anexo C. Propiedades de los suelos y estimación del IHT en los pozos edafológicos usados para establecer las relaciones ϕ (IHT) actualizadas

X	Coordenadas		Clave Carta	Pozo	MO %	P ppm	K	pH adim	Albedo adim	Pr mm a ϕ o ⁻¹	Rg kcal cm ⁻² a ϕ o ⁻¹	Rb cm ⁻² a ϕ o ⁻¹	Rn a ϕ o ⁻¹	IHT adim
	Y													
2981504.750	1555025.375	G14060912		5	0.8	0.9	0.5	7.6	0.32	572.0	161	39	70	2.05
2629081.500	1544432.625	G1407		7	1.3	9.6	1.3	8.3	0.32	244.0	163	50	61	4.16
2560191.250	1506031.875	G1407		41	1.0	17.3	0.6	8.2	0.29	294.0	164	54	62	3.54
2506705.250	1539091.625	G1407		10	1.3	14.3	1.8	7.7	0.32	349.0	162	54	56	2.68
2537026.500	1513589.625	G1407		34	0.7	16.0	1.1	7.7	0.29	366.0	165	53	64	2.92
2500284.500	1525814.125	G1407		21	0.4	10.5	0.3	8.4	0.29	376.0	161	53	61	2.72
2500284.500	1525814.125	G1407		21	0.4	10.5	0.3	8.4	0.29	376.0	161	53	61	2.72
2507180.250	1485012.625	G1407		60	2.1	18.2	0.3	8.3	0.29	394.0	163	56	60	2.53
2658117.000	1529894.000	G1407		20	2.7	12.9	1.1	8.3	0.27	474.0	161	47	71	2.48
2620477.250	1446514.750	G1407		94	2.6	0.2	1.6	7.7	0.32	506.0	161	66	43	1.43
2874150.250	1521507.750	G1408		33	1.3	2.0	1.0	8.2	0.29	517.0	162	41	74	2.39
2771213.500	1523408.500	G1408		25	1.2	2.0	0.4	8.3	0.15	536.0	157	41	92	2.87
2780743.000	1514548.250	G1408		37	1.1	1.6	0.4	8.4	0.29	541.0	157	42	69	2.14
2850310.000	1513037.750	G1408		39	1.7	5.7	1.4	8.0	0.29	596.0	161	42	72	2.02
2748952.500	1533407.500	G1408		16	4.6	7.0	1.5	8.0	0.15	600.0	156	43	90	2.49
2821804.500	1477372.125	G1408		70	2.4	2.2	0.5	8.1	0.29	605.0	162	44	71	1.96
2734860.750	1548652.625	G1408		1	2.6	2.2	0.8	8.3	0.29	628.0	155	43	67	1.78
2738336.500	1526155.875	G1408		22	2.4	17.8	1.6	8.1	0.32	651.0	154	43	62	1.58
2730543.000	1490813.750	G1408		51	2.9	2.3	0.9	8.0	0.15	793.0	151	43	85	1.79
2665342.500	1383716.375	G1410		56	1.3	6.1	0.9	8.3	0.32	234.0	161	70	39	2.81
2623965.250	1367047.625	G1410		68	1.0	3.3	1.1	7.8	0.32	245.0	163	70	41	2.78
2642815.000	1375639.000	G1410		60	3.2	5.8	3.5	7.7	0.29	255.0	161	70	44	2.90
2617329.000	1374311.500	G1410		61	2.5	1.0	2.5	8.2	0.32	259.0	164	69	43	2.74
2539583.750	1338995.375	G1410		92	2.0	0.3	2.3	8.4	0.32	304.0	163	66	45	2.46
2513311.000	1337173.000	G1410		89	1.6	0.3	1.6	8.4	0.29	358.0	162	66	49	2.28
2637057.750	1415164.750	G1410		27	3.0	0.0	2.0	7.7	0.29	370.0	160	68	46	2.05
2574358.750	1405039.750	G1410		34	1.2	4.7	0.3	8.0	0.32	395.0	163	67	44	1.85
2668867.250	1416235.500	G1410		26	3.3	2.8	2.3	8.0	0.29	418.0	160	66	48	1.90
2630726.750	1425638.750	G1410		17	4.4	5.7	2.5	7.7	0.29	459.0	160	68	46	1.66
2548984.500	1427015.750	G1410		13	0.6	2.8	1.9	8.8	0.32	473.0	165	65	47	1.66
2648748.000	1440198.125	G1410		2	1.3	2.8	0.3	8.0	0.32	543.0	161	68	41	1.27
2861898.750	1370831.125	G1411		70	4.0	0.1	0.6	7.9	0.29	670.0	164	41	75	1.88
2759631.250	1439977.875	G1411		1	2.3	1.2	0.7	7.9	0.29	675.0	162	45	70	1.73
2860828.000	1389993.625	G1411		52	4.6	0.2	0.6	7.6	0.29	721.0	164	41	75	1.74
2869950.000	1426846.000	G1411		21	5.5	2.1	1.2	7.8	0.29	739.0	164	41	75	1.70
2838442.500	1344534.000	G1411		93	6.4	2.2	0.4	7.8	0.22	745.0	163	39	88	1.97
2864382.750	1430223.875	G1411		17	2.2	14.0	1.1	7.8	0.29	757.0	164	41	75	1.66
2903558.500	1349260.875	G1411		89	0.8	0.7	0.3	7.9	0.29	783.0	165	40	77	1.64
2857458.000	1408663.125	G1411		37	4.6	1.7	0.5	7.9	0.29	824.0	164	41	75	1.53
1110535.250	2255943.750	H1102		16	0.5	8.3	0.9	7.9	0.32	320.0	151	60	43	2.22
1268152.375	2180082.500	H1103		71	1.6	21.0	2.1	7.7	0.29	173.0	156	54	57	5.47
1227072.125	2182312.750	H1103		72	4.1	26.9	0.8	7.7	0.32	269.0	153	59	45	2.79
1212394.125	2054049.125	H110506		64	1.3	15.9	1.1	8.0	0.29	127.0	160	64	50	6.51
1153758.375	2116748.250	H110506		34	0.8	15.9	0.1	8.6	0.29	169.0	158	62	50	4.95
1156427.875	2130548.000	H110506		25	0.5	260.0	0.8	7.9	0.32	172.0	157	62	45	4.34
1154646.375	2123130.750	H110506		29	1.3	30.9	0.5	8.4	0.32	177.0	158	62	45	4.28
1274470.625	2155726.250	H110506		6	0.2	18.7	0.4	8.5	0.32	205.0	158	56	51	4.18
1235526.000	2161406.500	H110506		4	0.1	5.3	0.1	8.3	0.29	292.0	153	58	51	2.89
1241179.375	2145932.000	H110506		15	0.1	4.5	0.1	7.9	0.29	313.0	156	58	53	2.81
1320061.125	1945054.250	H1109		48	0.4	6.8	0.3	8.0	0.29	146.0	162	58	57	6.51
1318556.500	1935657.125	H1109		54	0.1	31.2	0.3	6.8	0.29	149.0	162	58	57	6.38
1396223.125	2186115.250	H1201		26	0.1	3.1	0.3	8.3	0.32	132.0	155	51	54	6.87
1423385.375	2251355.500	H1201		3	0.3	32.5	1.9	8.3	0.32	144.0	154	50	55	6.33
1417050.125	2213645.750	H1201		16	0.3	11.4	1.9	8.4	0.32	157.0	154	51	54	5.70
1421583.750	2227113.500	H1201		7	0.1	8.2	1.1	8.1	0.29	159.0	154	51	58	6.12
1422622.000	2222433.500	H1201		11	0.2	16.8	0.7	9.1	0.29	161.0	154	51	58	6.04
1430111.625	2239551.500	H1201		4	0.2	10.3	0.5	8.4	0.32	162.0	153	51	53	5.46
1428400.375	2230931.500	H1201		5	0.1	28.0	0.8	8.3	0.32	164.0	153	51	53	5.39
1430290.750	2174472.750	H1201		31	0.1	6.1	1.2	7.2	0.32	171.0	154	52	53	5.14
1441682.250	2223488.000	H1201		9	0.1	10.8	0.5	8.3	0.29	178.0	152	51	57	5.33

Anexo C. Propiedades de los suelos y estimación del IHT en los pozos edafológicos usados para establecer las relaciones ϕ (IHT) actualizadas

