



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS**

**VULNERABILIDAD DEL CULTIVO DE CAFÉ AL  
CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL EN EL ESTADO DE  
VERACRUZ, MÉXICO**

**MARÍA DEL RAYO RIVERA SILVA**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO**

**2013**

La presente tesis titulada: **Vulnerabilidad del Cultivo de Café al Cambio Climático Global en el Estado de Veracruz, México** realizada por la alumna: **María del Rayo Rivera Silva**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

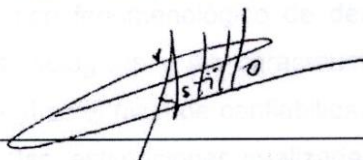
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



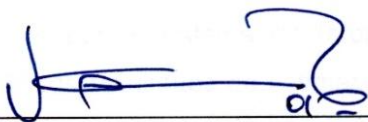
DR. IOURII NIKOLSKII GAVRILOV

ASESOR



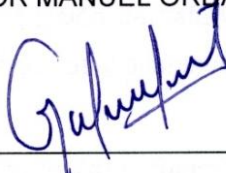
DR. MARCIAL CASTILLO ÁLVAREZ

ASESOR



DR. VICTOR MANUEL ORDAZ CHAPARRO

ASESOR



DR. GABRIEL DÍAZ PADILLA

Montecillo, Texcoco, Edo. de México, Abril de 2013

# VULNERABILIDAD DEL CULTIVO DE CAFÉ AL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL EN EL ESTADO DE VERACRUZ, MÉXICO

## RESUMEN

El cambio climático global que se espera durante el siglo XXI inevitablemente afectará la productividad de los terrenos agrícolas. Entre los problemas de mayor importancia en México relacionados con el cambio climático resalta la vulnerabilidad de la productividad del cultivo de café, siendo el estado de Veracruz uno de los productores más importantes. La variabilidad del clima es el principal factor responsable de las oscilaciones anuales de la producción de café. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la vulnerabilidad de la producción del cultivo de café variedad *C. Arabica* en la zona centro del estado de Veracruz atribuible a los escenarios climáticos existentes en función de los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero a mediados del siglo XXI, utilizando un modelo teórico fenomenológico de desarrollo del cultivo en función de sus características biológicas y las características climáticas (FAO-IIASA, 2000); así mismo, se verificó el nivel de confiabilidad del modelo aplicado. Finalmente se concluyó que las estimaciones realizadas por el modelo son confiables. El coeficiente de correlación entre los rendimientos de grano de café calculados y los reportados por el sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera fue igual a 0.96. Los resultados de estimación de la vulnerabilidad del cultivo de café al cambio climático señalan que a mediados del siglo XXI existe el riesgo de la pérdida media de la producción de café variedad *C. Arabica* de 7 a 10% debido al aumento de las temperaturas y disminución de la precipitación.

**Palabras claves:** *Café C. Arabica, Producción, Vulnerabilidad, Cambio Climático.*

# VULNERABILITY OF COFFEE GROWING TO THE GLOBAL CLIMATE CHANGE IN THE STATE OF VERACRUZ, MEXICO

## ABSTRACT

The global climate change expecting during the XXI century will inevitably affect the productivity of agricultural lands. Among the most important problems in Mexico related to the climate change, the vulnerability of the coffee plantations productivity is standing out, especially in the Veracruz state as one of the largest coffee producers. Climate variability is the main factor responsible for the annual oscillations of coffee production. Therefore, this study aimed as objective to assess the vulnerability of *C. Arabica* coffee production in the central part of Veracruz state in relation with the existing climate scenarios based on emission scenarios of greenhouse gases for the middle of the century, using a theoretical phenomenological model of crop growth which considers specific biological plant characteristics and climatic data (FAO-IIASA, 2000). The level of reliability of the applied model was verifies as well. Finally it was concluded that the estimations realized with the model were reliable. The correlation coefficient between the calculated coffee bean yields and the reported ones by the Agrifood and Fisheries Information System was equal to 0.96. The results of the coffee plants vulnerability to the climate change show that there is a risk of the *C. Arabica* coffee production loss at the mid-century from 7 to 10% due to the temperature growth and less precipitation.

**Keywords:** *C. Arabica Coffee, Production, Vulnerability, Climate Change.*

AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y  
TECNOLOGÍA (CONACyT)

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

AL CONSEJO MEXIQUENSE DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA (COMECyT)

Por el apoyo recibido para la terminación  
del presente trabajo a través de la beca  
otorgada

AL DR. IOURII NIKOLSKI GAVRILOV

Por todo el tiempo que dedicó para dirigir esta tesis.  
Gracias por su paciencia, orientación y  
buenas sugerencias

AL DR. MARCIAL CASTILLO ÁLVAREZ

Por ser guía en todo momento de este trabajo de tesis.  
Por su tiempo, sus valiosas observaciones, sugerencias,  
contribuciones y disposición en la elaboración  
del trabajo de investigación.

AL DR. VICTOR MANUEL ORDAZ CHAPARRO

Por las observaciones y contribuciones que  
hicieron posible el presente trabajo

AL DR. GABRIEL DÍAZ PADILLA

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

AL MC. ROSALÍO LÓPEZ MORGADO

Por su disposición y apoyo para obtener información  
indispensable para este trabajo de tesis

A LOS LIC. EN ESTADÍSTICA: COLUMBA FALFAN CASTILLO  
Y RAFAEL A. GUAJARDO PANES

Por todo el apoyo incondicional brindado, por estar siempre  
dispuestos a ayudarme en la elaboración del  
presente trabajo

A LA MAESTRA OKTIABRINA BACKLAEVA EGOROVA

Por su calidad humana y estar siempre  
dispuesta a ayudarme

A **Dios**, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos

A mi padre **Román Rivera M. (†)** y hermano **Omar de Jesús Rivera S. (†)**  
Que en todo momento y circunstancias están presentes

A mi madre **María del Rayo Silva Vargas**  
Por haberme apoyado en todo momento, por los consejos que día a día me das, tus valores, por la motivación constante y tu amor incondicional de madre

A mi hijo **Emiliano Sánchez Rivera**  
Por llenar mi vida de amor y alegría, con quien Dios me ha dado la oportunidad de vivir cada día... Gracias por ser mi inspiración y fortaleza

A mis hermanos **Josué, Mariela y Daniela Rivera S.**  
Por todo el apoyo que me han brindaron cuando más lo he necesitado. Gracias por compartir mis alegrías y tristezas

A mis sobrinos **Mariana, Omar y Miguel**  
Por la alegría que brindan a mi vida

A la **Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación, A.C.** en especial al Dr. **Enrique Mejía Saenz** y la M.C. **Ana Laura Santos Hernández**, quienes me dieron la oportunidad, el apoyo y el tiempo necesario para terminar mi formación profesional. A todos mis compañeros de trabajo que contribuyeron a la realización de esta tesis

Al Ing. **Bartolomé Espinosa Espinosa**  
Por todo el apoyo incondicional brindado en mi vida, por tus sabios consejos, tu buen criterio y tu capacidad de esfuerzo

Gracias a todos, a quienes les he robado minutos de compañía.  
Nombrar a todos sería muy extenso y podría cometer algún olvido injusto.  
Por ello, gracias a todos...

# CONTENIDO

	Página
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS</b> .....	4
2.1. Objetivo general.....	4
2.2. Objetivos específicos.....	4
2.3. Hipótesis.....	4
<b>3. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	6
3.1. Razones del cambio climático .....	6
3.2. La vulnerabilidad en el contexto del cambio climático .....	7
3.3. Pronósticos del cambio climático en México .....	9
3.4. Generalidades del cultivo de café.....	13
3.5. Modelos para pronosticar rendimiento en función de escenarios de cambio climático y algunos resultados .....	17
<b>4. MATERIALES Y METODOLOGÍA</b> .....	21
4.1. Materiales .....	21
4.2. Metodología .....	21
4.3. Ubicación de los sitios de referencia representativos del cultivo de café.....	22
4.4. Pronóstico de rendimiento del cultivo de café .....	25
4.5. Cálculo del rendimiento potencial .....	29
4.6. Cálculo del Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas (ISNH).....	33
4.7. Necesidad Hídrica (NH) del cultivo de café .....	34

<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	37
5.1. Verificación del nivel de confiabilidad de los cálculos del rendimiento de café.....	37
5.2. Sitios de referencia seleccionados, sus condiciones naturales y de cambio.....	40
5.3. Vulnerabilidad del rendimiento potencial.....	44
5.4. Cambio en el Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas (ISNH).....	46
5.5. Evaluación de la estimación de la vulnerabilidad del cultivo de café ...	47
5.6. Mapas de cambios en la productividad del cultivo de café en la zona centro del estado de Veracruz.....	51
5.7. Medidas de mitigación del deterioro de la productividad agrícola por el cambio climático global.....	57
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	59
6.1. Conclusiones.....	59
6.2. Recomendaciones.....	60
<b>7. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA</b> .....	62
<b>8. ANEXOS</b> .....	67
ANEXO 1.....	67
ANEXO 2.....	68
ANEXO 3.....	69
ANEXO 4.....	70
ANEXO 5.....	71
ANEXO 6.....	72



## ÍNDICE DE CUADROS

Página

<b>Cuadro 1.</b> Ubicación geográfica de los municipios que integran las regiones cafetaleras seleccionadas para el pronóstico del cambio en el rendimiento del cultivo de café variedad <i>C. Arabica</i> . .....	24
<b>Cuadro 2.</b> Condiciones climáticas de los municipios que integran las regiones cafetaleras seleccionadas para el pronóstico del cambio en el rendimiento del cultivo de café variedad <i>C. Arabica</i> . .....	41
<b>Cuadro 3.</b> Cambio en las variables climáticas ( $\Delta R_g$ , $\Delta T$ y $\Delta Pr$ ) durante el ciclo de crecimiento del cultivo de café variedad <i>C. Arabica</i> , con alto nivel de insumos y en escenarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). .....	43
<b>Cuadro 4.</b> Cambios en la respuesta fisiológica ( $\Delta b_{rm}$ ) y productiva ( $\Delta Y_{m\acute{a}x}$ ) del cultivo de café variedad <i>C. Arabica</i> con alto nivel de insumos en condiciones de cambio climático. ....	45
<b>Cuadro 5.</b> Cambios en el Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas ( $\Delta ISNH$ ) del cultivo de café variedad <i>C. Arabica</i> con alto nivel de insumos en condiciones de cambio climático. ....	46
<b>Cuadro 6.</b> Estimación de cambios en las componentes del rendimiento para el cultivo de café variedad <i>C. Arabica</i> a mediados del siglo XXI para los escenarios de cambio climático A2, A1B, B1 y COM. ....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

Página

**Figura 1.** Ubicación de los sitios de referencia del estado de Veracruz. .... 23

**Figura 2.** Comparación de los rendimientos del cultivo de café calculados ( $Y_{\text{calc}} / Y_{\text{calc}}^{\text{máx}_2000}$ ) y rendimientos reales ( $Y_{\text{real}} / Y_{\text{real}}^{\text{máx}_2000}$ ) obtenidos en el registro del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) en municipios de la zona centro del estado de Veracruz que forman parte de las regiones productoras. La gráfica se escribe con la ecuación (15). ..... 38

**Figura 3.** Comparación de los rendimientos del cultivo de café calculados ( $Y_{\text{calc}} / Y_{\text{calc}}^{\text{máx}_2000}$ ) y rendimientos reales ( $Y_{\text{real}} / Y_{\text{real}}^{\text{máx}_2000}$ ) en municipios de la zona centro del estado de Veracruz. La gráfica se escribe con la ecuación (16). ..... 39

**Figura 4.** Cambios en la productividad del cultivo de café variedad *C. Arabica* en la zona centro del estado de Veracruz, utilizando el escenario climático A2. .... 53

**Figura 5.** Cambios en la productividad del cultivo de café variedad *C. Arabica* en la zona centro del estado de Veracruz, utilizando el escenario climático A1B. .... 54

**Figura 6.** Cambios en la productividad del cultivo de café variedad *C. Arabica* en la zona centro del estado de Veracruz, utilizando el escenario climático B1. .... 55

**Figura 7.** Cambios en la productividad del cultivo de café variedad *C. Arabica* en la zona centro del estado de Veracruz, utilizando el escenario climático COM. .... 56

## 1. INTRODUCCIÓN

Dentro de las actividades agrícolas con mayor importancia y arraigo en México resalta la cadena productiva del cultivo de café, considerada como una de las actividades más rentables a nivel mundial y con mayor valor comercial para la industria. México ocupa el quinto lugar como productor de café en el mundo. Este cultivo tiene una superficie total de 760,000 ha aproximadamente, distribuida en 12 estados de la República Mexicana. Los estados productores en orden de importancia son: Chiapas, Veracruz y Oaxaca, los cuales concentran el 72% de la producción de café a nivel nacional. Puebla, Guerrero, Hidalgo y San Luis Potosí el 24%, y Nayarit, Colima, Jalisco, Querétaro y Tabasco el 4% (López *et al.*, 2007).