Coordenadas		Clave Carta	Pozo	MO %	P ppm	K	pH adim	Albedo adim	Pr mm año ⁻¹	Rg kcal cm ⁻² año ⁻¹	Rb	Rn	IHT adim
X	Y												
1451485.875	2215801.750	H1201	13	0.7	53.2	0.5	7.8	0.29	191.0	152	51	57	4.97
1449560.500	2144975.750	H1201	36	0.4	25.5	0.7	8.1	0.32	192.0	155	53	52	4.55
1464963.125	2160121.250	H1201	34	0.1	22.2	0.5	6.7	0.29	207.0	155	53	57	4.59
1497310.875	2175031.500	H1201	29	0.1	26.0	0.3	7.7	0.29	220.0	155	54	56	4.25
1500208.875	2205082.250	H1201	19	0.1	23.2	0.5	8.2	0.29	223.0	153	53	56	4.16
1540976.375	2210646.500	H1201	12	0.5	19.7	1.4	7.0	0.29	225.0	153	53	56	4.12
1525228.875	2205421.000	H1201	18	0.1	8.1	0.3	8.3	0.29	228.0	153	53	56	4.07
1511961.375	2145352.750	H1201	35	0.1	57.7	0.3	8.3	0.29	253.0	154	55	54	3.58
1535679.000	2166041.750	H1201	33	0.5	14.0	0.6	8.3	0.29	298.0	153	54	55	3.06
1547253.250	2203149.000	H1202	1	0.6	11.0	0.6	8.1	0.29	253.0	154	54	55	3.65
1549712.625	2148401.750	H1202	47	0.5	17.5	0.5	7.4	0.29	301.0	153	56	53	2.91
1564850.000	2187773.250	H1202	6	1.0	37.2	1.1	7.1	0.29	302.0	153	55	54	2.96
1554984.000	2189257.250	H1202	5	1.2	9.4	0.9	8.0	0.29	302.0	153	54	55	3.01
1548319.000	2152183.000	H1202	41	0.4	21.0	0.5	7.4	0.22	302.0	153	56	63	3.50
1567874.000	2185216.250	H1202	8	0.5	7.9	0.3	6.4	0.15	305.0	153	55	75	4.10
1561181.875	2186850.500	H1202	7	0.6	0.4	1.1	7.7	0.15	305.0	153	54	76	4.16
1558591.875	2138566.000	H1202	57	0.3	13.8	0.2	7.0	0.29	308.0	153	56	53	2.85
1573476.500	2182187.500	H1202	9	0.6	19.9	0.8	6.7	0.29	309.0	153	55	54	2.89
1562284.875	2175720.000	H1202	13	0.5	17.2	0.5	7.0	0.29	311.0	153	55	54	2.87
1595582.875	2170274.500	H1202	14	0.9	5.5	0.4	6.9	0.29	336.0	153	56	53	2.61
1715735.500	2152461.500	H1202	28	0.1	14.4	0.4	5.8	0.29	374.0	150	61	46	2.03
1714531.500	2146681.250	H1202	33	1.6	5.9	0.6	6.8	0.32	388.0	149	61	40	1.73
1668397.125	2143059.250	H1202	43	1.8	2.9	0.5	6.9	0.29	411.0	155	60	50	2.03
1712182.625	2132580.000	H1202	53	2.7	9.4	0.5	5.2	0.29	416.0	150	61	46	1.82
1717957.125	2129199.500	H1202	56	1.2	3.2	0.5	5.2	0.29	427.0	149	61	45	1.75
1923271.250	2166791.500	H1203	9	0.8	28.7	1.8	8.8	0.32	246.0	150	62	40	2.71
1922011.375	2168091.500	H1203	8	0.2	18.0	0.9	8.0	0.32	247.0	150	62	40	2.70
1923646.000	2130492.750	H1203	40	0.1	32.8	1.4	10.1	0.29	247.0	152	64	44	2.96
1920149.250	2174065.250	H1203	7	0.8	7.7	2.2	8.3	0.32	251.0	150	62	40	2.66
1912044.625	2156942.000	H1203	10	0.7	4.3	0.9	7.8	0.32	253.0	151	63	40	2.61
1917236.250	2186960.250	H1203	5	0.7	13.8	2.0	8.1	0.32	256.0	149	61	40	2.63
1914172.125	2183180.250	H1203	6	0.4	14.6	1.4	8.6	0.32	257.0	150	61	41	2.66
1917320.000	2150730.250	H1203	12	1.7	34.3	2.7	8.1	0.29	259.0	151	63	44	2.84
1923238.125	2200061.500	H1203	3	1.5	11.4	2.0	7.9	0.32	265.0	149	61	40	2.54
1918199.750	2201278.000	H1203	2	1.2	0.1	0.8	8.2	0.32	267.0	149	61	40	2.52
1876714.375	2131507.500	H1203	43	0.5	5.0	1.9	9.2	0.32	318.0	149	62	39	2.06
1845073.250	2155089.750	H1203	11	1.5	32.0	0.8	6.9	0.29	320.0	149	61	45	2.33
1448559.875	2108575.000	H1204	29	0.2	9.1	0.4	8.0	0.32	166.0	156	56	50	5.03
1445337.500	2124074.500	H1204	16	0.2	45.5	0.4	8.1	0.32	173.0	156	55	51	4.92
1466130.250	2085815.375	H1204	46	0.1	6.2	0.3	8.2	0.32	175.0	156	57	49	4.67
1451553.750	2110308.250	H1204	25	0.2	6.6	0.4	8.2	0.32	176.0	156	56	50	4.74
1489066.125	2086921.875	H1204	43	0.2	3.7	0.2	8.2	0.29	177.0	153	57	52	4.86
1481062.500	2078349.875	H1204	53	0.2	5.9	0.4	8.7	0.32	178.0	154	57	48	4.47
1480426.375	2127993.750	H1204	10	0.1	22.8	0.4	8.1	0.32	179.0	156	55	51	4.76
1488932.125	2072394.750	H1204	60	0.2	7.9	0.3	8.4	0.32	180.0	154	57	48	4.42
1473786.625	2080613.750	H1204	50	0.2	28.4	0.9	8.5	0.32	183.0	154	57	48	4.35
1486309.250	2121365.000	H1204	17	1.0	29.0	0.4	8.2	0.32	190.0	154	55	50	4.36
1498048.875	2095477.500	H1204	36	0.1	50.9	0.7	7.9	0.32	205.0	153	57	47	3.82
1505856.875	2079636.125	H1204	49	1.2	16.9	0.4	8.4	0.29	205.0	153	57	52	4.20
1512624.875	2056760.125	H1204	70	0.6	19.0	1.4	8.1	0.15	206.0	154	58	73	5.90
1506027.250	2045205.875	H1204	80	0.4	16.2	1.2	8.0	0.29	207.0	154	58	51	4.13
1509487.500	2082448.125	H1204	47	0.7	17.3	2.7	8.6	0.22	207.0	154	57	63	5.08
1514008.875	2073659.250	H1204	56	0.4	10.3	1.2	8.5	0.15	224.0	154	58	73	5.42
1522533.625	2076587.750	H1204	52	1.2	24.2	1.5	8.3	0.15	227.0	154	58	73	5.35
1510103.125	2034499.125	H1204	88	0.1	38.7	0.5	7.8	0.15	229.0	155	58	74	5.37
1534566.750	2086986.375	H1204	42	0.2	3.1	0.3	8.3	0.32	239.0	154	58	47	3.26
1540720.625	2136157.500	H1204	1	1.1	28.2	0.2	7.9	0.29	294.0	152	56	52	2.94
1543907.750	2031637.750	H1205	93	0.5	0.1	0.6	8.0	0.32	231.0	156	58	48	3.47
1584899.125	2057928.125	H1205	68	0.1	7.6	0.5	7.6	0.22	263.0	155	58	63	3.99
1612267.125	2042813.625	H1205	81	0.6	1.3	0.2	8.2	0.29	289.0	157	58	53	3.08
1607194.250	2084546.875	H1205	46	0.5	14.1	0.5	7.6	0.32	296.0	156	59	47	2.65

Anexo C. Propiedades de los suelos y estimación del IHT en los pozos edafológicos usados para establecer las relaciones ϕ (IHT) actualizadas

Coordenadas		Clave Carta	Pozo	MO	P	K	pH	Albedo	Pr	Rg	Rb	Rn	IHT
X	Y			%	ppm		adim.	adim.	mm	adim.	kcal cm ⁻²	adim.	adim.
1561000.375	2128766.000	H1205	8	0.3	19.1	0.9	8.0	0.29	325.0	153	56	53	2.70
1918671.625	2100036.500	H1206	12	2.1	37.3	1.9	7.1	0.29	294.0	148	65	40	2.27
1919166.750	2073284.125	H1206	42	1.0	17.6	1.2	7.8	0.29	296.0	147	63	41	2.33
1923183.500	2065201.000	H1206	47	1.2	2.9	1.1	7.9	0.15	297.0	147	62	63	3.53
1923183.500	2065201.000	H1206	47	1.2	2.9	1.1	7.9	0.15	297.0	147	62	63	3.53
1911436.500	2100739.250	H1206	11	1.8	18.5	3.4	7.9	0.29	305.0	148	65	40	2.19
1879649.250	2113788.000	H1206	5	0.7	10.6	0.8	7.7	0.29	341.0	149	62	44	2.14
1875313.250	2115382.000	H1206	2	0.8	4.3	0.8	8.5	0.32	343.0	148	62	39	1.88
1889706.500	2099818.500	H1206	16	0.8	29.9	0.8	5.4	0.22	347.0	148	63	52	2.52
1895216.250	2083814.625	H1206	34	1.0	41.0	1.1	5.6	0.29	349.0	147	62	42	2.02
1852181.000	2095028.000	H1206	24	0.6	5.8	0.7	7.6	0.29	360.0	144	59	43	2.00
1854426.500	2116408.750	H1206	1	1.2	30.7	1.3	5.8	0.29	371.0	147	60	44	1.99
1497973.750	1962401.750	H1207	35	0.3	13.8	1.4	7.9	0.32	174.0	160	53	56	5.34
1497129.500	1965129.500	H1207	34	3.3	25.0	1.1	7.8	0.32	175.0	160	53	56	5.31
1510854.750	1979835.375	H1207	27	0.4	30.8	0.4	8.3	0.29	179.0	159	56	57	5.30
1512665.750	1991258.750	H1207	24	0.6	78.2	0.3	8.1	0.29	201.0	158	56	56	4.66
1504846.625	2014841.375	H1207	10	1.1	18.0	0.3	8.2	0.29	210.0	158	56	56	4.46
1496840.875	2003653.875	H1207	15	0.8	10.0	0.3	7.8	0.29	211.0	158	55	57	4.52
1493711.125	1996455.750	H1207	22	0.2	14.7	0.3	8.3	0.29	211.0	158	55	57	4.52
1526352.875	1976288.875	H1207	28	0.1	33.4	0.3	8.1	0.29	233.0	157	59	52	3.75
1515798.125	2028400.875	H1207	1	2.4	17.0	0.3	7.8	0.29	240.0	156	59	52	3.59
1531210.875	2023081.375	H1207	4	0.9	3.2	0.3	8.0	0.29	243.0	156	58	53	3.62
1528992.625	1988956.750	H1207	25	0.3	82.6	0.3	7.3	0.22	247.0	156	59	63	4.23
1524512.875	1996654.875	H1207	21	0.1	38.7	0.4	8.1	0.29	259.0	156	59	52	3.33
1505954.500	2020341.250	H1207	7	1.2	18.7	0.3	8.2	0.29	263.0	156	59	52	3.28
1568790.500	1942559.375	H1208	72	0.2	19.6	0.4	7.3	0.32	165.0	158	57	50	5.09
1530658.500	1923853.125	H1208	94	0.5	10.8	1.1	8.8	0.29	165.0	159	56	57	5.75
1571621.125	1958793.500	H1208	54	0.5	16.3	0.4	7.3	0.29	175.0	157	57	54	5.19
1605111.500	1930267.125	H1208	79	1.4	4.3	0.3	7.6	0.15	182.0	157	52	81	7.46
1556123.625	1950120.625	H1208	64	1.2	65.3	0.2	7.5	0.29	183.0	157	58	53	4.87
1546614.250	1973951.500	H1208	47	0.3	21.3	1.5	7.6	0.29	224.0	156	58	53	3.93
1600387.250	1998281.125	H1208	23	0.7	4.7	0.4	6.6	0.15	226.0	153	56	74	5.46
1623366.500	1921439.000	H1208	87	1.1	58.0	0.3	5.7	0.15	229.0	157	49	84	6.15
1533997.500	1978945.375	H1208	43	1.8	85.8	2.0	7.4	0.29	231.0	157	59	52	3.79
1545532.250	2024205.375	H1208	3	0.3	14.7	0.2	7.1	0.15	236.0	156	58	75	5.27
1606650.000	2020825.250	H1208	1	1.3	10.3	0.3	7.6	0.22	269.0	154	56	64	3.97
1639009.250	1911901.000	H1208	98	0.4	7.1	0.6	8.1	0.15	281.0	158	47	87	5.18
1635369.125	1997416.375	H1208	22	0.5	19.3	1.1	6.6	0.15	335.0	151	54	74	3.70
1680771.625	1940810.125	H1208	66	1.1	3.1	0.2	7.8	0.15	384.0	152	51	78	3.39
1683889.250	1914973.375	H1208	93	1.0	3.8	0.5	8.2	0.15	397.0	153	50	80	3.36
1691232.500	1906587.500	H1208	100	1.8	0.1	0.1	8.1	0.22	459.0	153	50	69	2.52
1554125.125	1903217.750	H1211	7	1.2	0.1	2.0	8.3	0.29	169.0	160	57	57	5.58
1554434.125	1862226.875	H1211	53	0.6	26.7	1.9	8.1	0.32	217.0	161	55	54	4.18
1615806.000	1896825.125	H1211	21	2.0	25.5	1.1	7.6	0.32	236.0	159	51	57	4.03
1590921.125	1872583.375	H1211	42	1.3	53.1	1.4	7.8	0.15	236.0	160	54	82	5.79
1627519.750	1900839.375	H1211	13	1.9	19.5	0.5	8.1	0.15	257.0	158	49	85	5.53
1570024.000	1851837.875	H1211	58	0.1	27.8	0.8	9.1	0.32	262.0	159	54	54	3.44
1613328.875	1874243.375	H1211	37	1.2	23.3	0.3	6.4	0.15	273.0	157	53	80	4.91
1578478.125	1842152.750	H1211	69	0.5	1.2	1.3	7.9	0.29	294.0	157	52	59	3.37
1645832.375	1878241.125	H1211	30	1.9	10.7	0.5	8.0	0.15	299.0	155	50	82	4.56
1651576.000	1846617.750	H1211	59	0.1	49.8	2.1	7.7	0.15	314.0	153	50	80	4.25
1664011.250	1804745.000	H1211	97	1.0	35.9	1.4	7.7	0.15	328.0	155	49	83	4.20
1664828.750	1832351.250	H1211	73	0.3	16.4	0.6	6.9	0.15	334.0	153	49	81	4.04
1692854.375	1813949.250	H1211	89	0.6	16.6	0.4	6.7	0.15	341.0	153	48	82	4.01
1695388.750	1804924.875	H1211	95	1.6	24.5	0.7	7.0	0.15	356.0	154	47	84	3.93
1693281.500	1836111.500	H1211	68	0.8	7.7	0.6	7.6	0.15	402.0	152	48	81	3.37
1688026.375	1904267.125	H1211	2	1.9	5.9	0.6	8.2	0.15	450.0	153	50	80	2.96
2069794.375	2121927.250	H1301	78	0.4	9.1	0.9	9.1	0.32	214.0	153	61	43	3.35
2078762.000	2174923.000	H1301	18	0.7	14.3	1.5	8.8	0.32	219.0	153	61	43	3.28
2058315.500	2171046.000	H1301	21	0.5	13.5	0.6	8.1	0.29	221.0	152	60	48	3.61
2048889.250	2164683.500	H1301	28	0.1	9.2	0.5	8.2	0.32	226.0	152	60	43	3.20