La agricultura en el estado de Veracruz es muy importante, ya que genera el 7.9 por ciento del Producto Interno Bruto (PIB) del estado y da empleo a un 31.7% de los habitantes, siendo la producción de café un contribuyente notable a estas cifras (Gay *et al.*, 2006). Es importante mencionar que en la zona centro del estado se concentra el 90% de los productores y el 93% del total de la superficie cafetalera de esta entidad. El estado de Veracruz se convirtió en un gran productor de café desde la década de los años 50's cuando se establecieron las plantaciones de café en grandes áreas; actualmente concentrando el 72% de la producción a nivel nacional (López *et al.*, 2007).

La variabilidad del clima es el principal factor responsable de las oscilaciones anuales de la producción de café en México. Camargo (2010) menciona que las relaciones entre los parámetros climáticos y la producción de café son muy complejas, debido a que los factores ambientales afectan el crecimiento y el desarrollo del cultivo bajo diferentes formas en sus fases fenológicas. Por ejemplo, el estrés hídrico puede limitar el proceso de la fotosíntesis debido al cierre de estomas y a la reducción de otras actividades fisiológicas de la planta. También otros factores climáticos tales como las temperaturas adversas del aire pueden reducir la productividad.

Gay y Estrada (2007) mencionan que las condiciones climáticas en la mayor parte de las regiones de producción de café son cercanas a las óptimas para este cultivo, por ejemplo las temperaturas de verano e invierno: 24.8 °C y 20 °C respectivamente. Los regímenes de cambios de las temperaturas en el transcurso del año también coinciden con los óptimos fenológicos para el desarrollo del cafeto. Por tal motivo, cualquier aumento o disminución en las temperaturas implicaría una reducción en la producción esperada.

El cultivo de café en México constituye la fuente de divisas agrícolas más importante para el país, y hasta el año 2000 se colocó en el cuarto lugar mundial como productor del grano, aportando el 5% de la producción, cuyo volumen era de alrededor de 5 millones de sacos de 60 kilos. Sin embargo, a partir de entonces, su contribución a la producción mundial ha ido a la baja hasta alcanzar una participación de tan sólo un 3.32%, teniendo su aportación más baja en los últimos cinco años y ocupando en el ciclo 2006-2007 el séptimo lugar como productor a nivel mundial (Escamilla, 2007). Sin embargo, este cultivo contribuye con más de la tercera parte de las divisas generadas por el sector agropecuario y es considerado el primer producto agrícola de exportación. El café aportó en las últimas dos décadas el 35% del valor de las exportaciones agrícolas y ocupó el quinto sitio por superficie cosechada, antecedido sólo por el cultivo de maíz, frijol, sorgo y trigo (SAGARPA, 2005).

En México se han realizado dos estudios acerca del impacto que probablemente podría tener el cambio climático sobre la producción de café. Gay *et al.*, (2006) desarrollaron un modelo empírico econométrico para explorar la relación entre la producción de café, las variables climáticas y económicas de Veracruz, con el fin de estimar los impactos potenciales del cambio climático en dicho cultivo. Villers *et al.*, (2009) evaluaron los impactos potenciales del cambio climático sobre la floración y desarrollo del fruto de la planta de café en la región de Huatusco, Veracruz, utilizando diagramas ombrotérmicos. En países como Brasil se examinaron los impactos específicos del cambio climático en la zonificación agrícola del café según lo indicado por los escenarios del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (por sus siglas en inglés IPCC) en el

2001, encontrando que los aumentos de temperatura y precipitación darán lugar a la disminución de áreas adecuadas para la producción del cultivo. Así mismo, Camargo (2010) mostró que las proyecciones sobre el calentamiento global que presenta el IPCC, harán una fuerte disminución en la producción de café para ese mismo país, además de que el cultivo tenderá a moverse de región.

Desafortunadamente, la vulnerabilidad de la productividad de café debido al cambio climático global en las condiciones de México no ha sido muy estudiada y los únicos trabajos realizados han sido utilizando extrapolación de la tendencia del cambio climático y modelos empíricos de regresión sobre la dependencia del rendimiento en función de la temperatura, precipitación y algunas condiciones económicas de la producción y del mercado.

Como se sabe, la aplicación práctica de cualquier modelo empírico de desarrollo de un cultivo (en particular, de café) tiene muchos límites debido a la ignorancia en tales modelos empíricos del proceso fisiológico de desarrollo de la planta en función de las condiciones naturales concretas en cada sitio de referencia, incluyendo las condiciones climáticas. Además, como regla, los modelos empíricos ignoran la teoría de dimensiones, lo que causa alto riesgo de errores de cálculo de los rendimientos en caso de aparición de error en cualquier dimensión de un variable.

La experiencia de otros países en estimación de vulnerabilidad de café al cambio climático tampoco es representable debido a diferencias en condiciones climáticas, edáficas, económicas u otras.

Todo esto significa que es necesario continuar los estudios de vulnerabilidad del cultivo de café en México al cambio climático global esperado en el futuro, utilizando una metodología basada en el uso de los escenarios del cambio climático y un modelo teórico fenomenológico de desarrollo del cultivo en función de sus características biológicas y las condiciones climáticas esperadas en el futuro. Considerando la gran importancia del estado de Veracruz en la producción nacional de café será interesante evaluar la vulnerabilidad de café en este estado a los escenarios existentes del cambio climático en transcurso del siglo XXI.

## **2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

### **2.1. Objetivo general**

- Evaluar la vulnerabilidad de la producción del cultivo de café variedad *C. Arabica* en la zona centro del estado de Veracruz atribuible a los escenarios climáticos existentes en función de los escenarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), utilizando un modelo teórico fenomenológico de desarrollo del cultivo en función de sus características biológicas y las características climáticas.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Evaluar el nivel de confianza del modelo teórico fenomenológico calculando el rendimiento del cultivo de café variedad *C. Arabica* en algunos sitios de referencia para el periodo base y comparar los resultados con los valores reportados en la base de datos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP).
- Estimar la vulnerabilidad del cultivo de café variedad *C. Arabica* a los escenarios climáticos existentes en función de los escenarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a mediados del siglo XXI (2050).
- Identificar las variables climáticas que ponen en riesgo al cultivo de café variedad *C. Arabica* en el proceso inminente del cambio climático.

### **2.3. Hipótesis**

- El modelo teórico fenomenológico del desarrollo del cultivo de café, es general y puede ser utilizado para diferentes cultivos incluyendo café. Basado en los principios agroecológicos y en un número reducido de variables climáticas se puede utilizar para predecir la vulnerabilidad de la productividad de café variedad *C. Arabica* ante escenarios climáticos en función de los escenarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

- El cambio climático global es un factor importante en la modificación de la producción del cultivo de café de la zona centro del estado de Veracruz.
- El Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas (*ISNH*) es de gran influencia en el rendimiento potencial del cultivo debido al cambio de temperaturas y precipitación que se pueden presentar en un futuro.

### **3. REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **3.1. Razones del cambio climático**

Para el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas (IPCC por sus siglas en inglés) 2007, el término “cambio climático” denota un cambio en el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante análisis estadísticos) a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos. Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana. En la historia de la tierra se reportan varios cambios de origen natural, pero en los últimos siglos estos cambios también han sido de origen antropogénico.

El cambio climático también es producido por una exacerbada acción del efecto invernadero, resultado del incremento de las concentraciones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), es decir, de la cantidad y variedad de algunos de los gases que componen la atmósfera (INE, 2010).

Gay y Estrada (2007), mencionan que el Grupo de Trabajo I del IPCC, concluyó que la mayor parte del calentamiento global observado durante el siglo XX se debió muy probablemente (90% de confianza) al aumento en las concentraciones de GEI causado por las actividades humanas. La evidencia acumulada, particularmente desde 1970 indica que el calentamiento ha tenido una influencia indiscutible en muchos sistemas físicos y biológicos.

Los cambios experimentados por las concentraciones de los gases y aerosoles en la atmósfera, por la cubierta terrestre y por la radiación solar alteran el balance de energía del sistema climático y son factores originantes del cambio climático. Los GEI afectan la absorción, la dispersión y la emisión de radiación en la atmósfera y en la superficie de la Tierra. Las actividades humanas generan emisiones de cuatro GEI de larga permanencia: CO<sub>2</sub>, metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y halocarbonos grupo de gases que contienen flúor, cloro o bromo (IPCC, 2007a). El aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero en la atmósfera está



causando grandes cambios en los fenómenos atmosféricos, que influyen en el cambio climático y la variabilidad de los impactos críticos sobre las vegetaciones (Camargo, 2010). La principal evidencia de que existe un cambio climático es el aumento de la temperatura promedio de la atmósfera terrestre. Sin embargo, existen evidencias relacionadas con el nivel del mar, las capas de hielo en las zonas del ártico, la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos y algunos cambios en los ecosistemas.

En la actualidad existe un grado de confianza muy alto, basado en un mayor número de evidencias observadas de especies, en que el reciente calentamiento está afectando notablemente a los sistemas biológicos terrenos, por ejemplo en el adelanto de los procesos primaverales, como el retoñar de las hojas, la migración de las aves, la puesta de huevos o en el desplazamiento hacia los polos y hacia niveles altos del ámbito geográfico de las especies vegetales y animales. Sobre la base de observaciones satelitales obtenidas desde comienzos de los años 80, hay un grado de confianza alto en que, en numerosas regiones, los brotes vegetales tienden a aparecer más temprano en primavera, debido a una prolongación de los períodos térmicos de crecimiento, por efecto del reciente calentamiento (IPCC, 2007a).

### **3.2. La vulnerabilidad en el contexto del cambio climático**

El uso científico de "vulnerabilidad" tiene sus raíces en la geografía y la investigación de fenómenos naturales, pero este término es ahora un concepto central en una variedad de otros contextos de investigación como la ecología, salud pública, la pobreza y desarrollo, medios de vida seguros y hambruna, ciencia de la sostenibilidad, cambios en la tierra e impactos climáticos y adaptación (Füssel, 2007). El concepto de vulnerabilidad ha sido una poderosa herramienta analítica para describir estados de susceptibilidad a daños, impotencia y la marginalidad de sistemas tanto físicos como sociales y para guiar el análisis normativo de acciones para mejorar el bienestar a través de la reducción del riesgo (Adger, 2006).

Vulnerabilidad describe un concepto central en la investigación del cambio climático, así como en las comunidades de investigación relacionados con desastres naturales y gestión de desastres, ecología, salud pública, la pobreza y desarrollo, garantizar medios de vida y el hambre, la ciencia de la sostenibilidad y cambio de la tierra. Cada una de estas comunidades ha desarrollado sus propios modelos conceptuales, que a menudo enfrentan similares problemas y procesos con idioma diferente. Vulnerabilidad, en particular, se conceptualiza en maneras diferentes. La existencia de diferentes conceptualizaciones y terminologías de vulnerabilidad es particularmente problemático en la investigación sobre el cambio climático global, que reúne a estudiosos de todas estas comunidades. A pesar de varios intentos para resolver la confusión conceptual alrededor de "vulnerabilidad", ninguno de los anteriores marcos ha logrado esta meta (Füssel, 2007).

El IPCC (2007b) define el término de vulnerabilidad como la medida en la que un sistema es capaz o incapaz de afrontar los efectos negativos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los fenómenos extremos. La vulnerabilidad está en función del carácter, la magnitud y el índice de variación climática al que está expuesto un sistema, su sensibilidad y su capacidad de adaptación. El desarrollo sostenible puede reducir la vulnerabilidad al cambio climático mediante el aumento de la capacidad de adaptación y de resistencia. No obstante, en la actualidad, pocos planes de fomento de la sostenibilidad han incluido explícitamente la adaptación a los impactos del cambio climático o la promoción de la capacidad de adaptación.

En general, el concepto de vulnerabilidad ha sido continuamente aumentado y extendido hacia un enfoque más amplio que abarca la susceptibilidad, la exposición, la capacidad de superación y capacidad de adaptación, así como diferentes áreas temáticas, tales como la vulnerabilidad física, social, económica, ambiental e institucional (Birkmann, 2007).

Desde finales de los 90's, se han iniciado importantes esfuerzos para delinear modelos conceptuales de como el cambio climático impactaría la vulnerabilidad (Adger and Kelly, 1999). Estudios del Tercer Informe de Evaluación del IPCC

muestran que los impactos de cambio climático previstos pueden variar considerablemente según sea la vía de desarrollo asumida. Por ejemplo, pueden existir grandes diferencias en cuanto a la población regional, los ingresos y el desarrollo tecnológico según el escenario alternativo, lo cual constituye, a menudo, un marcado determinante del nivel de vulnerabilidad al cambio climático.

Magaña y Gay (2002) mencionan que la vulnerabilidad del país, al igual que en el caso del resto de las naciones en desarrollo, es mayor que la de los países desarrollados. La razón básica de esta diferencia radica en los recursos disponibles para adaptarse al cambio climático, que son mucho mayores en los países industrializados. Por su parte, la vulnerabilidad puede ir en aumento o ser disminuida mediante acciones concretas. Estudios del posible impacto del cambio climático en la agricultura muestran que de presentarse condiciones de sequía más frecuente, las pérdidas en este sector serán mayores; por ejemplo, entre 1980 y 1998, el 43% de la agricultura mexicana fue de temporal para el ciclo otoño – invierno, llegando al 80% para el ciclo primavera-verano, tal condición vuelve a la agricultura mexicana muy vulnerable a las fluctuaciones en el clima.

Finalmente el cambio climático observado, la actual variabilidad del clima y las expectativas futuras de cambio, están modificando el rumbo de las estrategias de desarrollo. El reto es promover o incrementar la capacidad de adaptación en el contexto de la competencia de los objetivos del desarrollo sostenible. Todas las sociedades, por consiguiente, tienen que aprender a lidiar con los cambios que se predicen.

### **3.3. Pronósticos del cambio climático en México**

En México se tienen escenarios climáticos que describen cambios en la temperatura media anual y en la precipitación total anual para un escenario de duplicación de bióxido de carbono ( $2xCO_2$ ) en algunas estaciones meteorológicas de México a finales del siglo XXI, utilizando varios modelos de Circulación General de la Atmósfera (Liverman y O'Brien, 1991):

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

Estos escenarios climáticos de calentamiento global aún con ser inciertos, debido a que las proyecciones de los modelos varían ampliamente, en especial para la precipitación la cual difiere en algunos casos hasta en el signo, muestran que los Modelos de Circulación General indican que las condiciones climáticas futuras en México podrían ser más cálidas y secas. Por tal razón, se podrían tener serias consecuencias en la agricultura de temporal y de riego, pues aunque la precipitación tienda a incrementar como señalan algunos modelos, en la mayoría de los casos no se compensa con los incrementos en la evaporación potencial.

No obstante que la mayoría de los Modelos de Circulación General antes mencionados producen un incremento total en la temperatura, difieren en sus proyecciones regionales sobre la magnitud del calentamiento y con frecuencia no coinciden en la magnitud y dirección de los cambios en la precipitación. El estudio de Liverman y O'Brien (1991) ha mostrado que los modelos tienen serias dificultades para la reproducción del clima y su variabilidad actual. Por citar un 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 (en algunos más de 10 °C); esto probablemente se debe al escaso detalle topográfico que tiene los Modelos de Circulación General. Para el caso de la lluvia es peor, ya que algunos modelos solo obtienen la mitad de la lluvia anual observada en esa misma región. Para Mérida los modelos sobreestiman ligeramente la temperatura, mientras que el modelo que mejor predijo la temperatura en Puebla sobreestima con mucho la precipitación en Mérida. Otro problema que se tiene en estos modelos es la imposibilidad para reproducir la estacionalidad de la lluvia en el norte de México. Es importante

señalar que los nuevos modelos y las nuevas versiones están mejorando constantemente en estos aspectos, por tal motivo es conveniente afinar los pronósticos de vulnerabilidad a medida que se generen nuevos escenarios de cambio climático.

En otro estudio Hulme y Sheard (1999) presentaron cuatro escenarios climáticos para México (mediados y final del siglo XXI, respectivamente: 2050 y 2080), obtenidos del valor medio de los resultados de 10 modelos climáticos de siete laboratorios de seis países del mundo. Estos escenarios únicamente proporcionan información sobre los valores medios anuales de precipitación y temperatura, careciendo de pronósticos relacionados con la radiación. Los resultados que arrojan estos modelos son disminuciones en la precipitación en el sur de México y para el norte se carece de información sobre cambios en la precipitación. Para la temperatura se pronostican incrementos de aproximadamente 2.5 °C en promedio para el escenario medio, con mayores incrementos en el norte del país.

En la actualidad el cambio climático existe y para México, se proyecta un incremento de la temperatura y un decremento de la precipitación dependiendo del espacio, tiempo y escenario climático utilizado (Ojeda, 2010).

El Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, desarrolló pronósticos de cambio climático en diferentes regiones de México. Magaña *et al.*, (1997) y Gay, (2000) presentan los cambios regionales para México, los cuales fueron obtenidos de la interpolación de salidas de Modelos de Circulación General (MCG) para experimentos numéricos de la concentración actual de CO<sub>2</sub> y la duplicación de la concentración actual de CO<sub>2</sub>.

Para el desarrollo de pronósticos del cambio climático en México, Gay (2000) utilizó los Modelos de Circulación General de la Atmósfera (MCG) 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), con la finalidad de contar con información útil en los estudios de vulnerabilidad de cultivos al cambio climático en México. Los

pronósticos se realizaron para las 18 zonas climáticas conocidas como “zonas de Douglas”. 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.

Recientemente, en el Centro de Ciencias de la Atmosfera 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 y GFDL (Conde, 2003). Estos modelos fueron seleccionados por que se cree que representan mejor el clima regional, además de que están siendo utilizados por otros países de la misma región geográfica de México.

Martínez (2007), resume que las condiciones probables del clima en México son: aumento entre 2 y 4 °C en la temperatura, para el periodo 2020 – 2080, principalmente en la parte continental del norte de México. En invierno se espera una reducción de la precipitación cerca al 15 por ciento en regiones del centro de México, y de menos de 5 por ciento en la zona del Golfo de México. En verano las lluvias podrían disminuir hasta 5 por ciento en la parte central del México. Finalmente se proyectan retrasos en el inicio de lluvias, con una extensión de la temporada de lluvias hacia los meses de otoño, para la gran parte del país.

Actualmente, en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México se elaboraron proyecciones de cambio climático (Magaña, 2010) en donde prácticamente fueron regionalizados para México todos los experimentos de cambio climático utilizados en el Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental. Por lo que ahora se dispone de cuatro escenarios climáticos equivalentes con resolución espacial uniforme en función de los escenarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero en la atmósfera. Las proyecciones son de resolución temporal mensual y espacial de 50 km x 50 km para el periodo 2000-2099. Los escenarios climáticos en función de los escenarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) son: A2, A1B, B1 y COMMITED. Bajo tal esquema se cuenta con experimentos de mayor

resolución y se dispone de escenarios que para la parte histórica han sido corregidos en sus errores sistemáticos y dicha corrección se propaga hacia los modelos a futuro.

Para la regionalización de dichas proyecciones se utilizó el método estadístico, el *Climate Predictability Tool (CPT)*. La gran suposición de dicha técnica es que las relaciones históricas entre patrones de distintas escalas se mantendrán aun bajo cambio climático. Esta hipótesis es una fuente de incertidumbre, tal y como lo es la ausencia de modelos que lleven a “sorpresas climáticas”. Por ello, se considera que el CPT es una posibilidad adecuada de generar escenarios regionales de cambio climático (Magaña y Caetano, 2007).

En el presente estudio resultan útiles emplear los escenarios climáticos existentes en función de los escenarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera: A2, A1B, B1 y COMMITED, generados por en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (Magaña, 2010), ya que son escenarios climáticos que disponen de más de 20 Modelos de Circulación General de la Atmósfera utilizados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático y que cuentan con la aplicación del método estadístico *Climate Predictability Tool (CPT)* el cual permite obtener entre 50 y 90 experimentos de regionalización de proyecciones de cambio climático considerando los diferentes escenarios climáticos en función de los escenarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

### **3.4. Generalidades del cultivo de café**

Dentro de las actividades agrícolas con mayor importancia y arraigo en México resalta la cadena productiva del cultivo de café, considerada una de las actividades más rentables a nivel mundial y con mayor valor comercial para la industria (Carvallo, 2009). Este cultivo es de gran importancia en el ámbito nacional e internacional, ya que es parte de las necesidades básicas de consumo. El cultivo de café fue introducido desde el año de 1795 a México, los primeros arbustos procedieron de la isla de Cuba; este cultivo es de enorme trascendencia

desde el punto de vista social, cultural y ecológico, al ser uno de los principales productos agrícolas de exportación durante los últimos 20 años, colocando a México en importantes posiciones internacionales (Moguel y Toledo, 1996).

López *et al.*, (2007) mencionan como requerimientos agroecológicos del cafeto los siguientes: temperatura promedio anual entre 20 y 25 °C, considerándose los límites del mes más cálido y del mes más frío; altitudes desde los 200 hasta los 1,800 msnm; la precipitación media anual requerida por el cafeto es de 1,800 a 2,500 mm, distribuidos a través del año; el suelo más apto para que la planta pueda crecer y desarrollarse vigorosamente, es aquel que posee un metro de profundidad de textura franca, excelente drenaje interno y superficial, 60% de porosidad y 5% o más de contenido de materia orgánica; la planta de café puede prosperar en condiciones de suelos ácidos, con un pH desde 4.5 a 7.0. Se considera que las labores de cultivo se facilitan más en pendientes menores al 20%. Preferentemente se planta en las laderas de montañas, en las cuales se sobreponen elementos templados y tropicales, donde establecen contacto los cuatro principales tipos de vegetación arbórea: las selvas altas y medianas, las selvas bajas, el bosque mesófilo y los bosques de pino-encino (Moguel y Toledo, 2004).

Las plantas de café son muy resistentes a las altas temperaturas y a la sequía del verano, pero las condiciones extremas pueden ser responsables del estrés fisiológico, tal es el caso de la reducción de la eficiencia fotosintética. Otras son las fases de floración y llenado de grano. Por otra parte las altas temperaturas y condiciones secas durante la fase reproductiva pueden ser críticas para la producción óptima y la calidad del café. La fijación de los límites adecuados de temperatura del aire para el café es decisiva para la distribución y la explotación económica de la cosecha. Estudios realizados muestran que la temperatura es un factor climático importante para la producción de café, ya que la producción responde de manera significativa a los patrones estacionales de temperatura (Camargo, 2010).

Siles (2001) menciona que el cultivo de café exhibe todas las características de una planta con ruta fotosintética C3, ya que el CO<sub>2</sub> es incorporado primero dentro



de compuestos de tres carbonos fosforilados, y las hojas producen un aumento de CO<sub>2</sub> fotorespiratorio cuando las plantas son posicionadas en la oscuridad. La fotosíntesis neta de las hojas de café, a una temperatura de 20 °C, se asemeja a la de otras especies leñosas, pero la tasa de asimilación neta registrada para las plántulas de café jóvenes, en el trópico a altas temperaturas, es usualmente baja 0.6 a 1.2 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. La tasa máxima de fotosíntesis neta de las hojas a pleno sol de plantas adultas es alrededor de 7 – 12 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> a una temperatura de 20 °C y una radiación fotosintéticamente activa entre 600 a 900 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Sin embargo se han encontrado valores por arriba de 14 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> para hojas en sombra.

En cuanto al Índice de Área Foliar (IAF), éste describe las propiedades fundamentales en la interacción de la planta con la atmósfera, especialmente en cuanto a radiación, energía, momentum e intercambio de gas. Su valor depende de la especie, fenología y ambiente, pero en general, tanto para árboles de hoja ancha, como coníferas tiene valores de 1 a 10. Trabajos realizados establecen que para la producción y el rendimiento del cultivo de café, se requiere un rango óptimo de IAF de 6 a 10 (Wintgens, 2004).

El Índice de Cosecha (IC) es la fracción de la biomasa neta de la materia seca total correspondiente al producto agrícola. Para el cultivo de café se tiene que en rangos de cosecha comúnmente de 0.5 a 2.5 ton ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> con un índice de cosecha aproximadamente de 0.012 (Nair, 1993).

La variabilidad del clima es el principal factor responsable de las oscilaciones anuales de la producción de café en México. Camargo (2010) menciona que las relaciones entre los parámetros climáticos y la producción de café son muy complejas, debido a que los factores ambientales afectan el crecimiento y el desarrollo del cultivo bajo diferentes formas en sus fases fenológicas. Por ejemplo, el estrés hídrico puede limitar el proceso de la fotosíntesis debido al cierre de estomas y a la reducción de otras actividades fisiológicas de la planta. También otros factores climáticos tales como las temperaturas adversas del aire pueden reducir la productividad.

Las evaluaciones de vulnerabilidad de cultivos en México se han realizado cuando menos para dos cultivos (café y maíz). En el caso del cultivo de café en el estado de Veracruz la investigación se basó utilizando un enfoque estadístico explorando correlaciones entre la producción de café, variables climáticas y econométricas. En estudios realizados por Gay *et al.*, (2006) se espera que las condiciones que se prevén para el 2020, la producción de café podría no ser económicamente viable para los productores, ya que se espera una reducción del 34% de la producción actual.