Anexo C. Propiedades de los suelos y estimación del IHT en los pozos edafológicos usados para establecer las relaciones ϕ (IHT) actualizadas

Coordenadas		Clave Carta	Pozo	MO	P	K	pH	Albedo	Pr	Rg	Rb	Rn	IHT
X	Y		%	ppm	adim	adim	adim	adim	mm	mm	adim	adim	adim
1976919.875	2142351.750	H1301	56	0.2	21.2	3.8	9.0	0.29	239.0	153	62	47	3.25
1929914.250	2151788.000	H1301	48	0.6	19.0	1.4	9.2	0.32	240.0	151	63	40	2.76
2032931.000	2136174.000	H1301	62	0.3	4.8	1.1	8.6	0.32	241.0	152	61	42	2.93
1956800.000	2162331.000	H1301	33	0.6	8.1	1.3	8.0	0.29	241.0	150	62	45	3.08
1970996.875	2138447.750	H1301	60	0.2	10.2	1.3	8.0	0.29	241.0	152	62	46	3.18
1969915.125	2154987.500	H1301	41	0.2	17.6	1.7	8.3	0.32	242.0	150	62	40	2.75
1928658.500	2158386.000	H1301	38	0.3	38.3	1.8	7.7	0.32	242.0	151	62	41	2.80
1950914.250	2171264.250	H1301	23	1.0	13.7	1.8	8.3	0.32	242.0	150	61	41	2.82
1991545.875	2153018.000	H1301	46	0.5	0.2	0.9	9.0	0.32	242.0	152	61	42	2.92
2056802.875	2131252.000	H1301	67	0.1	0.1	0.4	9.1	0.32	243.0	153	61	43	2.95
2010545.500	2149045.250	H1301	51	0.5	9.1	1.6	9.0	0.32	243.0	152	60	43	2.97
1973460.750	2167447.250	H1301	24	0.5	16.0	1.9	8.2	0.32	244.0	149	61	40	2.75
1926684.000	2166632.250	H1301	26	0.5	22.3	1.8	8.1	0.32	245.0	150	62	40	2.72
1926684.000	2166632.250	H1301	26	0.5	22.3	1.8	8.1	0.32	245.0	150	62	40	2.72
1995474.875	2164254.000	H1301	29	0.5	9.7	0.2	9.7	0.32	246.0	152	60	43	2.94
1967428.625	2175762.750	H1301	19	0.6	4.3	1.8	8.9	0.15	246.0	149	61	66	4.45
2008752.125	2166442.500	H1301	25	0.1	8.1	0.6	9.0	0.32	250.0	152	60	43	2.89
1969785.625	2181619.000	H1301	17	0.5	5.6	0.7	9.2	0.32	252.0	149	60	41	2.73
2038314.125	2123633.000	H1301	75	0.5	4.9	1.2	8.9	0.29	253.0	152	61	47	3.09
2055297.625	2119718.750	H1301	86	0.1	0.8	0.3	9.3	0.32	254.0	152	61	42	2.78
1938203.875	2197797.250	H1301	4	1.6	6.1	0.7	8.8	0.32	258.0	148	60	41	2.63
1990409.750	2185299.750	H1301	13	0.9	7.0	0.5	9.3	0.32	262.0	151	59	44	2.78
2127517.250	2132240.750	H1302	3	1.0	14.0	0.7	7.8	0.29	185.0	155	65	45	4.06
2141102.000	2123214.750	H1302	5	1.4	0.1	1.9	8.3	0.32	189.0	155	66	39	3.47
2108066.000	2083576.625	H1304	24	1.0	4.8	1.1	7.7	0.29	224.0	151	63	44	3.29
2085578.000	2102727.750	H1304	9	0.8	2.6	2.1	8.2	0.32	230.0	151	62	41	2.95
2052241.250	2088575.125	H1304	21	0.6	6.1	1.4	9.0	0.29	233.0	150	60	47	3.33
2082849.500	2069146.000	H1304	37	0.1	4.1	0.3	8.5	0.29	241.0	150	61	46	3.15
2064031.750	2041218.000	H1304	59	0.4	7.4	0.7	9.0	0.22	251.0	150	62	55	3.65
1975066.375	2102987.000	H1304	11	1.6	26.5	1.7	7.6	0.32	261.0	152	62	41	2.94
2037004.125	2111359.750	H1304	2	0.7	7.3	1.0	9.1	0.29	262.0	152	61	47	2.68
2021440.500	2102198.250	H1304	12	1.3	7.8	1.4	8.5	0.32	263.0	151	61	42	2.64
2064219.875	2015045.125	H1304	89	0.1	5.3	0.7	8.2	0.29	264.0	153	63	46	2.88
2009930.375	2041465.375	H1304	61	0.6	3.8	0.6	8.9	0.32	269.0	152	62	41	2.56
2030661.125	2046923.000	H1304	55	1.2	4.8	0.9	8.3	0.32	280.0	151	61	42	2.48
2004933.375	2052446.500	H1304	50	2.3	6.0	0.9	8.5	0.22	281.0	151	62	56	3.31
1927077.750	2088267.500	H1304	23	1.8	3.7	1.7	7.8	0.29	284.0	148	64	41	2.41
2020521.125	2047235.250	H1304	54	2.3	5.5	0.4	8.3	0.22	284.0	151	61	57	3.33
1929036.875	2064939.375	H1304	46	3.1	18.1	0.9	7.9	0.15	284.0	148	62	64	3.74
2080189.750	2006189.375	H1304	94	0.7	13.2	1.6	8.2	0.32	285.0	152	63	40	2.36
1956801.875	2031291.875	H1304	74	1.3	2.8	1.2	9.2	0.32	293.0	150	63	39	2.22
2030796.500	2067726.875	H1304	41	0.8	0.4	3.1	9.6	0.32	295.0	149	61	40	2.28
1993650.875	2003863.125	H1304	99	1.7	5.3	1.3	7.7	0.32	299.0	153	61	43	2.40
1922129.625	2064663.125	H1304	47	0.8	32.8	1.8	7.9	0.29	303.0	147	62	42	2.33
1922129.625	2064663.125	H1304	47	0.8	32.8	1.8	7.9	0.29	303.0	147	62	42	2.33
1954179.375	2004944.875	H1304	97	3.1	2.0	4.0	9.8	0.32	326.0	151	63	40	2.03
2121471.500	2104194.250	H1305	1	1.1	7.0	0.5	8.0	0.29	214.0	154	64	45	3.53
2124863.000	2095324.000	H1305	5	0.8	2.1	0.6	8.0	0.22	223.0	154	64	56	4.19
2123803.250	2078654.375	H1305	14	1.0	1.5	0.7	8.0	0.22	232.0	153	63	56	4.05
2127840.000	2074353.875	H1305	18	0.9	1.3	0.4	8.1	0.29	235.0	152	63	45	3.19
2137871.000	2024410.375	H1305	71	0.8	4.1	0.9	8.1	0.29	269.0	153	62	47	2.89
2129106.750	2057427.000	H1305	33	1.5	1.3	1.9	7.9	0.32	283.0	152	63	40	2.38
2167547.000	2055708.250	H1305	35	1.7	0.1	0.2	7.7	0.32	289.0	154	63	42	2.41
2191000.750	2051077.000	H1305	41	0.3	7.8	0.2	8.2	0.29	293.0	156	62	49	2.77
2211406.250	2002714.000	H1305	91	1.1	0.1	0.8	7.7	0.29	300.0	158	59	53	2.95
2154401.250	2047306.000	H1305	44	1.0	1.3	0.7	8.0	0.29	305.0	153	63	46	2.49
2182150.500	2039041.875	H1305	56	0.7	0.1	0.2	8.0	0.29	305.0	155	62	48	2.63
2192756.000	2039883.375	H1305	52	0.5	0.1	0.1	8.1	0.29	305.0	156	62	49	2.66
2172812.250	2039253.500	H1305	55	1.7	0.1	0.1	7.8	0.29	308.0	154	62	47	2.56
2152342.750	2046461.250	H1305	46	1.7	4.1	1.3	7.7	0.22	308.0	153	63	56	3.05
2202582.000	1996496.625	H1305	99	1.6	0.1	0.8	7.7	0.29	309.0	157	59	52	2.83

Anexo C. Propiedades de los suelos y estimación del IHT en los pozos edafológicos usados para establecer las relaciones ϕ (IHT) actualizadas