Gay *et al.*, (2004) encontraron que la producción esperada para condiciones actuales es muy parecida a la producción potencial. Esto ocurre porque las condiciones climáticas actuales, tanto en su valor promedio como en su variabilidad, son muy favorables para el cultivo. Sin embargo, al introducir los cambios, tanto en valores medios como en variabilidad, esperadas para el 2050, la producción esperada se reduce de manera importante. Tomando como punto de comparación la producción esperada actual, la producción esperada en el 2050 podría disminuir entre un 73 y 78% de acuerdo con los escenarios optimista (el que representa mayor cambio) y pesimista (el que representa menor cambio) respectivamente, debido a que las variables climáticas empleadas en el modelo utilizado por Gay *et al.*, (2004) están muy relacionadas con etapas importantes de la fenología de la planta de café: la precipitación en primavera coincide con la caída de hojas y la floración del cafeto, mientras que la temperatura de verano y la temperatura de invierno coinciden con el desarrollo y maduración del fruto.

Ante las condiciones de cambio climático propuestas por las salidas de los Modelos de Circulación General empleados en el estudio de Villers *et al.*, (2009) se observó que el inicio de la floración del café puede verse afectada provocando que el disparo del inicio de la floración sea en un número reducido de flores, probablemente de la mitad, ya que esta fase del cultivo se reduciría de cuatro meses a dos meses.

### **3.5. Modelos para pronosticar rendimiento en función de escenarios de cambio climático y algunos resultados**

Los factores climáticos pueden reducir la productividad, tales como las temperaturas adversas del aire. La radiación solar y la humedad relativa influyen en muchos procesos fisiológicos de la planta de café, pero generalmente no se cree que desempeñen un papel importante como la temperatura y las condiciones de lluvia para definir el rendimiento. Camargo (2010) menciona que los modelos agrometeorológicos relacionados con el crecimiento, el desarrollo y la productividad pueden aportar información para el monitoreo del agua del suelo y la previsión de rendimiento, basado en la falta de agua. Un balance de agua en el suelo durante diferentes etapas de crecimiento de la cosecha de café, puede cuantificar el efecto del agua disponible en el suelo en la disminución del rendimiento final.

En cuanto al estudio de los modelos agrometeorológicos para estimar rendimientos de café, Santo y Camargo (2006) mencionan que estos modelos pueden evaluar cuantitativamente la influencia de las variables climáticas, tales como la temperatura del aire y el balance hídrico del suelo sobre el desarrollo del café y la producción de granos. Los estudios realizados en el estado de Veracruz analizan cambios en las políticas agrícolas y en la inestabilidad del mercado, los cuales resultan más inminentes que el clima. Sin embargo, dependiendo de la sensibilidad del cultivo al clima y de cuánto se modifique éste en la región, las variables climáticas pueden convertirse en factores que determinen su viabilidad física y económica.

Gay *et al.*, (2006) desarrollaron un modelo econométrico para explorar la relación entre la producción de café, las variables climáticas y económicas de Veracruz, con el fin de estimar los impactos potenciales del cambio climático en dicho cultivo, el modelo fue validado a través de un análisis estadístico para proyectar la producción de café en diferentes condiciones climáticas. El modelo econométrico desarrollado por Gay *et al.*, (2006) se presenta en la ecuación (1):

$$P_{\text{coffee}} = -35965262 + 2296270T_{\text{summ}} - 46298.67 T_{\text{summ}}^2 + 658.01618 P_{\text{spr}} + 813976.3 T_{\text{win}} - 20318.27 T_{\text{win}}^2 - 3549.71 \text{MINWAGE} \quad (1)$$

Donde:

$T_{\text{summ}}$  es la temperatura media durante el verano (°C)

$P_{\text{spr}}$  es la precipitación media durante la primavera (mm)

$T_{\text{win}}$  es la temperatura media durante el invierno (°C)

MINWAGE es el salario mínimo real (pesos)

El modelo anterior cuenta con un ajuste de  $R^2 = 0.69$ , por lo que el 69% de la varianza de la variable producción de café es explicada por las variables de temperatura, precipitación y salario mínimo. La ecuación (1) muestra que la temperatura es el factor climático más importante para la producción de café, ya que la producción responde de manera significativa a los patrones estacionales de temperatura. Gay *et al.*, (2006) mencionan que el modelo permite la exploración de la sensibilidad de la producción a los cambios en las variables relevantes. En el caso de la temperatura, lineal y términos cuadráticos permiten el hallazgo de una temperatura óptima para la producción de café en Veracruz. Los resultados de las condiciones pronostican que el cambio climático para el año 2020 en la producción de café podría no ser económicamente viable para los productores, ya que el modelo indica una reducción del 34% de la producción actual.

El modelo desarrollado por Gay *et al.*, (2006) revela que la temperatura actual ya es ligeramente mayor que el valor óptimo para la producción de café. Esto implica que cualquier incremento en la temperatura provocaría una caída en la productividad de las actuales áreas de producción de café. De acuerdo con el modelo climático simple presentado anteriormente, la temperatura media en invierno es particularmente importante porque muestra una tendencia al alza, una mayor varianza, y su intervalo de media tiene una menor probabilidad. Estos factores hacen que la temperatura media en invierno potencialmente sea más dañina que cualquier otra variable climática en el modelo. En contraste, la

temperatura media en verano no sería tan perjudicial debido a que el cambio esperado de esta variable es secundario.

Otro estudio del impacto que podría causar el cambio climático en la producción del cultivo de café fue presentado por Gay *et al.*, (2004), los cuales aplicaron el modelo econométrico desarrollado por Gay *et al.*, (2006) para explorar la sensibilidad de la producción de café en el estado de Veracruz. Para la generación de escenarios de cambio climático en el año 2050 se utilizaron los modelos HadCM2 (Hadley Centre) y ECHAM4 (Modelos de pronóstico del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, modificados y extendidos en Hamburgo). El modelo empleado Gay *et al.*, (2004) integra la variable económica de salarios, que representa alrededor del 80% de los costos de producción del café. La producción esperada para condiciones actuales es muy parecida a la producción potencial, esto ocurre porque las condiciones climáticas actuales son muy favorables para el cultivo. Sin embargo, a la hora de introducir los cambios tanto en los valores medios como en la variabilidad, esperadas para el 2050, la producción esperada se reduce de manera importante. Tomando como punto de comparación la producción esperada actual, la producción esperada en el 2050 podría disminuir un 73 y 78% de acuerdo con los escenarios empleados en el estudio. Estos resultados sugieren que la situación económica de los productores empeorará, y que es necesario que el cambio climático sea parte explícita de los planes de desarrollo agrícola.

Villers *et al.*, (2009) evaluaron los impactos potenciales del cambio climático sobre la floración y desarrollo del fruto de la planta de café en la región de Huatusco, Veracruz, mediante la utilización de diagramas ombrotérmicos los cuales permiten relacionar las variables mensuales básicas de temperatura y precipitación con los requerimientos del café en las etapas de floración y fructificación. Utilizaron dos modelos de circulación general el *Geophysical Fluids Dynamics Laboratory* (GFDL-R30) y el *Canadian Climate Center Model* (CCCM). Las salidas de estos modelos simulan los incrementos en la temperatura y las razones de cambio en la precipitación en caso de duplicación de CO<sub>2</sub> de la atmósfera.

Antes las condiciones de cambio climático propuestas por las salidas de los modelos CCCM y GFDL-R30, Villers *et al.*, (2009) señala que el inicio de la floración del café puede verse afectada, ya que la sequía preestival en lugar de presentarse en cuatro meses y no ser tan intensa, se concentraría principalmente en dos meses. Para la maduración del fruto, ambos escenarios de cambio climático apuntan a serios riesgos en la producción de café ya que presentan un superávit por encima del valor normal.

Desafortunadamente, la vulnerabilidad de la productividad de café debido al cambio climático global en las condiciones de México no ha sido muy estudiada y los únicos trabajos realizados han sido utilizando extrapolación de la tendencia del cambio climático y modelos empíricos de regresión sobre la dependencia del rendimiento en función de la temperatura, precipitación y algunas condiciones económicas de la producción y del mercado. Por lo tanto, en el presente estudio se propone una metodología basada en el uso de los escenarios del cambio climático y un modelo teórico fenomenológico de desarrollo del cultivo en función de sus características biológicas y las condiciones climáticas esperadas en el futuro. La descripción detallada de esta metodología se presenta en el Capítulo 4.

## 4. MATERIALES Y MÉTODOLÓGÍA

La evaluación de la vulnerabilidad de la producción del cultivo de café variedad *C. Arabica* en base a los escenarios climáticos existentes en función de los escenarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), fue realizada para las condiciones de la zona centro del estado de Veracruz.

### 4.1. Materiales

Para estimar la vulnerabilidad de la producción del cultivo de café variedad *C. Arabica* al cambio climático global se utilizó la siguiente información:

- Normales climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional de la República Mexicana, en el periodo 1981-2010, las cuales reflejan las condiciones climáticas de la zona de estudio.
- Escenarios de cambio climático en México a mediados del siglo XXI (Magaña *et al.*, 1997; Magaña *et al.*, 1999; Gay *et al.*, 2004; IPCC, 2007a; INE, 2010).
- Modelo fenológico de desarrollo para el cultivo de café (FAO-IIASA 2000).
- Información sobre producción de café en México (Sáenz, 1990; Moguel y Toledo, 1996; Escamilla, 1997; Pérez y Geissert, 2006; y López *et al.*, 2007).
- Datos existentes sobre vulnerabilidad de la producción del cultivo de café al cambio climático (Gay *et al.*, 2004).

### 4.2. Metodología

La metodología para estimar la vulnerabilidad de la producción del café al cambio climático global incluyó las siguientes etapas:

- Selección de los sitios de referencia representativos de la producción del cultivo de café variedad *C. Arabica*, ubicados en la zona centro del estado de Veracruz.

- Caracterización climática actual de los sitios de referencia y análisis de los escenarios climáticos en función de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero a mediados del siglo XXI.
- Cálculo del Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas (ISNH) del cultivo de café variedad *C. Arabica* para los sitios de referencia seleccionados.
- Estimación de la vulnerabilidad de la producción del cultivo de café variedad *C. Arabica* en los sitios de referencia seleccionados, respecto al escenario base a inicios del siglo XXI y para el escenario de cambio climático a mediados del siglo XXI (2050).

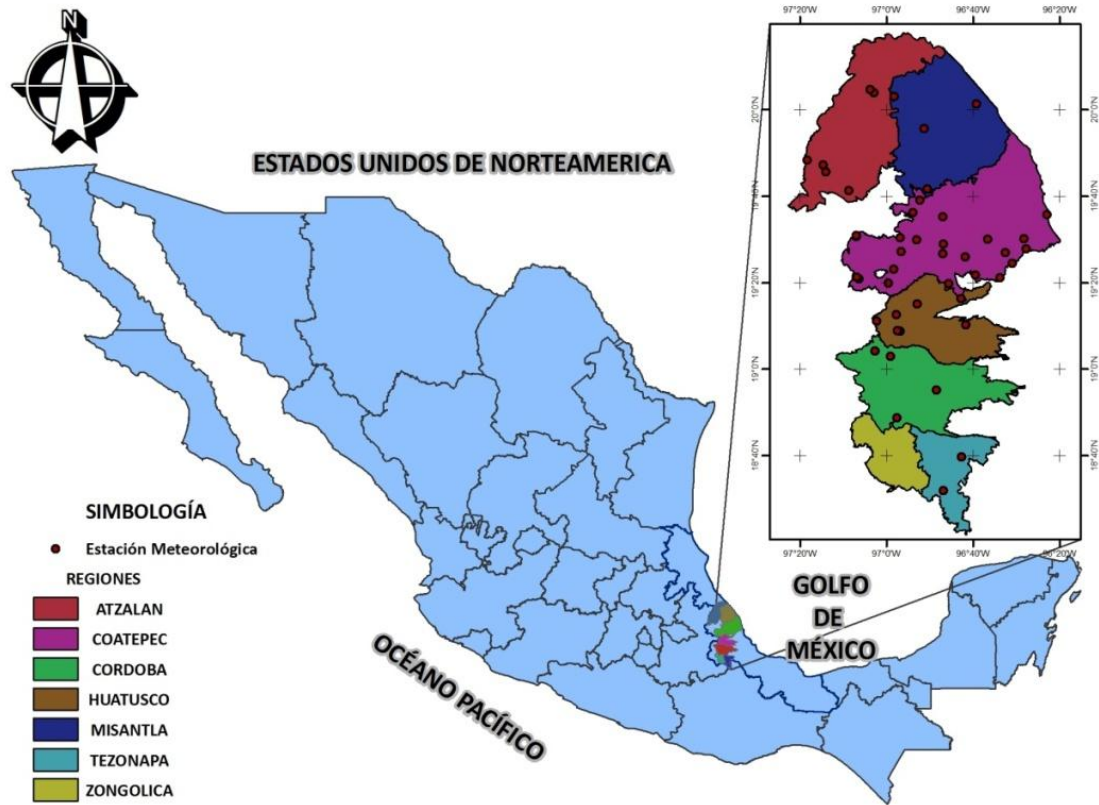
Los pronósticos de los cambios en los rendimientos del cultivo de café se realizaron mediante la metodología de FAO-IIASA (2000).

#### **4.3. Ubicación de los sitios de referencia representativos del cultivo de café**

Mediante un muestreo en más del 52% de la superficie total cultivada con café en México, Moguel y Toledo (1999), identificaron siete regiones productoras, entre ellas la Zona Centro del estado de Veracruz. En ésta se cultiva café en 46 municipios en una superficie total de 96,968 hectáreas, de las cuales 95,599 son cafetales con sombra y sólo 969 hectáreas pertenecen al sistema de café sin sombra (Toledo y Moguel, 2001). La región cafetalera del estado, localizada básicamente en la zona central de Veracruz, está integrada por siete regiones: Atzalan, Misantla, Coatepec, Huatusco, Córdoba, Zongolica y Tezonapa (Figura 1). En esta zona se concentra el 90% de los productores y el 93% del total de la superficie cafetalera de la entidad; conformando así, la principal zona compacta productora de café en el país (López *et al.* 2007). El presente estudio se llevó a cabo en la Zona Centro del estado de Veracruz conformada por las regiones cafetaleras de Atzalan, Misantla, Coatepec, Huatusco, Córdoba y Tezonapa, quedando fuera la región de Zongolica ya que en ella no hubo incidencia de



alguna estación meteorológica. La selección de estos sitios de referencia se explica también porque los únicos estudios realizados a cerca del impacto del cambio climático en la producción de café se encuentran sobre dicha zona.



**Figura 1.** Ubicación de los sitios de referencia del estado de Veracruz.

En el Cuadro 1 se describen los municipios que integran cada una de las regiones cafetaleras antes mencionadas y que fueron sitios de referencia seleccionados para realizar el cálculo de los rendimientos.

**Cuadro 1.** Ubicación geográfica de los municipios que integran las regiones cafetaleras seleccionadas para el pronóstico del cambio en el rendimiento del cultivo de café variedad *C. Arabica*.

Regiones cafetaleras	Municipios que integran las regiones cafetaleras	Latitud Norte	Longitud	Altitud (msnm)	
Atzacalan	Altotonga	19° 45'	-97° 13'	1,867.0	
	Atzacalan	19° 47'	-97° 15'	1,697.0	
	Jalacingo	19° 48'	-97° 18'	1,880.0	
	Las Minas	19° 41'	-97° 9'	1,415.0	
	Martínez de la Torre	20° 4'	-97° 3'	76.0	
Coatepec	Actopan	19° 29'	-96° 30'	108.5	
	Coatepec	19° 28'	-96° 57'	1,268.5	
	Cosautlán de Carvajal	19° 19'	-96° 59'	1,274.0	
	Emiliano Zapata	19° 25'	-96° 42'	584.6	
	Ixhuacán de los Reyes	19° 21'	-97° 6'	1,802.0	
	Jalcomulco	19° 18'	-96° 44'	308.5	
	Jilotepec	19° 36'	-96° 54'	1,000.0	
	Naolinco	19° 37'	-96° 49'	1,136.0	
	Teocelo	19° 23'	-96° 58'	1,188.0	
	Xalapa	19° 30'	-96° 53'	1,281.0	
	Xico	19° 30'	-97° 7'	3,114.5	
	Córdoba	Coscomatepec	19° 4'	-97° 3'	1,530.0
		Ixhuatlán del café	19° 3'	-96° 59'	1,350.0
Fortín		18° 48'	-96° 57'	697.0	
Atoyac		18° 55'	-96° 48'	826.0	
Huatusco	Comapa	19° 10'	-96° 42'	545.0	
	Huatusco	19° 9'	-96° 58'	1,166.7	
	Tenampa	19° 15'	-96° 52'	1,015.0	
	Totutla	19° 12'	-96° 57'	1,446.0	
Misantla	Acatlán	19° 42'	-96° 50'	1,751.0	
	Misantla	19° 59'	-96° 54'	184.5	
	Vega de Alatorre	20° 1'	-96° 39'	25.0	
Tezonapa	Tezonapa	18° 36'	-96° 45'	183.0	

En base a la clasificación de las 18 regiones climatológicas para México de acuerdo a similitudes en pendiente, en elevación de estaciones, en la cantidad de datos sobre la temperatura y precipitación para el periodo 1947 – 1988, realizada por Arthur Douglas, de la Universidad de Creighton, Nebraska, EUA; el estado de Veracruz corresponde a la región 15. De acuerdo a esta clasificación, las condiciones climáticas de diferentes áreas dentro del estado, pueden ser estimadas, utilizando los datos para toda la región, incluyendo los municipios de Coatepec, Xico y Huatusco, donde el 90% de la producción estatal proviene del cultivo de café.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron datos de 47 estaciones meteorológicas en el periodo 1980 – 2010, dichas estaciones inciden sobre seis de las regiones antes mencionadas como sitios de referencia. Los datos climatológicos se encuentran disponibles en el Servicio Meteorológico Nacional

(SMN). La base de datos utilizada fue procesada en hojas de cálculo y Visual Basic, y validada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) dentro del Laboratorio de Agromapas Digitales (LADIGS), tomando los siguientes criterios para la selección:

- Que los datos estuvieran dentro del periodo de 1981 a 2010, considerando 30 años, ya que son los años que se establecen para las normales climáticas.
- Que el periodo de 1981 a 2010 tuviera al menos el 80% de los registros en las variables de precipitación y temperatura.
- Que no hubieran valores negativos en la variable de precipitación.

#### 4.4. Pronóstico de rendimiento del cultivo de café

Los rendimientos del cultivo de café variedad *C. Arabica* para los años de referencia con el superíndice  $j$  se calcularon con la ecuación propuesta por la FAO-IIASA (2000):

$$Y_{\text{cal}}^j = Y_{\text{máx}}^j * ISNH^j * F^j \quad (2)$$

Donde:

$Y_{\text{cal}}^j$  es la productividad agrícola del cultivo de café variedad *C. Arabica* (en  $\text{kg ha}^{-1}$  año $^{-1}$  de café cereza) en los sitios de referencia para el escenario base a inicios del siglo XXI ( $j = 2000$ ), y para los escenarios de cambio climático a mediados del siglo XXI ( $j = 2050$ ).

$Y_{\text{máx}}^j$  es el rendimiento potencial máximo (en  $\text{kg ha}^{-1}$  año $^{-1}$ ); depende de los valores mensuales de temperatura del aire, radiación fotosintéticamente activa y características propias del cultivo, como es el índice de cosecha, índice de área foliar y la ruta fotosintética del cultivo de café variedad *C. Arabica*.

ISNH<sup>j</sup> es el Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas (adimensional). Es un índice hídrico, el cual caracteriza la disponibilidad de agua en el suelo para los cultivos durante su 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<sup>j</sup> es el Índice integral de fertilidad del suelo agrícola, el cual varía de uno a cero (adimensional).

Es importante mencionar que la ecuación (2) ha sido ampliamente utilizada en el mundo para evaluar la vulnerabilidad de los cultivos agrícolas al cambio climático (FAO-IIASA 2000; Castillo, 2007; Herrera, 2008). En el presente trabajo de investigación se asumió que la fertilidad del suelo no cambia significativamente en función de los escenarios del cambio climático, por tal motivo se considera que el uso del suelo bajo cultivo de café es relativamente extensivo ya que prácticamente no se aplican fertilizantes y la fracción principal de la producción mínima neta de la biomasa total del cultivo se queda anualmente en las plantaciones. Considerando que la estimación de vulnerabilidad del cultivo de café a los escenarios de cambio climático se realiza a través de la comparación de los rendimiento calculados  $Y_{cal}^j$  a mediados del siglo XXI ( $j = 2050$ ) y a inicios del mismo siglo ( $j = 2000$ ), es decir a través de estimación de la diferencia relativa

$\frac{Y_{cal}^{2050} - Y_{cal}^{2000}}{Y_{cal}^{2000}} = \frac{Y_{cal}^{2050}}{Y_{cal}^{2000}} - 1$ , y considerando el supuesto que  $F^{2050} \cong F^{2000}$  ó en su caso  $\frac{F^{2050}}{F^{2000}} \cong 1$ , se puede escribir:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Y}{Y^{2000}} &= \frac{Y_{cal}^{2050} - Y_{cal}^{2000}}{Y_{cal}^{2000}} = \frac{Y_{cal}^{2050}}{Y_{cal}^{2000}} - 1 = \frac{Y_{m\acute{a}x}^{2050}}{Y_{m\acute{a}x}^{2000}} \frac{ISNH^{2050}}{ISNH^{2000}} \frac{F^{2050}}{F^{2000}} - 1 \cong \\ &\cong \frac{Y_{m\acute{a}x}^{2050}}{Y_{m\acute{a}x}^{2000}} \frac{ISNH^{2050}}{ISNH^{2000}} - 1 \end{aligned} \quad (3)$$

Donde:  $\Delta Y = Y^{2050} - Y^{2000}$  es el cambio absoluto del rendimiento de café a nivel del año 2050 con respecto al inicio del siglo XXI.

$\frac{\Delta Y}{Y^{2000}}$  es el cambio relativo del rendimiento del cultivo de café en el periodo seleccionado a futuro (2050), en comparación con inicios del siglo XXI. Los rendimientos calculados fueron justificados a través del ajuste de los datos de  $Y^{2000}$  con los valores de rendimiento real de café reportados en la base de datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP).

$Y_{\text{máx}}^{2050}$  y  $Y_{\text{máx}}^{2000}$  son los rendimientos del cultivo de café máximos, calculados para las condiciones climáticas pronosticadas a nivel del año 2050 y en el presente.

$\frac{ISNH^{2050}}{ISNH^{2000}}$  es la relación entre los índices hídricos calculados para el año 2050 y para el periodo presente, respectivamente.

ó

$$Y_{\text{cal}}^j = Y_{\text{máx}}^j * ISNH^j \quad (4)$$

Para el cálculo de los rendimientos  $Y^{2000}$  en las condiciones climáticas existentes o escenario base se utilizaron las normales climatológicas en el periodo 1980 – 2010. Para pronosticar los rendimientos del año 2050 ( $Y^{2050}$ ) se utilizaron los escenarios de cambio climático A2, A1B, B1 y COMMITED regionalizados para México, los cuales han sido generados por el Instituto Nacional de Ecología mediante el empleo del sistema SIECCRe. Estos escenarios fueron obtenidos mediante la aplicación de la herramienta estadística de *Predictibilidad del Clima (CPT)*, del Instituto Internacional para la Investigación del Clima y la Sociedad, de Estados Unidos (INE, 2010). Los escenarios climáticos antes mencionados son de resolución temporal mensual y espacial de 50 km x 50 km para el periodo 2000-2099 en función de los escenarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Magaña y Caetano (2007) mencionan que actualmente existe gran confianza en que el incremento de las concentraciones atmosféricas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera producirá un aumento de la temperatura global.

Sin embargo, la estimación de cómo las altas concentraciones de gases pueden afectar los climas regionales tiene una confianza muy baja y está acompañado de numerosas incertidumbres, también es incierto cómo los cambios climáticos podrían variar las futuras condiciones socioeconómicas y ambientales. Por lo anterior es necesario ofrecer una idea de cómo podrían verse afectados los ecosistemas actuales, la vida humana o la economía, ofreciendo un poco de claridad a los tomadores de decisiones. Por ello, en lugar de predicciones, se utilizan representaciones del clima futuro, las cuales se pueden utilizar para determinar cuándo un sector específico es potencialmente vulnerable al cambio climático. Existe una variedad de métodos para la creación de escenarios de cambio climático, entre los que destacan aquellos que pueden construirse a partir de las salidas de los Modelos de Circulación General (GCM), debido a que ellos constituyen las mejores herramientas científicas para proyectar el clima futuro.

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático por sus siglas en inglés IPCC, generó una serie de escenarios de emisiones de GEI. Para ello partió de diferentes proyectos de desarrollo socioeconómico global, que describen consistentemente las relaciones entre las principales fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas que determinan las emisiones futuras de los gases de efecto invernadero (Conde y Gay, 2008).

De manera breve a continuación se describen las características de cada uno de los escenarios climáticos empleados en el presente trabajo de investigación (Magaña y Caetano, 2007; Magaña, 2010). Para mayor información sobre los escenarios climáticos en función de los escenarios de emisiones de GEI se puede revisar el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones: Informe Especial del Grupo de Trabajo III del IPCC del año 2000:

- *Escenario A2*: cuenta con 19 GCM's para el periodo 2000 – 2100 en casi todos los modelos. Describe un mundo muy heterogéneo. Patrones de fertilidad sobre regiones convergen muy lentamente, lo que resulta en un continuo aumento de población. El desarrollo económico está

primeramente orientado en forma regional, con crecimiento económico *per cápita* y cambios tecnológicos fragmentados y más lentos que en las otras historias.