Coordenadas		Clave Carta		Pozo		MO	P	K	pH	Albedo	Pr	Rg	Rb	Rn	IHT
X	Y					%	ppm		adim	adim	mm	adim ⁻¹	kcal cm ⁻²	adim ⁻¹	adim
2138793.500	2054765.000	H1305		38	1.1	3.5	1.4	8.3	0.22	309.0	152	63	56	3.00	
2157748.750	2016314.500	H1305		80	0.3	1.3	0.6	8.1	0.29	310.0	154	62	47	2.55	
2199841.250	2026482.000	H1305		66	1.1	0.1	1.2	7.8	0.32	319.0	157	61	46	2.39	
2122773.500	2003488.000	H1305		93	1.0	5.3	1.0	8.0	0.32	320.0	154	62	43	2.23	
2204609.000	2020563.000	H1305		74	0.7	3.8	1.2	7.7	0.32	322.0	157	60	47	2.42	
1971971.500	1999504.250	H1307		4	1.2	11.0	0.4	7.4	0.29	280.0	151	62	45	2.69	
2043678.375	1977254.875	H1307		25	1.2	15.6	0.9	7.4	0.29	323.0	151	63	44	2.28	
2098052.500	1987347.000	H1307		11	2.1	0.1	1.5	8.1	0.32	330.0	150	63	39	1.97	
2072850.125	1928056.875	H1307		65	1.4	21.5	0.8	6.2	0.29	350.0	154	62	47	2.25	
2096628.375	1975720.125	H1307		26	0.7	8.7	0.5	7.7	0.32	358.0	151	62	41	1.89	
2107658.750	1963345.625	H1307		37	0.8	5.2	1.2	8.5	0.29	364.0	151	62	45	2.07	
2080940.375	1928293.625	H1307		62	0.7	3.5	1.1	9.5	0.29	376.0	153	62	47	2.07	
1933415.250	1931069.250	H1307		63	2.7	38.6	2.3	9.0	0.32	645.0	148	65	36	0.92	
2273135.500	1912399.625	H1308		70	0.4	3.9	0.7	7.8	0.32	268.0	159	56	52	3.24	
2149899.250	1913715.750	H1308		71	0.7	3.5	0.5	8.3	0.29	333.0	160	63	51	2.53	
2257263.250	1883900.250	H1308		100	1.0	3.9	0.9	8.0	0.29	335.0	156	60	51	2.53	
2123725.000	1946011.625	H1308		42	1.2	0.7	1.0	8.1	0.32	352.0	154	61	44	2.07	
2242647.750	1894819.000	H1308		88	1.0	6.6	2.4	8.0	0.29	355.0	158	60	52	2.45	
2136811.000	1959571.250	H1308		31	1.0	2.6	0.6	8.5	0.29	356.0	155	61	49	2.30	
2120953.750	1900957.375	H1308		84	0.3	2.8	0.5	9.1	0.32	370.0	156	61	45	2.03	
2148720.250	1979498.125	H1308		15	1.6	8.4	2.2	8.1	0.29	379.0	155	61	49	2.16	
2330405.500	1887913.000	H1309		28	0.7	2.3	1.6	8.2	0.29	307.0	157	55	56	3.07	
2343681.250	1883809.625	H1309		30	0.4	21.0	0.2	8.2	0.29	311.0	157	55	56	3.03	
2454435.750	1931963.125	H1309		5	1.8	0.1	0.6	8.0	0.32	401.0	156	49	57	2.37	
2464358.750	1912071.125	H1309		12	2.0	0.1	0.7	8.0	0.32	431.0	156	48	58	2.25	
2463127.250	1899893.625	H1309		15	0.3	51.1	0.4	7.8	0.29	431.0	156	48	63	2.43	
2498949.250	1940907.750	H1309		3	3.9	0.1	0.8	7.9	0.32	447.0	154	48	57	2.11	
2498949.250	1940907.750	H1309		3	3.9	0.1	0.8	7.9	0.32	447.0	154	48	57	2.11	
2490424.500	1940252.625	H1309		4	1.8	1.0	1.1	8.0	0.29	447.0	154	49	60	2.25	
2495731.750	1946001.375	H1309		2	1.6	0.1	1.0	8.1	0.29	462.0	154	49	60	2.18	
2238020.250	1847702.625	H1311		33	1.3	3.2	1.6	8.2	0.32	308.0	156	60	46	2.49	
2207500.000	1869563.000	H1311		17	2.0	1.9	0.1	8.3	0.29	316.0	156	60	51	2.68	
2236686.500	1864232.375	H1311		20	1.0	2.6	1.0	8.3	0.29	325.0	156	60	51	2.60	
2218945.000	1803295.625	H1311		74	0.2	19.7	0.1	6.9	0.29	330.0	155	59	51	2.58	
2250550.000	1874546.625	H1311		9	0.9	13.5	1.0	8.0	0.29	332.0	157	60	51	2.58	
2193140.750	1784915.000	H1311		87	0.7	4.8	0.6	8.4	0.29	359.0	155	58	52	2.42	
2141780.250	1843475.250	H1311		39	1.0	5.4	1.3	8.0	0.29	361.0	153	59	50	2.29	
2261823.750	1793146.375	H1311		78	0.7	9.8	0.6	7.8	0.29	372.0	157	62	49	2.22	
2266813.250	1845407.750	H1311		35	0.3	8.7	0.5	7.3	0.29	375.0	154	60	49	2.19	
2131899.000	1859585.250	H1311		24	2.9	3.5	1.6	8.2	0.22	388.0	153	60	59	2.55	
2128712.000	1873587.375	H1311		12	1.0	0.4	0.6	8.1	0.29	403.0	154	60	49	2.04	
2114863.500	1885826.250	H1311		1	0.1	0.1	3.3	8.8	0.32	405.0	154	61	44	1.80	
2379900.750	1771136.125	H1312		42	0.7	2.2	1.0	8.3	0.29	304.0	156	55	56	3.06	
2377382.250	1847285.500	H1312		10	0.4	14.5	0.7	8.2	0.32	338.0	156	55	51	2.52	
2377856.000	1834514.000	H1312		16	0.3	1.5	0.6	8.1	0.32	341.0	156	56	50	2.45	
2397408.750	1835519.125	H1312		15	1.2	2.6	0.6	8.1	0.29	346.0	155	53	57	2.75	
2429724.500	1775346.625	H1312		38	2.2	0.1	0.6	7.9	0.29	364.0	156	51	60	2.74	
2321954.500	1789064.875	H1312		34	1.6	1.1	0.8	8.1	0.32	385.0	156	59	47	2.04	
2305464.250	1791977.250	H1312		31	1.1	3.0	1.1	8.4	0.29	401.0	156	60	51	2.11	
2311341.250	1830925.000	H1312		17	1.0	5.0	1.5	7.6	0.29	415.0	157	59	52	2.11	
2508055.000	1954685.250	H1407		1	1.8	0.3	0.4	7.5	0.29	539.0	154	47	62	1.93	
2537035.750	1916134.250	H1407		23	4.5	3.0	1.2	7.6	0.29	550.0	155	46	64	1.94	
2597038.500	1896197.875	H1407		31	2.3	3.2	1.1	7.8	0.29	586.0	152	47	61	1.73	
2693727.500	1772967.875	H1410		46	1.1	2.3	0.3	7.6	0.29	372.0	159	45	68	3.04	
2537365.000	1769875.000	H1410		45	1.9	1.1	0.8	7.8	0.29	423.0	157	48	63	2.50	
2572677.250	1783591.500	H1410		35	2.1	0.5	0.8	7.9	0.29	430.0	157	48	63	2.46	
2593951.750	1818407.625	H1410		16	3.8	1.4	0.4	7.7	0.29	433.0	158	48	64	2.47	
2597860.500	1818154.375	H1410		18	2.3	1.7	0.3	7.9	0.29	435.0	158	48	64	2.46	
2583620.500	1773700.750	H1410		44	2.3	0.1	0.6	7.8	0.29	437.0	158	48	64	2.45	
2585021.750	1784031.750	H1410		36	4.8	4.0	0.6	7.7	0.29	438.0	158	48	64	2.44	
2609698.250	1812328.375	H1410		22	5.1	0.2	0.1	7.8	0.29	465.0	158	49	63	2.26	

Anexo C. Propiedades de los suelos y estimación del IHT en los pozos edafológicos usados para establecer las relaciones ϕ (IHT) actualizadas

Coordenadas		Clave Carta	Pozo	MO	P	K	pH	Albedo	Pr	Rg	Rb	Rn	IHT
X	Y		%	ppm	adim	adim	adim	adim	mm año ⁻¹	kcal cm ⁻² año ⁻¹	kcal cm ⁻² año ⁻¹	adim	adim
2645614.750	1783189.875	H1410	38	1.6	2.8	0.7	7.8	0.29	470.0	158	48	64	2.28
2617347.250	1847519.750	H1410	8	0.9	0.1	0.2	7.9	0.29	474.0	157	47	64	2.27
2661089.500	1783817.875	H1410	39	1.4	0.1	0.7	7.9	0.29	477.0	157	47	64	2.25
2643420.250	1832788.875	H1410	13	3.1	2.5	1.0	7.9	0.29	479.0	158	47	65	2.27
2620320.250	1794909.125	H1410	31	7.8	0.9	0.4	7.6	0.15	480.0	158	50	84	2.93
2630906.500	1795437.750	H1410	29	2.1	0.1	0.4	7.8	0.29	482.0	158	49	63	2.18
2655531.500	1820463.000	H1410	17	1.5	0.5	0.6	7.8	0.29	482.0	157	47	64	2.23
2653298.750	1791363.875	H1410	32	1.4	0.1	0.2	8.1	0.29	486.0	157	48	63	2.18
2647101.500	1812119.625	H1410	23	1.4	4.2	0.7	7.9	0.32	494.0	158	48	59	2.01
1113387.500	2330015.000	I1111	27	1.0	23.2	0.6	7.3	0.32	189.0	156	64	42	3.71
1223389.875	2284290.750	I1112	32	0.1	11.4	0.3	8.7	0.32	105.0	157	61	46	7.26
1200280.250	2324595.000	I1112	13	1.2	39.1	0.9	7.5	0.32	111.0	157	60	47	7.02
1228527.125	2279853.500	I1112	36	1.1	9.7	2.2	8.0	0.29	113.0	158	60	52	7.70
1338105.125	2298840.000	I1112	19	0.1	3.8	0.3	8.2	0.32	120.0	155	49	56	7.83
1421419.375	2255380.000	I1210	10	0.2	6.1	0.4	7.9	0.32	139.0	154	50	55	6.56
Media			2.7	9.4	1.0	7.8	0.29	613.2	159.0	48.5	65.0	65.0	2.5
Desviación Estandar			3.1	17.0	1.0	0.8	0.04	466.8	5.5	12.7	15.8	15.8	1.4
Coefficiente de Variación			117.3	180.9	95.3	10.5	15.01	76.1	3.5	26.1	24.3	24.3	54.7
Valor Máximo			13.8	260.0	9.6	10.8	0.32	3201.0	174.0	73.0	104.3	104.3	7.8
Valor Mínimo			0.1	0.0	0.0	4.5	0.15	105.0	144.0	23.0	35.6	35.6	0.4

Nota: Las coordenadas están en el sistema Cónica Conforme de Lambert

Anexo D. Valores anuales y estacionales del índice hidrotérmico local estimado, para el escenario climático de una atmósfera con concentración duplicada de CO₂, usando los pronósticos del modelo GFDL-R30