- *Escenario A1B*: cuenta con 24 GCM's en el periodo 1900 – 2300 en casi todos los modelos. Se caracteriza por un rápido crecimiento convergente, balance entre los combustibles fósiles y otras fuentes de energía.
- *Escenario B1*: cuenta con 20 GCM's para el periodo 2000 – 2300 en caso todos los modelos. Describe un mundo convergente con población mundial que llega a su máximo a mediados del siglo XXI y luego decrece como en el escenario A1, pero con un cambio rápido en la estructura económica, el énfasis es en soluciones globales a la economía, sustentabilidad ambiental y social, incluyendo equidad, pero sin iniciativas climáticas adicionales.
- *Escenario COMMITED (COM)*: cuenta con 17 GCM's para el periodo 2000 – 2100 en casi todos los modelos. Corresponde al escenario idealizado en que todos los países cumplen con las cuotas de emisiones de GEI bajo el protocolo de Kyoto, este escenario supone menor concentración de futura de GEI y es una idealización de lo que sucedería si todas las naciones se comprometieras con el medio.

Con la ecuación (3) se estimaron los valores relativos de cambio en los rendimientos potenciales y en el índice hídrico para saber cual factor da mayor impacto a la vulnerabilidad del cultivo al cambio climático.

Con la ecuación (4) se calcularon los rendimientos del cultivo de café variedad *C. Arabica* para los años  $Y^{2000}$  y  $Y^{2050}$ .

#### **4.5. Cálculo del rendimiento potencial**

El cálculo de la biomasa y el rendimiento potencial máximo  $Y_{máx}^j$  (en  $kg\ ha^{-1}$ ) del cultivo de café variedad *C. Arabica* 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 fisiológicamente activa. Para calcular el rendimiento potencial  $Y_{máx}^j$  se utilizó la ecuación (5):

$$Y_{máx}^j = Bn * IC \quad (5)$$

Donde:

$Y_{máx}^j$  corresponde al rendimiento potencial máximo o agroclimático de la materia seca económicamente aprovechable que pueden producir las plantas con un suministro adecuado de agua y nutrientes (en  $kg\ ha^{-1}$ ) en las condiciones de escenario climático actual ( $j= 2000$ ) y para los escenarios de cambio climático ( $j=2050$ ); Bn es la biomasa neta de la materia seca total (en  $kg\ ha^{-1}$ );

IC es el índice de cosecha o la fracción de Bn correspondiente al producto agrícola (adimensional). Los valores de IC fueron obtenidos de datos bibliográficos referentes al cultivo de café FAO-IIASA (2000).

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

$$Bn = \frac{0.36\ b_{gm}\ L}{1/n + 0.25\ C_t} \quad (6)$$

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  $kg\ ha^{-1}\ día^{-1}$ );  $b_{gm}$  depende principalmente de la concentración de  $CO_2$  en la atmósfera y de la radiación fotosintéticamente Activa.

n es la duración del ciclo normal del cultivo (en días). La metodología de la FAO-IIASA (2000), menciona que para café variedad *C. Arabica* la duración del ciclo es de 270 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 ( $\text{kg kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ).

L es la fracción de la tasa máxima de crecimiento del cultivo, por cobertura incompleta del terreno cuando el índice de área foliar IAF es menor de 5:  $\text{IAF} < 5$  (adimensional).

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

$$C_t = C_{30} (0.0044 + 0.0019 T + 0.001 T^2) \quad (7)$$

Donde:

T es la temperatura media mensual del aire durante el ciclo del cultivo.

$C_{30}$  es la tasa de pérdida de producción de biomasa bruta por la respiración de mantenimiento a  $30^\circ\text{C}$  (de 0.0108 para el cultivo de café).

El factor de corrección por cobertura incompleta del terreno (L) se calcula de la siguiente manera:

$$L = 0.3424 + 0.9051 \text{Log}_{10}(\text{IAF}) \text{ Si } \text{IAF} < 5 \quad \text{y} \quad L = 1 \quad \text{Si } \text{IAF} \geq 5 \quad (8)$$

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 siguientes expresiones:

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

$$b_{gm} = N (0.8 + 0.01P_m) b_o + (1 - N) (0.5 + 0.025 P_m) b_c \quad (9)$$

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

$$b_{gm} = N (0.5 + 0.025 P_m) b_o + (1 - N) 0.05 P_m b_c \quad (10)$$

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 el 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  $A_c$  (en  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) y de la radiación global de onda corta  $R_g$  ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ):

$$N = \frac{A_c - 0.5 R_g}{0.8 A_c} \quad (11)$$

La ecuación (11) 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 ( $A_c$ ).

La estimación de  $Y_{\text{máx}}^{2000}$  se realizó utilizando la información bibliográfica sobre IC,  $n$ , IAF, ruta fotosintética,  $P_m$ ,  $b_o$ ,  $b_c$  y datos regionales sobre inicio y duración del ciclo del cultivo de café en México obtenidos la publicación FAO-IIASA (2000) y la publicación de De Wit (1966).

Para la estimación de  $Y_{\text{máx}}^{2050}$  se consideró lo argumentado por Cure y Acock (1986) y Anthony y Ziska (2000), ellos mencionan que el IC prácticamente no depende del cambio climático, por tal motivo en este trabajo no se considera el cambio del IC. 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 del cultivo de café; la razón es que resulta 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 carencia de resultados de investigación que indiquen los valores de Grados Días Desarrollo para dicho cultivo. Los valores de  $P_m$  para café se obtuvieron de la literatura FAO-IIASA (2000). 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 relación  $Y_{\text{máx}}$  entre los rendimientos máximos a la mitad e inicio del siglo XXI:

$$Y_{\text{máx}} = \frac{Y_{\text{máx}}^{2050}}{Y_{\text{máx}}^{2000}} \quad (12)$$

Los valores de  $\frac{Y_{\text{máx}}^{2050}}{Y_{\text{máx}}^{2000}}$  posteriormente se han sustituido en la ecuación (3) para calcular el cambio relativo de los rendimientos reales:

$$\frac{\Delta Y}{Y^{2000}} = \frac{Y_{\text{cal}}^{2050} - Y_{\text{cal}}^{2000}}{Y_{\text{cal}}^{2000}} = \frac{Y_{\text{calc}}^{2050}}{Y_{\text{cal}}^{2000}} - 1 = \frac{Y_{\text{máx}}^{2050}}{Y_{\text{máx}}^{2000}} \frac{\text{ISNH}^{2050}}{\text{ISNH}^{2000}} - 1$$

#### 4.6. Cálculo del Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas (ISNH)

El ISNH es un índice hídrico, el cual caracteriza la disponibilidad de agua en el suelo para los cultivos durante su crecimiento, y el cual depende de la relación entre los valores mensuales de precipitación y la evapotranspiración potencial, variando de cero a uno. El ISNH tiene una relación muy estrecha con el rendimiento alcanzado por los cultivos, ya que evalúa el grado de satisfacción de requerimiento de humedad en las etapas de desarrollo. Este índice se calculó a través del balance de agua en la zona radical, con la ecuación propuesta por Frére y Popov (1986):

$$\text{ISNH}_i^j = \text{ISNH}_{i-1}^j - \frac{\text{DEF}_i^j}{i_{\text{NH}}^j} \quad (13)$$

Donde:

$\text{ISNH}_i^j$  es el Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas del mes  $i$  en el año  $j$ .

$\text{ISNH}_{i-1}^j$  es el ISNH del mes anterior en el mismo año.

$\text{DEF}_i^j$  es el valor absoluto de la Deficiencia de Humedad en el mes  $i$  del año  $j$ .

$\sum_{i=1}^m NH^j$  es la suma de las Necesidades Hídricas de todo el ciclo del cultivo con la duración igual a la suma de meses  $i$  igual a  $m$  en el año  $j$ .

Se requirió de información climática, del cultivo de café y de suelo. En el presente trabajo se ignoró el escurrimiento superficial y se consideró el balance de agua en la zona radical del perfil del suelo (a 70 cm de profundidad). Para calcular el balance hídrico en la zona radical fue necesario obtener la evapotranspiración real ( $ET_{real}$ ), la cual depende de la evapotranspiración potencial ( $ET_p$ ) y la humedad del suelo. También fue necesario conocer el valor del intercambio de agua entre la zona radical y el estrato inferior, pero por lo complicado del cálculo y por su pequeño valor, frecuentemente este valor de intercambio se ignora en los cálculos del balance hídrico del suelo, por tal motivo en el presente estudio se ignora dicho valor.

Al final de la estación de crecimiento, el índice agrometeorológico reflejará el esfuerzo acumulativo soportado por el cultivo a través de los excesos y déficits de agua. Y por lo general éste índice tiene estrecha relación con el rendimiento final del cultivo, al menos que algunos elementos perjudiciales, que no toma en cuenta el método, se hayan presentado durante el crecimiento del mismo, como fuertes vientos, plagas o inundaciones, entre otros. El método no toma en cuenta los períodos críticos del cultivo.

#### **4.7. Necesidad Hídrica (NH) del cultivo de café**

La Necesidad Hídrica del cultivo de café variedad *C. arabica* se calculó con la siguiente expresión:

$$NH = \sum_{i=1}^m ET_i^x * K_i^c \quad (14)$$

Donde:

$ET_i^x$  es la evapotranspiración del cultivo de referencia (pasto) en el mes  $i$  y año  $j$  (mm).

$K_i^c$  es el coeficiente de transferencia de pasto al cultivo de café en el mes  $i$  (adimensional).

$m$  corresponde al número de meses del ciclo del cultivo de café.

El ciclo del cultivo de café corresponde a 270 días reportado por FAO – IIASA (2000), estos días cubren el periodo del 15 de febrero al 15 de noviembre, en el cual la planta tiene su producción de biomasa.

El concepto de evapotranspiración de referencia  $ET_i^x$  se introdujo para estudiar la demanda evaporativa de la atmósfera independientemente del tipo de cultivo, el desarrollo de cultivos y las prácticas de manejo. Los únicos factores que afectan  $ET_i^x$  son los parámetros climáticos. En consecuencia,  $ET_i^x$  es un parámetro climático y debido a la dificultad de obtener mediciones de campo precisas,  $ET_i^x$  se calculó a partir de datos meteorológicos.

Una gran cantidad de ecuaciones empíricas o semi-empíricas se han desarrollado para determinar la evapotranspiración del cultivo o de referencia utilizando datos meteorológicos. Algunos de los métodos son solamente válidos para condiciones climáticas y agronómicas específicas y no se pueden aplicar bajo condiciones diferentes de las que fueron desarrolladas originalmente. Numerosos investigadores han analizado el funcionamiento de varios métodos del cálculo para diversas localidades. Como resultado de una consulta de expertos llevada a cabo en mayo de 1990, el método FAO Penman-Monteith se recomienda actualmente como el método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia,  $ET_i^x$  (FAO, 2006).

Para el cálculo de la evapotranspiración de referencia  $ET_i^x$  se utilizó el programa llamado “*ET<sub>i</sub><sup>x</sup> Calculator*” de la FAO (FAO, 2006). El programa evalúa la  $ET_i^x$  a partir de datos meteorológicos por medio de la ecuación de Penman-Monteith. La importancia de este método es que se aproxima a los valores obtenidos de un lugar en evaluación; explícitamente incorpora parámetros fisiológicos y aerodinámicos.

La evapotranspiración de un cultivo es diferente a la del cultivo de referencia ( $ET_i^x$ ) en la medida en que sus características de cobertura del suelo, propiedades de la vegetación y resistencia aerodinámica difieran de las correspondientes al pasto. Los efectos de las características que distinguen al cultivo del pasto están incorporados en el coeficiente del cultivo ( $K_i^c$ ). El valor de  $K_i^c$  varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, variando solo en una pequeña proporción en función del clima. Esto permite la transferencia de valores estándar del coeficiente del cultivo entre distintas áreas geográficas y climas. Este hecho constituye la razón principal de la aceptación general y utilidad de la metodología del coeficiente del cultivo, así como de los valores de  $K_i^c$  desarrollados en estudios anteriores (FAO, 2006).

En el presente estudio se utilizaron los valores de  $K_i^c$  de cultivo reportados por FAO, 2006. Para el cultivo de café se reportan valores de  $K_i^c = 1.1$  en todo el ciclo del cultivo; por tal motivo se utilizó este valor como constante para realizar los cálculos necesarios.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Verificación del nivel de confiabilidad de los cálculos del rendimiento de café

Para verificar la confiabilidad de los cálculos de rendimiento, en la Figura 2 los rendimientos medios reales de café  $Y_{real}^{2000}$  (en kg/ha/año de café cereza) producidos en un periodo de 7 años a principios del siglo XXI en los municipios que conforman la zona centro del estado de Veracruz (SIAP, 2003-2010) se compararon con los rendimientos  $Y_{calc}^{2000}$  calculados (en kg/ha/año de café cereza) con información meteorológica y los datos estimados de los componentes de la fórmula de cálculo del rendimiento:  $Y_{m\acute{a}x}$  y el ISNH.