Estación	Estado	Mes	Latitud	Longitud	Altitud	T (2xCO ₂) ^m		T _{noct}	T _{dur}	Rg (2xCO ₂) ^m	Rb _m	Rb _m	Rn _m	IHT _{ec}	IHT _{adm}	
						mm	°C									
Ixcamilpa	Puebla	1	18.03	98.70	806	5.4	25.4	23.0	28.2	10.05	4.44	5.44	5.44	11.75	9.96	
		2	18.03	98.70	806	2.7	27.1	30.0	30.0	15.50	3.52	6.66	6.66	11.58	9.96	
		3	18.03	98.70	806	5.3	27.7	33.5	33.5	15.67	2.72	10.24	10.24	11.58	10.00	9.87
		4	18.03	98.70	806	16.9	32.1	29.2	34.8	17.38	1.87	11.75	11.75	11.75	11.75	9.96
		5	18.03	98.70	806	77.9	31.9	29.0	34.4	16.25	1.69	11.75	11.75	11.75	11.75	9.96
		6	18.03	98.70	806	264.6	29.8	27.4	31.8	13.36	1.54	9.96	9.96	9.96	10.00	9.96
		7	18.03	98.70	806	181.8	28.2	25.9	30.2	15.01	2.01	10.00	10.00	10.00	10.00	9.87
		8	18.03	98.70	806	162.2	28.3	26.1	30.3	14.42	2.06	9.87	9.87	9.87	10.00	9.87
		9	18.03	98.70	806	215.9	28.1	26.2	30.0	13.74	1.94	8.70	8.70	8.70	10.00	9.87
		10	18.03	98.70	806	76.0	27.4	25.3	29.6	13.36	2.79	8.26	8.26	8.26	10.00	9.87
		11	18.03	98.70	806	14.1	26.4	24.2	29.0	12.86	3.61	6.34	6.34	6.34	10.00	9.87
		12	18.03	98.70	806	1.2	26.1	23.8	28.8	12.02	4.10	5.52	5.52	5.52	10.00	9.87
Arcelia	Guerrero	1	18.28	100.27	530	25.1	28.1	30.8	10.04	3.30	6.58	6.58	6.58	10.00	9.87	
		2	18.28	100.27	530	1.8	29.6	32.3	32.3	15.39	2.49	7.62	7.62	10.00	9.87	
		3	18.28	100.27	530	0.6	32.3	35.0	35.0	16.07	1.92	11.36	11.36	10.00	9.87	
		4	18.28	100.27	530	1.5	34.4	36.9	36.9	17.82	1.34	12.46	12.46	10.00	9.87	
		5	18.28	100.27	530	41.9	34.1	36.4	36.4	17.26	1.30	12.97	12.97	10.00	9.87	
		6	18.28	100.27	530	327.6	31.6	29.3	33.5	15.02	1.28	11.64	11.64	11.64	10.00	9.87
		7	18.28	100.27	530	287.9	29.6	27.7	31.3	16.61	1.50	11.79	11.79	11.79	10.00	9.87
		8	18.28	100.27	530	315.9	29.1	27.4	30.7	15.60	1.54	11.35	11.35	11.35	10.00	9.87
		9	18.28	100.27	530	343.7	29.2	27.6	30.7	14.82	1.46	10.01	10.01	10.01	10.00	9.87
		10	18.28	100.27	530	110.6	29.3	27.6	31.1	13.61	1.80	9.45	9.45	9.45	10.00	9.87
		11	18.28	100.27	530	28.9	27.1	31.0	31.0	12.64	2.23	7.55	7.55	7.55	10.00	9.87
		12	18.28	100.27	530	12.4	28.8	26.8	31.2	11.73	2.77	6.61	6.61	6.61	10.00	9.87
Izucar de M.	Puebla	1	18.62	98.47	1285	8.2	22.1	19.8	24.8	9.98	3.60	3.60	3.60	10.00	9.87	
		2	18.62	98.47	1285	2.4	23.9	21.4	26.7	15.64	4.36	6.94	6.94	10.00	9.87	
		3	18.62	98.47	1285	3.1	26.4	29.2	29.2	15.83	4.06	10.46	10.46	10.00	9.87	
		4	18.62	98.47	1285	16.7	27.9	24.9	30.7	17.71	3.25	10.46	10.46	10.46	10.00	9.87
		5	18.62	98.47	1285	80.1	27.4	24.4	30.0	17.14	3.26	10.91	10.91	10.91	10.00	9.87
		6	18.62	98.47	1285	241.1	26.6	24.0	28.8	15.03	2.73	8.91	8.91	8.91	10.00	9.87
		7	18.62	98.47	1285	137.2	25.6	23.0	27.6	17.10	3.19	10.49	10.49	10.49	10.00	9.87
		8	18.62	98.47	1285	219.8	25.5	23.1	27.8	16.11	3.29	10.02	10.02	10.02	10.00	9.87
		9	18.62	98.47	1285	240.7	25.2	23.1	27.3	14.98	3.11	8.49	8.49	8.49	10.00	9.87
		10	18.62	98.47	1285	92.0	24.6	22.5	26.9	13.64	3.83	7.44	7.44	7.44	10.00	9.87
		11	18.62	98.47	1285	15.5	23.2	21.0	25.7	12.97	4.66	5.38	5.38	5.38	10.00	9.87
		12	18.62	98.47	1285	4.3	22.9	20.7	25.5	12.04	4.99	4.63	4.63	4.63	10.00	9.87
Coatepec	Veracruz	1	19.45	96.95	1252	84.6	18.9	17.2	20.9	8.03	3.13	3.13	3.13	10.00	9.87	
		2	19.45	96.95	1252	54.9	19.3	17.5	21.3	13.05	4.28	4.29	4.29	10.00	9.87	
		3	19.45	96.95	1252	79.8	22.7	20.3	25.1	13.75	4.34	7.03	7.03	10.00	9.87	
		4	19.45	96.95	1252	65.0	23.8	21.4	26.0	15.52	3.62	8.39	8.39	10.00	9.87	

Anexo D. Valores anuales y estacionales del índice hidrotérmico local estimado, para el escenario climático de una atmósfera con concentración duplicada de CO₂, usando los pronósticos climáticos del modelo GFDL-R30

Estación	Estado	Mes	Latitud	Longitud	Altitud	Pr (2xCO ₂) ^m	T (2xCO ₂) ^m	T _{noct}	T _{diur}	Rg (2xCO ₂) ^m	Rb _m	Rb _m	Rn _m	IHT _{ec}	IHT _{adm}	
La Huerta	Jalisco	5	19.45	96.95	1252	112.4	24.3	21.8	26.4	15.60	3.44	9.46	0.63	8.66	9.46	
		6	19.45	96.95	1252	415.5	23.9	21.6	25.8	13.56	3.00	8.66	0.63	8.66	8.66	
		7	19.45	96.95	1252	326.4	22.9	20.6	24.9	14.97	3.44	8.53	0.63	8.53	8.53	
		8	19.45	96.95	1252	327.6	23.3	21.0	25.3	13.91	3.42	8.08	0.63	8.08	8.08	
		9	19.45	96.95	1252	420.6	23.8	21.8	25.8	13.19	3.16	7.06	0.63	7.06	7.06	
		10	19.45	96.95	1252	171.3	22.2	20.5	24.1	11.53	3.72	5.81	0.63	5.81	5.81	
	México	11	19.45	96.95	1252	109.3	18.8	17.2	20.7	10.20	4.49	3.41	0.61	3.41	3.41	
		12	19.45	96.95	1252	76.1	19.9	18.2	22.0	9.61	4.76	2.93	0.61	2.93	2.93	
		1	19.47	104.63	500	22.0	25.3	23.1	27.9	9.41	3.86	4.47	0.57	4.47	4.47	
		2	19.47	104.63	500	2.4	25.3	22.7	28.2	12.34	3.78	5.14	0.57	5.14	5.14	
		3	19.47	104.63	500	0.0	26.6	23.8	29.5	13.86	3.76	7.69	0.57	7.69	7.69	
		4	19.47	104.63	500	1.0	27.1	24.0	30.0	15.81	3.41	8.83	0.57	8.83	8.83	
Chapingo	México	5	19.50	98.88	2250	8.3	29.0	26.1	31.5	15.53	2.45	10.39	0.61	10.39	10.39	
		6	19.50	98.88	2250	15.3	25.2	22.7	28.2	12.34	3.78	5.14	0.61	5.14	5.14	
		7	19.50	98.88	2250	310.1	28.0	26.5	29.5	12.93	1.57	8.43	0.61	8.43	8.43	
		8	19.47	104.63	500	86.5	27.9	26.4	29.5	11.34	1.81	7.56	0.61	7.56	7.56	
		9	19.47	104.63	500	73.5	26.2	24.5	28.1	10.37	2.61	5.41	0.61	5.41	5.41	
		10	19.47	104.63	500	18.6	26.1	24.3	28.3	10.81	3.17	4.70	1.14	4.70	4.70	
	Atzacamilco	México	1	19.50	98.88	2250	15.2	12.7	18.2	9.19	6.28	1.87	1.14	1.87	1.87	1.87
			2	19.50	98.88	2250	6.2	13.6	13.6	19.5	14.41	5.62	4.79	1.14	4.79	4.79
			3	19.50	98.88	2250	13.0	16.4	16.4	22.6	14.45	5.83	6.11	1.14	6.11	6.11
			4	19.50	98.88	2250	34.0	20.6	17.5	23.5	16.12	5.11	7.37	1.14	7.37	7.37
			5	19.50	98.88	2250	62.5	20.5	17.4	23.1	16.14	5.00	8.34	1.14	8.34	8.34
			6	19.50	98.88	2250	145.7	20.2	17.7	22.3	13.98	4.15	6.67	1.14	6.67	6.67
Atzacamilco	México	7	19.50	98.88	2250	157.7	19.1	16.7	21.1	15.21	4.41	7.76	0.98	7.76	7.76	
		8	19.50	98.88	2250	134.9	19.2	17.0	21.2	14.15	4.42	7.28	0.98	7.28	7.28	
		9	19.50	98.88	2250	121.4	19.2	17.2	21.2	14.05	4.48	6.40	0.98	6.40	6.40	
		10	19.50	98.88	2250	46.4	18.3	16.1	20.7	12.43	5.28	4.99	0.98	4.99	4.99	
		11	19.50	98.88	2250	16.9	12.5	12.5	17.4	11.30	5.80	2.95	1.47	2.95	2.95	
		12	19.50	98.88	2250	7.0	16.2	13.9	19.0	10.69	6.09	2.46	1.47	2.46	2.46	
	Atzacamilco	México	1	19.80	99.88	2526	23.9	14.9	12.5	17.8	9.33	5.98	2.28	1.47	2.28	2.28
			2	19.80	99.88	2526	4.1	15.7	12.9	18.8	13.53	5.50	3.39	1.47	3.39	3.39
			3	19.80	99.88	2526	11.1	18.4	15.3	21.5	13.14	5.65	5.22	1.47	5.22	5.22
			4	19.80	99.88	2526	30.9	19.9	16.6	23.0	14.42	5.02	6.14	1.47	6.14	6.14
			5	19.80	99.88	2526	89.3	19.8	16.5	22.6	14.22	4.83	6.92	1.47	6.92	6.92
			6	19.80	99.88	2526	186.9	19.4	16.7	21.6	12.82	4.16	6.86	1.47	6.86	6.86
Atzacamilco	México	7	19.80	99.88	2526	218.4	17.9	15.5	19.9	11.94	4.26	6.35	1.47	6.35	6.35	
		8	19.80	99.88	2526	210.2	18.2	15.8	20.3	12.50	4.38	5.96	1.47	5.96	5.96	

Anexo D. Valores anuales y estacionales del índice hidrotérmico local estimado, para el escenario climático de una atmósfera con concentración duplicada de CO₂, usando los pronósticos del modelo GFDL-R30

Estación	Estado	Mes	Latitud	Longitud	Altitud	Pr (2xCO ₂) _m	T (2xCO ₂) _m	T _{noct}	T _{diur}	Rg (2xCO ₂) _m	Rb _m	Rn _m	IHT _{ec}	IHT _{adm}	
Jericuaro	Guanajuato	9	19.80	99.88	2526	175.2	18.0	15.9	20.0	12.26	4.37	5.13	0.59		
		10	19.80	99.88	2526	171.1	14.9	19.5	11.34	5.24	4.13			0.92	
		11	19.80	99.88	2526	15.4	13.4	18.2	10.52	5.58	2.57				1.11
		12	19.80	99.88	2526	7.7	15.4	18.2	9.71	5.86	1.91				1.18
		1	20.13	100.52	1931	18.5	17.4	14.7	20.6	10.11	6.29	2.66			
		2	20.13	100.52	1931	5.0	17.9	15.0	21.2	14.36	5.63	3.81			
	Zapopan	Jalisco	3	20.13	100.52	1931	7.2	20.9	17.5	24.3	14.48	5.90	7.34		
			4	20.13	100.52	1931	8.7	22.3	18.8	25.5	16.01	5.05	8.21		
			5	20.13	100.52	1931	77.4	23.1	19.8	25.9	15.31	4.45	8.03		
			6	20.13	100.52	1931	154.6	22.8	20.1	25.0	13.43	3.53	8.06		
			7	20.13	100.52	1931	243.5	21.5	19.0	23.5	13.43	3.88	8.06		
			8	20.13	100.52	1931	230.8	21.6	19.3	23.7	13.52	3.85	7.33		
Tepatlitan		Jalisco	9	20.13	100.52	1931	187.3	21.6	19.4	23.7	12.83	3.85	6.08		
			10	20.13	100.52	1931	187.3	21.6	19.4	23.7	12.83	3.85	6.08		
			11	20.13	100.52	1931	68.3	20.5	18.2	23.0	12.13	4.95	5.08		
			12	20.13	100.52	1931	11.9	16.2	21.5	11.34	5.63	3.15			
			1	20.72	103.37	1575	14.4	18.9	23.7	10.16	5.34	3.66			
			2	20.72	103.37	1575	8.8	19.2	24.3	14.66	4.81	4.82			
Tepatlitan	Jalisco	3	20.72	103.37	1575	8.2	24.4	21.5	27.3	15.10	4.78	7.71			
		4	20.72	103.37	1575	5.7	25.6	22.3	28.6	17.61	4.37	9.27			
		5	20.72	103.37	1575	36.0	26.4	23.0	29.2	17.49	3.89	10.57			
		6	20.72	103.37	1575	226.5	26.3	23.3	28.2	14.90	2.93	9.88			
		7	20.72	103.37	1575	331.9	23.7	21.5	25.5	14.01	3.14	9.32			
		8	20.72	103.37	1575	288.9	23.8	21.8	25.6	14.71	3.14	9.02			
	Jalisco	Jalisco	9	20.72	103.37	1575	196.8	24.1	22.3	25.9	14.22	3.00	8.00		
			10	20.72	103.37	1575	63.5	23.3	21.4	25.3	12.70	3.86	6.64		
			11	20.72	103.37	1575	17.8	21.1	19.1	23.4	4.88	4.32			
			12	20.72	103.37	1575	17.5	20.8	18.9	23.1	10.60	5.04	3.43		
			1	20.80	102.73	1746	23.4	19.8	17.8	22.2	9.77	5.28	3.37		
			2	20.80	102.73	1746	5.8	20.3	18.0	22.9	14.36	4.88	4.55		
Jalisco	Jalisco	3	20.80	102.73	1746	1.2	23.3	20.5	26.1	14.82	4.93	7.32			
		4	20.80	102.73	1746	4.2	24.7	21.6	27.6	16.82	4.29	8.73			
		5	20.80	102.73	1746	35.8	25.5	22.2	28.3	16.33	3.91	9.59			
		6	20.80	102.73	1746	209.0	25.8	23.5	27.7	14.73	2.58	10.09			
		7	20.80	102.73	1746	361.8	23.6	21.9	25.0	13.56	2.66	9.39			
		8	20.80	102.73	1746	271.1	23.7	22.0	25.2	14.46	2.84	9.11			
	Jalisco	Jalisco	9	20.80	102.73	1746	221.0	23.9	22.3	25.5	13.88	2.82	7.92		
			10	20.80	102.73	1746	32.6	23.0	21.2	25.0	12.52	3.82	6.53		
			11	20.80	102.73	1746	14.8	20.9	19.0	23.1	10.95	4.59	3.88		
			12	20.80	102.73	1746	4.1	20.4	18.7	22.6	10.29	4.88	3.35		
			1	20.80	102.73	1746	14.8	20.9	19.0	23.1	10.95	4.59	3.88		
			2	20.80	102.73	1746	5.8	20.3	18.0	22.9	14.36	4.88	4.55		

Anexo D. Valores anuales y estacionales del índice hidrotérmico local estimado, para el escenario climático de una atmósfera con concentración duplicada de CO₂, usando los pronósticos climáticos del modelo GFDL-R30

Estación	Estado	Mes	Latitud	Longitud	Altitud	mm			°C			Rg (2xCO ₂) _m	Rb _m	Rn _m	IHT _{ec}	IHT _{adm}	
						Pr (2xCO ₂) _m	T (2xCO ₂) _m	T _{noct}	T _{diur}	Rg (2xCO ₂) _m	Rb _m						kcal cm ⁻² mes ⁻¹
Magdalena	Jalisco	1	20.92	103.97	1359	16.6	20.9	18.5	23.8	10.43	5.71	3.52	1.50	0.63			
		2	20.92	103.97	1359	5.3	21.7	18.9	24.9	14.73	5.21	5.43					
		3	20.92	103.97	1359	8.6	24.2	20.9	27.6	15.20	5.37	7.19					
		4	20.92	103.97	1359	8.9	25.1	28.5	28.5	17.58	4.89	8.72					
		5	20.92	103.97	1359	32.1	26.5	29.6	29.6	17.91	4.23	10.58					
		6	20.92	103.97	1359	243.0	26.7	24.0	28.9	17.17	2.80	10.50					
		7	20.92	103.97	1359	386.7	24.7	22.5	26.5	15.05	2.96	9.09					
		8	20.92	103.97	1359	309.5	25.0	23.0	26.8	14.30	2.96	8.86					
		9	20.92	103.97	1359	189.5	25.2	23.4	27.0	15.22	2.87	8.92					
		10	20.92	103.97	1359	54.1	24.3	22.3	26.5	13.49	3.84	7.31					
		11	20.92	103.97	1359	15.0	22.1	19.9	24.8	12.23	5.07	4.40					
		12	20.92	103.97	1359	14.4	21.2	19.1	23.8	10.76	5.31	3.29					
Tuxpan de R. C. Veracruz		1	20.95	97.40	2	22.8	21.9	23.9	7.18	2.71	4.36	1.11	0.63				
		2	20.95	97.40	2	23.8	22.7	25.1	11.89	2.34	5.47						
		3	20.95	97.40	2	32.2	27.6	26.3	28.9	12.31	1.59						8.59
		4	20.95	97.40	2	40.2	29.7	28.2	31.1	14.64	1.21						10.12
		5	20.95	97.40	2	123.6	31.1	29.6	32.4	14.69	1.10						11.04
		6	20.95	97.40	2	272.0	31.3	29.7	32.6	15.13	1.05						10.66
		7	20.95	97.40	2	220.9	30.9	29.4	32.2	13.45	1.08						10.88
		8	20.95	97.40	2	257.0	31.2	29.7	32.5	14.38	1.12						10.77
		9	20.95	97.40	2	377.4	31.0	29.6	32.4	14.89	1.10						9.38
		10	20.95	97.40	2	185.9	29.2	28.0	30.6	12.83	1.37						8.27
		11	20.95	97.40	2	126.2	26.3	25.3	27.5	9.56	1.78						5.62
		12	20.95	97.40	2	70.6	24.3	23.4	25.5	8.62	2.35						4.55
San Felipe	Guanajuato	1	21.47	101.20	2102	15.2	14.9	12.7	17.6	8.74	2.44	1.83	1.03				
		2	21.47	101.20	2102	5.0	15.8	13.4	18.5	13.79	5.48						3.58
		3	21.47	101.20	2102	3.4	16.9	16.9	22.7	14.30	5.69						6.14
		4	21.47	101.20	2102	7.7	18.3	18.3	24.4	16.38	5.07						7.62
		5	21.47	101.20	2102	44.9	22.0	18.7	24.8	15.87	4.75						8.37
		6	21.47	101.20	2102	86.5	21.4	18.7	23.6	14.27	4.03						8.25
		7	21.47	101.20	2102	170.2	20.2	17.7	22.2	15.19	4.18						7.97
		8	21.47	101.20	2102	119.5	20.4	18.1	22.4	14.27	4.22						7.58
		9	21.47	101.20	2102	111.3	20.2	18.1	22.3	13.89	4.33						6.42
		10	21.47	101.20	2102	31.1	18.5	16.4	20.8	12.24	5.27						4.84
		11	21.47	101.20	2102	12.6	15.1	12.9	17.7	11.13	5.87						2.75
		12	21.47	101.20	2102	14.7	15.7	13.7	18.2	10.22	5.98						2.20
Sombrete	Zacatecas	1	23.63	103.63	2351	14.6	14.9	12.9	17.4	9.85	5.97	1.83	1.03				
		2	23.63	103.63	2351	10.8	16.3	14.0	18.9	13.29	5.41						3.32
		3	23.63	103.63	2351	8.8	20.0	17.3	22.8	15.16	5.46						5.93
		4	23.63	103.63	2351	5.7	22.2	19.2	24.9	16.07	4.71						7.73

Anexo D. Valores anuales y estacionales del índice hidrotérmico local estimado, para el escenario climático de una atmósfera con concentración duplicada de CO₂, usando los pronósticos climáticos del modelo GFDL-R30

Estación	Estado	Mes	Latitud	Longitud	Altitud	Pr (2xCO ₂) ^m	T (2xCO ₂) ^m	T _{noct}	T _{diur}	Rg (2xCO ₂) ^m	Rb _m	Rn _m	IHT _{ec}	IHT _{adm}	
Navoja	Sonora	5	23.63	103.63	2351	25.2	20.9	26.8	14.74	4.18	9.35	0.89	1.51	1.79	
		6	23.63	103.63	2351	79.7	24.0	21.1	26.3	17.43	3.45				8.82
		7	23.63	103.63	2351	164.1	22.5	20.0	24.5	15.15	3.58				8.54
		8	23.63	103.63	2351	228.0	21.5	19.3	23.4	12.61	3.83				7.75
		9	23.63	103.63	2351	123.1	21.4	19.5	23.3	13.55	3.83				6.66
		10	23.63	103.63	2351	60.4	19.9	18.0	22.0	11.71	4.82				4.87
		11	23.63	103.63	2351	19.0	17.9	15.9	20.4	10.70	5.54				2.74
		12	23.63	103.63	2351	23.8	15.1	13.3	17.4	9.23	5.81				1.57
		1	27.08	109.43	54	11.9	24.3	22.5	26.6	8.33	4.01				3.37
		2	27.08	109.43	54	8.1	25.3	23.2	27.8	12.18	3.45				4.55
		3	27.08	109.43	54	3.4	27.9	25.4	30.4	12.72	2.93				7.59
		4	27.08	109.43	54	0.3	28.8	25.7	31.6	16.18	2.85				9.68
5	27.08	109.43	54	0.5	31.9	28.6	34.5	16.86	1.83	12.11					
6	27.08	109.43	54	11.4	36.5	33.8	38.6	17.23	1.61	11.73					
7	27.08	109.43	54	88.3	37.0	34.8	38.7	14.58	2.43	9.23					
8	27.08	109.43	54	210.1	35.7	33.7	37.4	11.83	1.65	9.22					
9	27.08	109.43	54	92.4	35.6	33.7	37.4	12.84	1.55	8.39					
10	27.08	109.43	54	31.3	32.8	30.8	35.1	11.40	1.41	8.01					
11	27.08	109.43	54	12.2	28.0	26.1	30.4	9.87	2.82	4.82					
12	27.08	109.43	54	11.0	24.5	22.7	26.9	8.65	4.05	2.87					
El Rosario	B.C.N	5	30.03	115.72	15	2.6	20.8	18.5	22.6	14.37	3.83	8.04	1.01	3.17	
		6	30.03	115.72	15	0.1	24.1	21.7	25.8	17.29	3.01	10.38			
		7	30.03	115.72	15	3.0	25.6	23.2	27.4	16.48	2.70	10.48			
		8	30.03	115.72	15	13.3	26.5	24.2	28.4	15.59	2.62	10.27			
		9	30.03	115.72	15	28.9	26.3	24.2	28.4	13.33	2.74	7.58			
		10	30.03	115.72	15	6.0	23.9	22.1	26.0	10.48	3.72	4.95			
		11	30.03	115.72	15	11.6	20.6	18.9	22.8	9.20	4.87	2.25			
		12	30.03	115.72	15	34.6	19.0	17.5	21.1	7.68	5.25	0.90			
		1	30.03	115.72	15	42.8	18.9	17.0	20.9	7.12	5.27	1.04			
		2	30.03	115.72	15	34.3	18.9	17.0	21.2	9.58	4.62	2.30			
		3	30.03	115.72	15	40.6	20.6	18.5	22.8	11.51	4.55	4.96			
		4	30.03	115.72	15	8.2	19.7	17.4	21.7	15.03	4.54	7.09			
5	30.03	115.72	15	2.6	20.8	18.5	22.6	14.37	3.83	8.04					