Los valores de los rendimientos en la Figura 2 son adimensionales, presentados como fracción de los rendimientos máximos observados ( $Y_{real}^{m\acute{a}x}$ ) o calculados ( $Y_{calc}^{m\acute{a}x,2000}$ ), donde  $Y_{real}^{m\acute{a}x,2000}$  es el máximo rendimiento (en kg/ha/año de café cereza) observado en promedio del período del 2003 al 2010 entre 47 sitios de referencia analizados en el estado de Veracruz y  $Y_{calc}^{m\acute{a}x,2000}$  es el máximo rendimiento (en kg/ha/año de café cereza) calculado para cada uno de los mismos 47 sitios con los datos meteorológicos disponibles promedio anuales al principio del siglo XXI correspondientes a cada región cafetalera de referencia. Los sitios de referencia fueron seleccionados a manera de abarcar la mayor parte de las regiones productoras de café y que en esos sitios se encontrara alguna estación meteorológica.

Los valores adimensionales de  $\frac{Y_{real}}{Y_{real}^{m\acute{a}x,2000}}$  y  $\frac{Y_{calc}}{Y_{calc}^{m\acute{a}x,2000}}$  se graficaron en las Figuras 2 y

3. En la Figura 2 la relación entre  $\frac{Y_{real}}{Y_{real}^{m\acute{a}x,2000}}$  y  $\frac{Y_{calc}}{Y_{calc}^{m\acute{a}x,2000}}$  se presenta en forma directa

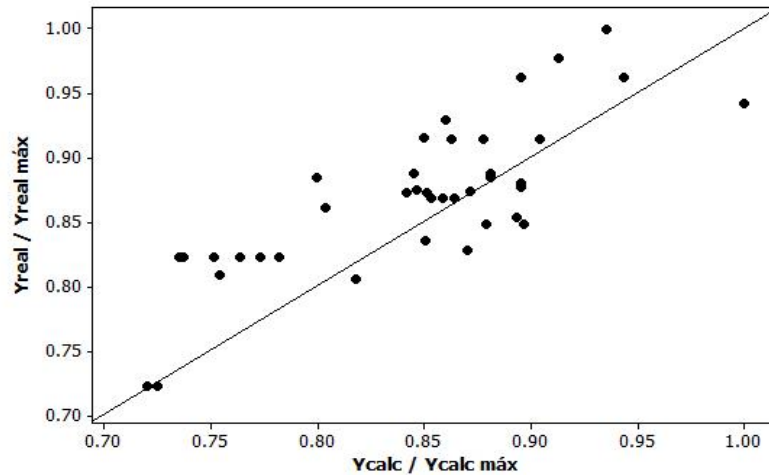
de la línea recta:

$$\frac{Y_{real}}{Y_{real}^{m\acute{a}x,2000}} = \frac{Y_{calc}}{Y_{calc}^{m\acute{a}x,2000}} \quad (15)$$

Donde:

$Y_{\text{calc}}$  es la variable y  $Y_{\text{real}}$  es la función. El coeficiente de correlación entre  $\frac{Y_{\text{real}}}{Y_{\text{real}}^{\text{máx}_2000}}$  y  $\frac{Y_{\text{calc}}}{Y_{\text{calc}}^{\text{máx}_2000}}$  en la Figura 2 es igual a 81% con un error estándar  $\sigma = 0.05$ .

Tal coeficiente de correlación significa que los cálculos de los rendimientos del cultivo de café en el presente trabajo son confiables.



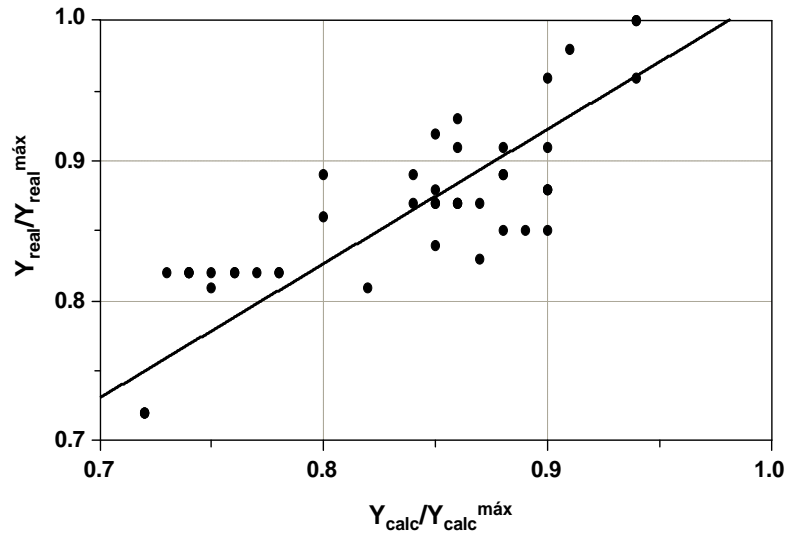
**Figura 2.** Comparación de los rendimientos del cultivo de café calculados ( $Y_{\text{calc}} / Y_{\text{calc}}^{\text{máx}_2000}$ ) y rendimientos reales ( $Y_{\text{real}} / Y_{\text{real}}^{\text{máx}_2000}$ ) obtenidos en el registro del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) en municipios de la zona centro del estado de Veracruz que forman parte de las regiones productoras. La gráfica se escribe con la ecuación (15).

En la Figura 3 se muestra la recta de mejor ajuste de la relación entre  $\frac{Y_{\text{real}}}{Y_{\text{real}}^{\text{máx}_2000}}$  y  $\frac{Y_{\text{calc}}}{Y_{\text{calc}}^{\text{máx}_2000}}$ . El tratamiento estadístico de la relación entre  $\frac{Y_{\text{calc}}}{Y_{\text{calc}}^{\text{máx}_2000}}$  y  $\frac{Y_{\text{real}}}{Y_{\text{real}}^{\text{máx}_2000}}$  en la Figura 3 se realizó con el programa CurvExpert, versión 1.34 (Hyams, 1997) lo que permitió obtener la siguiente ecuación lineal:

$$\frac{Y_{\text{real}}}{Y_{\text{real}}^{\text{máx}_2000}} = 0.04 + 0.96 \frac{Y_{\text{calc}}}{Y_{\text{calc}}^{\text{máx}_2000}} \quad (16)$$

con el coeficiente de correlación mejor que el anterior:  $r = 0.96$  y con el error estándar  $\sigma = 0.04$ . Esto significa que los cálculos de los rendimientos del cultivo de café son bastante confiables. Los valores de  $Y_{\text{real}}^{\text{máx}_2000}$  y  $Y_{\text{calc}}^{\text{máx}_2000}$  son los siguientes:  $Y_{\text{real}}^{\text{máx}_2000} = 2480$  kg/ha/año y  $Y_{\text{calc}}^{\text{máx}_2000} = 2547$  kg/ha/año.





**Figura 3.** Comparación de los rendimientos del cultivo de café calculados ( $Y_{\text{calc}} / Y_{\text{calc}}^{\text{máx}_2000}$ ) y rendimientos reales ( $Y_{\text{real}} / Y_{\text{real}}^{\text{máx}_2000}$ ) en municipios de la zona centro del estado de Veracruz. La gráfica se escribe con la ecuación (16).

Los valores dimensionales de  $Y_{\text{real}}$  se pueden obtener de la relación (16) en la siguiente forma:

$$Y_{\text{real}} = 0.04 Y_{\text{real}}^{\text{máx}_2000} + 0.96 Y_{\text{calc}} \frac{Y_{\text{real}}^{\text{máx}_2000}}{Y_{\text{calc}}^{\text{máx}_2000}} \quad (\text{kg/ha/año}) \quad (17)$$

Donde:

$$Y_{\text{real}}^{\text{máx}_2000} = 2480 \text{ kg/ha/año} \text{ y } Y_{\text{calc}}^{\text{máx}_2000} = 2547 \text{ kg/ha/año.}$$

La expresión (17) se puede también reescribir en la forma siguiente:

$$Y_{\text{real}} = 99.2 + 0.93 Y_{\text{calc}} \quad (\text{kg/ha/año}) \quad (18)$$

Donde:

La estimación de vulnerabilidad del cultivo de café al cambio climático se hizo a nivel del año 2050 utilizando como criterio el cambio relativo del rendimiento

calculado  $\frac{Y_{\text{calc}}^{2050}}{Y_{\text{calc}}^{2000}}$  mencionado en la ecuación (3). Entonces, para estimar la

vulnerabilidad real  $\frac{Y_{\text{real}}^{2050}}{Y_{\text{real}}^{2000}}$  es necesario determinar la relación calculada  $\frac{Y_{\text{calc}}^{2050}}{Y_{\text{calc}}^{2000}}$ .

Realmente del análisis anterior basado en las Figuras 2 y 3 y la fórmula (16) de mejor ajuste entre  $\frac{Y_{real}^{2050}}{Y_{real}^{2000}}$  y  $\frac{Y_{calc}^{2050}}{Y_{calc}^{2000}}$  se concluye que:

$$\frac{Y_{real}^{2050}}{Y_{real}^{2000}} \cong \frac{Y_{calc}^{2050}}{Y_{calc}^{2000}} \quad (19)$$

ó

$$\frac{Y_{real}^{2050} - Y_{real}^{2000}}{Y_{real}^{2000}} \cong \frac{Y_{calc}^{2050} - Y_{calc}^{2000}}{Y_{calc}^{2000}} \quad (20)$$

Para comprobar las igualdades (19) y (20) vamos a presentar la fórmula (16) de la siguiente manera:

$$\frac{Y_{calc}}{Y_{calc}^{m\acute{a}x,2000}} = 1.04 \frac{Y_{real}}{Y_{real}^{m\acute{a}x,2000}} - 0.04 \quad (21)$$

Después presentamos la relación  $\frac{Y_{calc}^{2050}}{Y_{calc}^{2000}}$  en la forma siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{Y_{calc}^{2050}}{Y_{calc}^{2000}} &= \frac{\frac{Y_{calc}^{2050}}{Y_{calc}^{m\acute{a}x,2000}}}{\frac{Y_{calc}^{2000}}{Y_{calc}^{m\acute{a}x,2000}}} = \frac{1.04 \frac{Y_{real}^{2050}}{Y_{real}^{m\acute{a}x,2000}} - 0.04}{1.04 \frac{Y_{real}^{2000}}{Y_{real}^{m\acute{a}x,2000}} - 0.04} \cong \frac{\frac{Y_{real}^{2050}}{Y_{real}^{m\acute{a}x,2000}}}{\frac{Y_{real}^{2000}}{Y_{real}^{m\acute{a}x,2000}}} = \\ &= \frac{Y_{real}^{2050}}{Y_{real}^{2000}} \quad \text{ó} \quad \frac{Y_{real}^{2050}}{Y_{real}^{2000}} \cong \frac{Y_{calc}^{2050}}{Y_{calc}^{2000}} \end{aligned} \quad (22)$$

## 5.2. Sitios de referencia seleccionados, sus condiciones naturales y de cambio

Los cálculos de rendimientos del cultivo de café variedad *C. Arabica* se realizaron para 47 sitios de referencia del estado de Veracruz para los cuales existe información climatológica confiable a principios del siglo XXI, es decir, donde existen estaciones meteorológicas u observatorios. Los sitios de referencia se ubican entre latitudes de 18°36' a 20°4', en diferentes altitudes: de 25 a 3114 metros sobre el nivel del mar y se caracterizan por zonas con condiciones

climáticas diferentes: lluvioso tropical, seco y templado seco. Las precipitaciones promedio anuales varían entre 934.7 mm y 2845.7 mm. La temperatura media anual varía de 9.6 °C en Xico a 25 °C en Jalcomulco. La radiación global promedio anual varía de 4764.1 MJ m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup> en Totutla a 5955.7 MJ m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup> en Altotonga (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Condiciones climáticas de los municipios que integran las regiones cafetaleras seleccionadas para el pronóstico del cambio en el rendimiento del cultivo de café variedad *C. Arabica*.