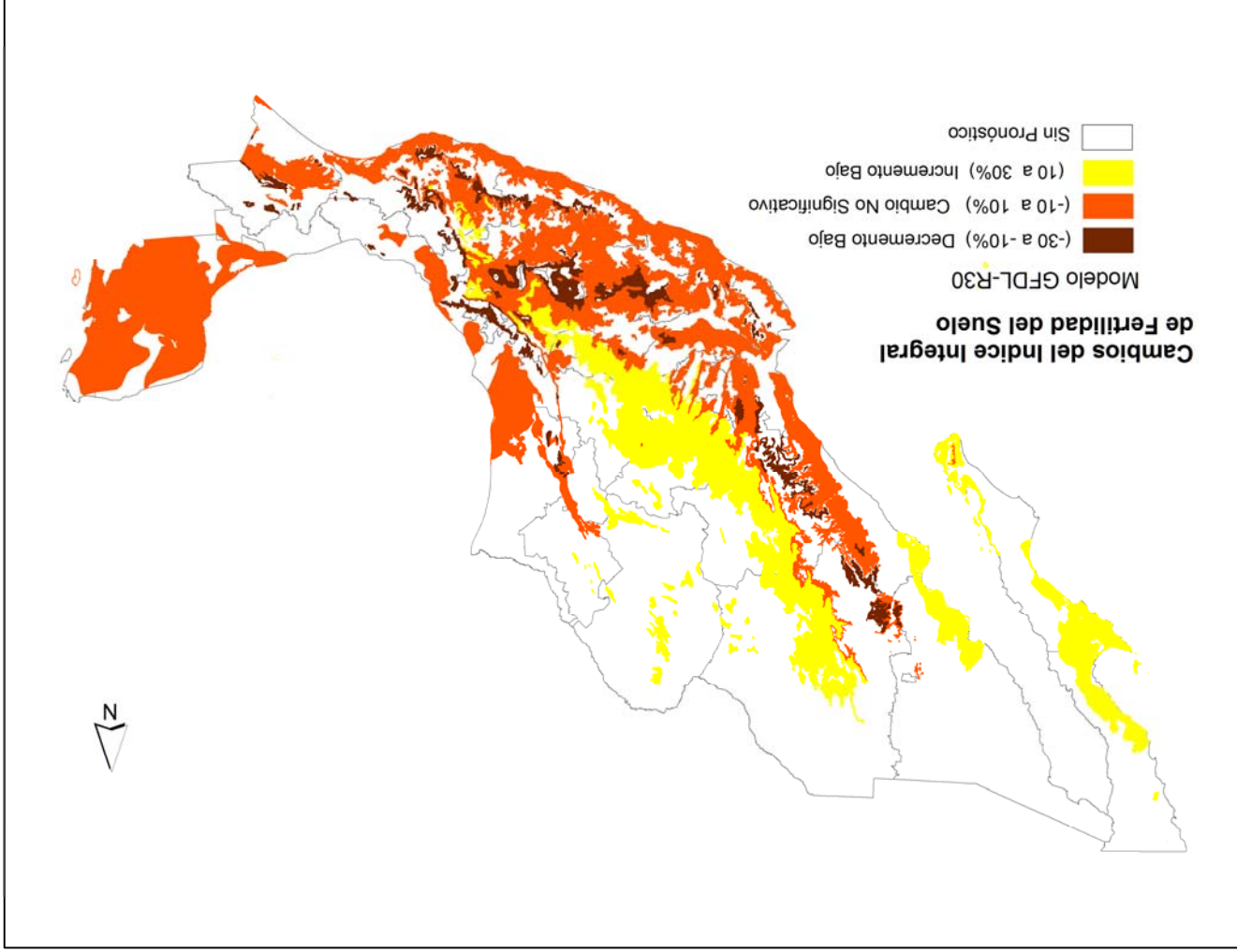
Notas: Pr -Precipitación; T -Temperatura; Rg -Radiación global; Rb -Radiación de onda larga; Rn -Radiación neta; IHT -Índice hidrotérmico local.

Pr (1xCO₂) -Precipitación bajo el escenario climático actual; Pr (2xCO₂) -Precipitación bajo un escenario de duplicación de la concentración de CO₂

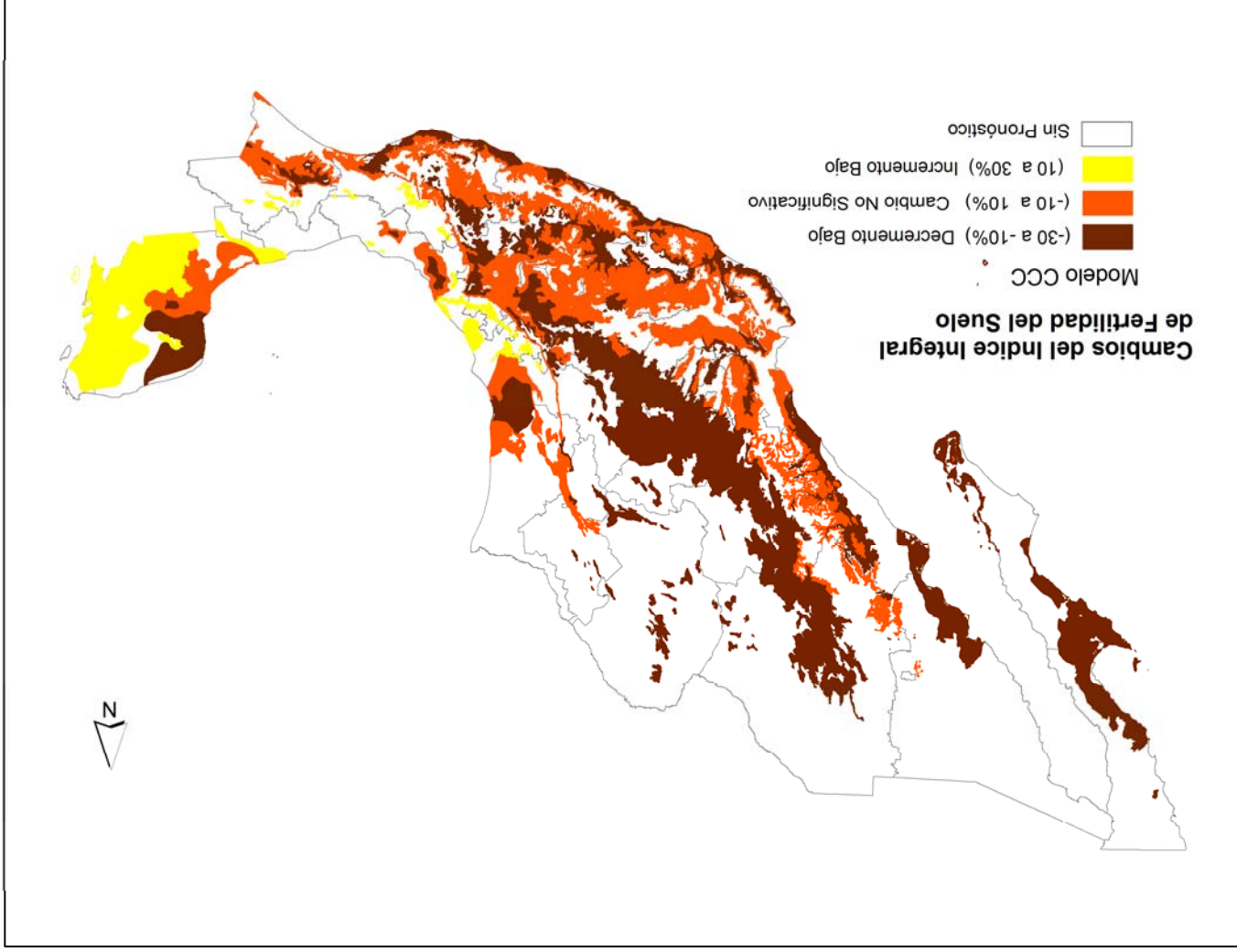
Los subíndices _m y _{ec} indican el valor de la variable a nivel mensual y durante la estación de crecimiento, respectivamente

Los subíndices _{noct} y _{diur} indican el valor de la variable temperatura en el periodo nocturno y diurno, respectivamente.

Anexo E1. Mapa de cambios del índice integral de fertilidad de los suelos agrícolas (ΔF) debidos al cambio climático global al final del siglo XXI con el modelo climático GFDL-R30



Anexo E2. Mapa de cambios del índice integral de fertilidad de los suelos agrícolas (ΔF) debidos al cambio climático global al final del siglo XXI con el modelo climático CCC



Anexo F. Requerimientos agroecológicos de los cultivos de maíz y trigo

Requerimientos agroecológicos del cultivo de maíz

Variable	Intervalo óptimo		Valores absolutos	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Latitud	0.0	40.0	0.0	48.0
Altitud			0.0	4000.0
Temperatura (°C)	18.0	33.0	10.0	47.0
Precipitación anual (mm)	600.0	1200.0	400.0	1800.0
Intensidad de luz	Muy brillante	Muy brillante	Cielos claros	Muy brillante
Climas donde se cultiva	Tropical húmedo y seco (Aw), Semiáridos (Bs), Subtropical húmedo (Cf), Subtropical con verano seco (Cs), Subtropical con invierno seco (Cw), y otros.			
	Suelo			
Profundidad del suelo	Medio (50-150 cm)	7.0	Poco profundos (20-50 cm)	8.5
pH	5.0		4.5	
Textura del suelo	Media (con materia orgánica)			
Fertilidad del suelo	Alta			
Drenaje del suelo	Bueno (días secos)			
Salinidad del suelo	baja (<4 dS m ⁻¹)			
	Media (<4 dS m ⁻¹)			

Fuente: FAO (2005), Ecocrop. Base de datos sobre requerimientos ambientales de cultivos. <http://ecocrop.fao.org>

Requerimientos agroecológicos del cultivo de trigo

Variable	Intervalo óptimo		Valores absolutos	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Latitud	30.0	60.0	0.0	4500.0
Altitud				
Temperatura (°C)	15.0	23.0	5.0	27.0
Precipitación anual (mm)	750.0	900.0	250.0	1750.0
Intensidad de luz	Muy brillante	Muy brillante	Cielos nubosos	Muy brillante
Climas donde se cultiva	Tropical húmedo y seco (Aw), Árido (Bw), Semiárido (Bs)			
	Suelo			
Profundidad del suelo	Media (50-150 cm)	7.0	Poco profundos (20-50 cm)	8.5
pH	6.0		5.5	
Textura del suelo	Media (con materia orgánica)			
Fertilidad del suelo	Alta			
Drenaje del suelo	Bueno (periodos secos)			
Salinidad del suelo	Baja (<4 dS m ⁻¹)			
	Media (4-10 dS m ⁻¹)			

Fuente: FAO (2005), Ecocrop. Base de datos sobre requerimientos ambientales de cultivos. <http://ecocrop.fao.org>

Anexo G. Información relativa al cultivo de maíz de temporal en los sitios de referencia, y efecto de temporal en la concentración de CO₂ en la atmósfera al final del siglo XXI sobre la productividad final, para el escenario de duplicación de la concentración de CO₂ en la atmósfera al final del siglo XXI

Sitio	Estado	Lat	Long	Alt	Clima	D Z	Modelo	Datos del cultivo				Y _{max}	Y _{max} (K _{hidr})	Y _{max} (F)	Y	ΔY _{max}	ΔY _{max} (K _{hidr})	ΔY _{max} (F)	ΔY		
								n	FS	IAF	IC										
Coatepec	Veracruz	19.45	-96.95	1252	(A)Cb(tm)(t)gw"	12	GFDL-R30	150	mar-abr	2.5	0.20	4883	4883	1807	1807	15.57	15.57	17.37	36.48	-0.55	36.48
							1xC0 ₂					4225	4225	1817	1817						
							CCC					4959	4959	2480	2480	17.37	17.37				
Tuxpan de R. Veracruz		20.95	-97.40	2	Aw2(e)gw"	14	GFDL-R30	135	jun	2.5	0.25	3895	3895	2220	2220	0.62	0.62	-0.26	15.83	-7.49	15.83
							1xC0 ₂					3871	3871	2400	2400						
							CCC					3861	3861	2780	2780	-0.26	-0.26				
Jericuaro	Guanajuato	20.13	-100.52	1931	Cb(w1)(w)(t)g	11	GFDL-R30	120	jun	2.5	0.25	3689	3689	2472	2472	5.98	5.98	8.53	15.87	-4.05	15.87
							1xC0 ₂					3481	3481	2576	2576						
							CCC					2990	2990	2153	2153	6.52	6.52	-1.34	14.47	-8.99	14.47
Atzacmulco	México	19.80	-99.88	2524	Cb(w2)(w)(t)g	11	GFDL-R30	150	mayo	2.0	0.20	2951	2951	1712	1712	5.13	5.13	5.13	8.99	-8.99	8.99
							1xC0 ₂					2807	2807	1881	1881						
							CCC					2951	2951	1712	1712	5.13	5.13	5.13	8.99	-8.99	8.99
La Huerta	Jalisco	19.47	-104.63	500	Aw1(w)(t)	10	GFDL-R30	150	jun	2.5	0.25	4024	4024	2736	2736	-2.21	-2.21	-1.34	-10.14	-10.14	0.00
							1xC0 ₂					4115	4115	3045	3045						
							CCC					4060	4060	3045	3045	-1.34	-1.34				
Magdalena	Jalisco	20.92	-103.97	1359	(A)Ca(w1)(w)(t)g	9	GFDL-R30	130	jun-jul	2.5	0.25	4472	4472	3086	3086	5.00	5.00	3.73	5.10	-4.67	5.10
							1xC0 ₂					4259	4259	3237	3237						
							CCC					4418	4418	3402	3402	3.73	3.73				
Zapopan	Jalisco	20.72	-103.37	1575	(A)Ca(w1)(w)(e)g	11	GFDL-R30	135	jun-jul	2.5	0.25	4404	4404	3127	3127	8.82	8.82	8.82	1.66	1.66	10.72
							1xC0 ₂					4047	4047	3076	3076						
							CCC					4481	4481	3406	3406	10.72	10.72				
Arcella	Guerrero	18.28	-100.27	530	Aw0(w)(t)gw"	13	GFDL-R30	135	jun	2.5	0.25	4883	4883	3711	3711	15.57	15.57	5.74	14.07	-13.11	14.07
							1xC0 ₂					4225	4225	3253	3253						
							CCC					4959	4959	2827	2827	17.37	17.37				
Chapingo	México	19.50	-98.88	2250	Cb(w0)(w)(t)g	12	GFDL-R30	150	mayo	2.0	0.20	3208	3208	2502	2502	4.16	4.16	6.04	36.53	-29.87	36.53
							1xC0 ₂					3080	2545	1833	1833						
							CCC					3266	2107	1992	1285	6.04	6.04				
Izucar de M. Puebla		18.62	-98.47	1285	Aw0(w)(t)gw"	13	GFDL-R30	130	may-jul	2.5	0.25	4642	4642	3714	3714	4.24	4.24	14.67	29.20	-17.46	29.20
							1xC0 ₂					4453	4048	3162	2874						
							CCC					4739	3159	2606	1738	6.42	6.42				
Ixcamilpa	Puebla	18.03	-98.70	806	Aw0(w)(t)g	13	GFDL-R30	130	may	2.5	0.25	4016	4016	2972	2972	-0.50	-0.50	11.44	33.01	-18.76	33.01
							1xC0 ₂					4036	3604	2502	2234						
							CCC					4109	2617	2013	1282	1.81	1.81				
Navoja	Sonora	27.08	-109.43	54	BW(h)(w(e)'	4	GFDL-R30	120	jun	2.5	0.25	3180	1777	1304	728	-0.84	-0.84	41.26	70.34	-19.57	70.34
							1xC0 ₂					3207	1258	1090	428						
							CCC					3089	1385	834	374	-3.68	-3.68	10.14	-12.53	-23.51	-12.53

Anexo G. Información relativa al cultivo de maíz de temporal en los sitios de referencia, y efecto de los componentes de la productividad sobre la productividad final, para el escenario de duplicación de CO_2 en la atmósfera al final del siglo XXI

Sitio	Estado	Lat	Long	Alt	Clima	D Z	Modelo	$\frac{n}{FS}$	$\frac{IC}{IAF}$	$\frac{IC}{IAF}$	Y_{max}	$Y_{max}^{(K_{hidr})}$	$Y_{max}^{(F)}$	ΔY	ΔY_{max}	$\Delta Y_{max}^{(K_{hidr})}$	$\Delta Y_{max}^{(F)}$	ΔY
-------	--------	-----	------	-----	-------	--------	--------	----------------	------------------	------------------	-----------	------------------------	-----------------	------------	------------------	-------------------------------	------------------------	------------

Nota 1: ZD -Zona de Douglas; n -Días de siembra a madurez fisiológica; FS -Fecha de siembra en la zona; IAF -Índice de Área foliar; IC - Índice de Cosecha

$\Delta Y_{max}^{(F)}$ - Cambio en el rendimiento potencial o máximo; $\Delta Y_{max}^{(K_{hidr})}$ -Cambio porcentual en el rendimiento considerando las componentes de rendimientos máximos y humedad del suelo; $\Delta Y_{max}^{(F)}$ -Cambio porcentual en los rendimientos considerando las componentes de rendimientos máximos y fertilidad del suelo; ΔY - Cambio en el rendimiento

Nota 2: Los datos de P_m , IAF e IC se obtuvieron del Anexo 7 de la publicación: FAO-IIASA (2000).
 Los datos de n y FS se obtuvieron de las publicaciones: SARH (Dirección General de Producción y Extensión Agrícola). 1978-1980. Agenda Técnica Agrícola (por Estados).

Fuente: FAO-IIASA. 2000. Global agroecological zones. Methodology and results of the Global Agro-Ecological Zones Model. CD-ROM. Versión 1.0.
 Appendix VII. Parameters for biomass and yield calculations). www.fao.org

Anexo H. Información relativa al cultivo de trigo de temporal en los sitios de referencia, y efecto de los componentes de la productividad sobre la productividad final, para el escenario de duplicación de la concentración de CO₂ en la atmósfera al final del siglo XXI

Sitio	Estado	Lat	Long	Alt	Clima	ZD	Datos del cultivo												
							Modelo	n	FS	IAF	IC	Y _{max}	Y _{max} (K _{hidr})	Y _{max} (F)	Y	ΔY _{max}	ΔY _{max} (K _{hidr})	ΔY _{max} (F)	ΔY
Apizaco	Tlaxcala	19.40	-98.13	2408	Cb(w2)(w)(t)g	GFDL-R30	115	may/jun	2.0	0.27	2572	1440	1440	25.65	25.65	27.31	36.95	6.61	36.95
						CCC				0.27	2606	1850	1850						
						1xCO ₂				0.25	2578	1934	1934						
Tepeatlán	Jalisco	20.80	-102.73	1746	(A)Ca(w1)(w)(e)g	GFDL-R30	135	jun/jul	2.5	0.27	2922	2045	2045	13.34	13.34	14.78	5.79	14.78	
						CCC				0.27	2999	2219	2219						
						1xCO ₂				0.25	2970	2087	1606	1544					
Sombrerete	Zacatecas	23.63	-103.63	2351	Cb(wo)(e)	GFDL-R30	120	jun	2.0	0.27	2599	2027	2027	19.77	19.77	24.56	31.29	26.24	
						CCC				0.27	2627	2021	1734	1334	21.06	-3.15	7.97	-13.62	
						1xCO ₂				0.25	2226	1810	1313	1068					
San Felipe	Guanajuato	21.47	-101.20	2102	BS1k(w)(e)g	GFDL-R30	120	jun	2.0	0.27	2693	2615	1831	1778	20.98	44.47	39.43	66.51	
						CCC				0.27	2808	1623	1320	763	26.15	-10.31	0.49	-28.55	
						1xCO ₂				0.25	2214	1064	974	468					
Charcas	S.L.P.	23.13	-101.12	2057	BS1k(w)(e)g ^w	GFDL-R30	120	may/jun	2.0	0.27	2634	1488	1317	744	18.97	39.81	35.19	58.87	
						CCC				0.27	2715	1021	1005	378	22.63	-4.11	3.12	-19.37	
						1xCO ₂				0.25	1477	1477	458	458					
El Rosarito	B.C.N.	30.03	-115.72	15	BShs(e)	GFDL-R30	95	nov/dic	2.5	0.27	1861	1843	484	479	26.00	24.75	5.68	4.63	
						CCC				0.27	1871	1717	468	429	26.68	16.22	2.16	-6.28	
						1xCO ₂				0.25	1477	1477	458	458					

Nota 1: ZD -Zona de Douglas; n -Días de siembra a madurez fisiológica; FS -Fecha de siembra en la zona; IAF -Índice de Área foliar; IC - Índice de Cosecha
 ΔY_{max}: - Cambio en el rendimiento potencial o máximo; ΔY_{max}(K_{hidr}) -Cambio porcentual en el rendimiento considerando las componentes de rendimientos máximos y humedad del suelo
 ΔY_{max}(F): -Cambio porcentual en los rendimientos considerando las componentes de rendimientos máximos y fertilidad del suelo; ΔY: - Cambio en el rendimiento
 Nota 2: Los datos de n y FS se obtuvieron de las publicaciones: SARH (Dirección General de Producción y Extensión Agrícola). 1978-1980. Agenda Técnica Agrícola (por Estados).
 Los datos de P_{mm}, IAF e IC se obtuvieron del Anexo 7 de la publicación: FAO-IIASA (2000).

Fuente: FAO-IIASA, 2000. Global agroecological zones. Methodology and results of the Global Agro-Ecological Zones Model. CD-ROM, Versión 1.0.
 Appendix VII. Parameters for biomass and yield calculations). www.fao.org

Anexo I. Valores de temperaturas y precipitación medias mensuales en la estación Jesús María, en los Altos

de Jalisco, para los escenarios actual y futuro con los modelos climáticos GFDL-R30 y CCC

Estación: Jesús María, Jalisco

Latitud: 20° 37'

Longitud: 102° 13'

Altitud: 2110 m

MES	Escenario Actual			Cambios Esperados			Escenario Futuro (2 X CO ₂)		
	T (°C)	Pr (mm)	ΔT (°C)	T (°C)	Pr (mm)	ΔT (°C)	T (°C)	Pr (mm)	ΔT (°C)
				CCC	GFDL-R30	CCC	GFDL-R30	CCC	

Enero	13.6	17.8	3.6	1.3	17.2	0.7	17.2	23.1	15.3	12.5
Febrero	14.6	6.3	3.3	0.9	17.9	1.0	17.9	5.7	16.5	6.3
Marzo	17.0	2.9	3.7	1.3	20.7	0.7	20.7	3.8	19.0	2.0
Abril	19.1	14.9	3.1	1.1	22.2	1.1	22.2	16.4	21.4	16.4
Mayo	20.3	38.4	2.5	1.3	22.8	1.3	22.8	49.9	22.5	49.9
Junio	19.3	167.7	2.6	1.3	21.9	0.9	21.9	218.0	21.2	150.9
Julio	17.8	238.8	2.2	1.3	20.0	0.7	20.0	310.4	19.9	167.2
Agosto	17.7	204.3	2.4	1.3	20.1	1.0	20.1	265.6	20.0	204.3
Septiembre	17.5	141.1	2.6	1.3	20.1	0.8	20.1	183.4	19.8	112.9
Octubre	16.8	59.6	2.7	1.0	19.5	1.3	19.5	59.6	19.3	77.5
Noviembre	15.6	15.6	2.7	1.2	18.3	0.8	18.3	18.7	17.8	12.5
Diciembre	13.8	9.4	3.8	1.0	17.6	1.0	17.6	9.4	15.6	9.4
Media/Total	16.9	916.8			19.9		19.9	1164.1	19.0	821.7

Nota: T, Pr - Temperatura media y Precipitación total normal mensual, respectivamente

ΔT - Es el incremento en la precipitación; T₂₁₀₀ = T₂₀₀₀ + ΔT

δ Pr - Es la razón de cambio de la precipitación; (Pr₂₁₀₀) = Pr₂₀₀₀ (δ Pr)