Regiones cafetaleras	Municipios que integran las regiones cafetaleras	Rg <sup>2000</sup> (MJ m <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup> )	T <sup>2000</sup> (°C)	Pr <sup>2000</sup> (mm)
Atzalan	Altotonga	5955.7	14.2	1456.8
	Atzalan	5361.1	16.1	1947.3
	Jalacingo	5511.5	15.7	1678.5
	Las Minas	4828.5	17.9	1492.9
	Martínez de la Torre	5113.9	24	1859.5
Coatepec	Actopan	5771.4	24.9	934.7
	Coatepec	5775.4	18.7	1729.8
	Cosautlan de Carvajal	5265.5	19.8	2112
	Emiliano Zapata	5215.9	24	954.1
	Ixhuacan de los Reyes	5448.2	15.4	2839.7
	Jalcomulco	5657.2	25	1020.4
	Jilotepec	4897.8	19.4	1663.3
	Naolinco	5426.7	20	1326.7
	Teocelo	5351.5	20.6	2026.2
	Xalapa	5473.3	19.6	1372.8
Córdoba	Xico	5244	9.6	1578.2
	Coscomatepec	5444.6	17.2	2216.1
	Ixhuatlán del café	5790.9	20.2	1900.1
	Fortín	5480.5	21.9	2443.3
	Atoyac	5076.9	24.5	2116.7
Huatusco	Comapa	5394.5	23.1	1078.7
	Huatusco	5258.4	17.7	2084.7
	Tenampa	5038.7	19.8	1681.7
	Totutla	4764.1	18.7	2066
Misantla	Acatlan	5024.4	15.3	1442.2
	Misantla	4915.7	23.2	1990.3
	Vega de Alatorre	5948.5	24.2	1578.7
Tezonapa	Tezonapa	5568.8	24.7	2845.7

Nota: Los datos climáticos corresponden a los valores promedio anuales durante el periodo de 1981-2010 de la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional. Rg<sup>2000</sup> - radiación global, T<sup>2000</sup> - temperatura del aire y Pr<sup>2000</sup> - lámina de precipitación.

Para estimar la vulnerabilidad del cultivo de café al cambio climático durante el siglo XXI en los sitios de referencia mencionados anteriormente se calcularon los incrementos de las principales variables climáticas para el año 2050. Los datos climatológicos utilizados principalmente corresponden al ciclo de desarrollo del cultivo de café, para los cuatro escenarios climáticos en función de los escenarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera: A2, A1B, B1 y COM (Magaña, 2010).

Escenarios regionalizados para México, se han aplicado mediante el empleo de sistema SIECCRe (INE, 2010), en esta fuente se recomienda utilizar ante todo estos escenarios del cambio climático.

Los escenarios son de resolución temporal mensual y espacial de 50 km x 50 km. El Cuadro 3 se presenta los cambios esperados en la radiación global  $\Delta R_g$ , temperatura de aire  $\Delta T$  y precipitación  $\Delta Pr$  de acuerdo con los escenarios climáticos A2, A1B, B1 y COM a mitad del siglo XXI con relación a su inicio en las regiones cafetaleras mencionadas del estado de Veracruz en el Cuadro 2. Los datos más detallados correspondientes a cada sitio de referencia y ubicado dentro de cada región se presentan en el Anexo 1. Como se observa, la mayor similitud en el cambio de la temperatura y precipitación se presenta entre los escenarios A2, A1B y B1. El escenario COM da menor cambio de temperatura y mayor cambio de precipitación. Todos los escenarios resultan diferentes en el cambio de la radiación global. Sin embargo, considerando que los cambios en  $\Delta R_g$  son relativamente pequeños (dentro de 1%) se puede esperar que finalmente las predicciones de cambio del rendimiento de café a mitades del siglo XXI sean similares para los escenarios A2, A1B y B1.

Los datos del Cuadro 3 por lo general señalan que los cambios en la radiación global se esperan negativos en 3 regiones geográficas de referencia en la zona productora de café y varían en un rango de -0.01% a -0.43%. La temperatura media durante el ciclo del cultivo de café se incrementará para los cuatro escenarios, siendo en general mayores los obtenidos en el escenario A1B (de 6.8% a 8.8%) y menores los obtenidos con el escenario COM (de 2.9% a 4.1%). La precipitación promedio durante el ciclo del cultivo en los sitios de referencia

tiene pronósticos un tanto contradictorios; el escenario B1 pronostica en general aumentos en la precipitación de 0.2% a 1.3% mientras que el escenario de cambio climático COM pronostica decrementos de -4.3% a -7.2%.

**Cuadro 3.** Cambio en las variables climáticas ( $\Delta Rg$ ,  $\Delta T$  y  $\Delta Pr$ ) durante el ciclo de crecimiento del cultivo de café variedad *C. Arabica*, con alto nivel de insumos y en escenarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Sitios de referencia	Cambio climático: escenarios de emisiones de GEI											
	$\Delta Rg$ (%)				$\Delta T$ (%)				$\Delta Pr$ (%)			
	A2	A1B	B1	COM	A2	A1B	B1	COM	A2	A1B	B1	COM
Atzalan	-0.5	0.4	0.8	0.4	8.2	8.8	6.1	4.1	-1.5	-1.0	-1.4	-7.2
Coatepec	0.3	0.4	0.8	0.6	7.1	7.7	5.4	3.5	0.6	-0.5	1.3	-6.2
Córdoba	-0.3	0.5	0.7	-0.01	7.2	8.0	5.7	3.6	0.7	-0.2	1.3	-5.3
Huatusco	0.7	0.01	0.2	0.7	7.8	8.7	6.1	3.9	1.0	-0.3	1.4	-5.1
Misantla	0.3	-0.05	0.3	1.1	6.9	7.3	5.3	3.4	0.4	-0.5	0.2	-4.3
Tezonapa	0.9	0.3	1.3	1.0	6.2	6.8	4.9	2.9	0.6	-0.4	1.2	-5.2

Nota: Rg: Radiación global; T: temperatura del aire; Pr: precipitación;  $\Delta Rg = (Rg^{2050} - Rg^{2000})100 / Rg^{2000}$ ;  $\Delta T = (T^{2050} - T^{2000})100 / T^{2000}$ ;  $\Delta Pr = (Pr^{2050} - Pr^{2000})100 / Pr^{2000}$ ; Los símbolos 2000 y 2050 corresponden al inicio y a mediados del siglo XXI, respectivamente. Escenarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC): A2, A1B, B1 y COM.

Los pronósticos en las variables climáticas en general indican pequeña disminución en la radiación solar. Por otro lado, los pronósticos de la temperatura del aire tienden a aumentar, 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 de biomasa y grano, probablemente signifique una disminución en los rendimientos. Según los escenarios climáticos muestran incertidumbre en el cambio de la precipitación, lo que no permite comprender con claridad que va a pasar finalmente con el estrés hídrico.

### 5.3. Vulnerabilidad del rendimiento potencial

Se calculó el rendimiento del cultivo de café variedad *C. Arabica* con alto nivel de insumos durante su ciclo de desarrollo, equivalente a 270 días (del 15 de febrero al 15 de noviembre), éste se obtuvo utilizando el conjunto de Ecuaciones (2 – 14), para los sitios de referencia que integran las regiones cafetaleras de la zona centro del estado de Veracruz.

Los pronósticos de cambio climático en los rendimientos potenciales (es decir, máximos posibles) se realizó utilizando un modelo basado en principios ecofisiológicos ampliamente utilizado a escala regional y mundial por FAO-IIASA (2000). En este trabajo el modelo se aplicó en los diferentes sitios de referencia para los correspondientes escenarios climáticos en función de las emisiones de GEI del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC): A2, A1B, B1 y COM. El modelo fue alimentado con información relativa a características climáticas y del cultivo de café para el cálculo de la biomasa neta y el rendimiento. Esta información se relaciona con:

- El régimen de calor y radiación.
- El grupo de adaptación del cultivo para determinar la tasa aplicable de fotosíntesis máxima  $P_m$ .
- La tasa de fotosíntesis máxima.
- La longitud del ciclo de crecimiento.
- Longitud del periodo de formación del rendimiento.
- Índice de cosecha.

Los resultados del cálculo de los cambios en los rendimientos potenciales se muestran en el Cuadro 4. En este cuadro los cambios en los rendimientos potenciales están relacionados con una mayor fotosíntesis máxima,  $P_m$ , cambios en la radiación global y con los incrementos en las temperaturas ambientales, lo que podría provocar disminuciones en la productividad potencial, ya que se

perdería biomasa por respiración de mantenimiento durante el proceso de acumulación.

**Cuadro 4.** Cambios en la respuesta fisiológica ( $\Delta b_{rm}$ ) y productiva ( $\Delta Y_{m\acute{a}x}$ ) del cultivo de café variedad *C. Arabica* con alto nivel de insumos en condiciones de cambio climático.

Sitios de referencia	Cambio climático: escenarios de emisiones de GEI											
	$\Delta b_{gm}$ (%)				$\Delta b_{rm}$ (%)				$\Delta Y_{m\acute{a}x}$ (%)			
	A2	A1B	B1	COM	A2	A1B	B1	COM	A2	A1B	B1	COM
Atzalan	-0.4	0.1	0.2	0.1	15.3	16.8	12.3	7.3	1.5	2.3	2.2	1.0
Coatepec	0.1	0.2	0.5	0.2	10.7	11.9	9.5	5.3	-1.5	-1.7	-0.4	-0.2
Córdoba	-0.2	0.2	0.2	-0.1	11.4	13.1	9.8	5.0	-1.8	-1.5	-0.6	-0.7
Huatusco	0.3	0.1	0.8	0.4	15.1	16.5	16.9	6.9	0.1	-0.2	1.8	0.3
Misantla	-0.5	-0.7	-0.5	-0.2	9.1	9.8	7.1	4.5	-2.2	-2.3	-1.6	-0.5
Tezonapa	0.5	0.3	0.8	0.5	8.9	9.3	7.4	4.1	-3.0	-3.7	-2.0	-0.9

Nota:  $\Delta b_{gm}$ : cambios relativos en la tasa máxima de producción de biomasa bruta de un cultivo de referencia ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ),  $\Delta b_{gm} = (b_{gm}^{2050} - b_{gm}^{2000})100 / b_{gm}^{2000}$ ;  $\Delta b_{rm}$ : tasa promedio de pérdida de asimilación por respiración de mantenimiento durante el ciclo de crecimiento ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ),  $\Delta b_{rm} = (b_{rm}^{2050} - b_{rm}^{2000})100 / b_{rm}^{2000}$ ;  $\Delta Y_{m\acute{a}x}$  = cambios relativos en el rendimiento máximo del cultivo de café;  $\Delta Y_{m\acute{a}x} = (Y_{m\acute{a}x}^{2050} - Y_{m\acute{a}x}^{2000})100 / Y_{m\acute{a}x}^{2000}$ .

Según se muestra en el Cuadro 4, los escenarios climáticos permiten predecir en algunos sitios de referencia un aumento en las tasas respiratorias de 0.1 al 16.9 %, mientras que en otros sitios se predice una disminución menor de -0.1 al -0.7 %. El cambio climático global parece tener un efecto negativo sobre el rendimiento potencial del cultivo de café con alto nivel de insumos. Por ejemplo utilizando el escenario A2 permite estimar una disminución del rendimiento en cuatro sitios de referencia, estos van del -1.5% al -3.0%; mientras que en el escenario A1B se presenta únicamente un incremento del 2.3%. Para el escenario B1 se presentan disminuciones en los mismos sitios de referencia que el escenario A2, sólo que estos van de -0.4% a -2.0%. Finalmente el escenario COM presenta una ligera disminución en los rendimientos de cuatro sitios de referencia en un rango de -0.2% a -0.9%. Esto significa que el cambio climático significará una pequeña disminución en la producción de café de estos sitios, desde el punto de vista agroclimático. La productividad potencial de las zonas cafetaleras en el centro del estado de Veracruz parece tener sensibilidad al cambio climático al cambio de las variables de temperatura y radiación global. Sin

embargo la productividad potencial del cultivo de café está limitada por otros factores como el grado de fertilidad del suelo y la disponibilidad de agua.

#### 5.4. Cambio en el Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas (ISNH)

Se calculó el valor promedio del índice hídrico (ISNH) durante el ciclo que presenta el cultivo de café variedad *C. arabica* comenzando un mes antes del inicio del ciclo para considerar el agua almacenada en el suelo, por lluvias previas. El índice hídrico fue resultado de la media de los valores mensuales durante el ciclo de producción. De la misma manera se calcularon los índices hídricos a mediados del siglo XXI (ISNH<sup>2050</sup>) para los cuatro escenarios de emisiones de GEI.

Los valores de ISNH 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.

**Cuadro 5.** Cambios en el Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas ( $\Delta$ ISNH) del cultivo de café variedad *C. Arabica* con alto nivel de insumos en condiciones de cambio climático.

Sitios de referencia	Cambio climático: escenarios de emisiones de GEI			
	$\Delta$ ISNH (%)			
	A2	A1B	B1	COM
Atzalan	0.0	-6.8	1.9	1.3
Coatepec	-2.4	-6.0	-0.3	-6.1
Córdoba	1.6	-3.8	-0.6	-3.2
Huatusco	-2.1	-4.3	-1.5	-2.6
Misantla	2.2	-8.0	-2.9	1.3
Tezonapa	1.3	-4.6	-0.7	-4.6

Nota: Índice de Satisfacción de Necesidades Hídrica;  $\Delta$ ISNH =  $(\text{ISNH}^{2050} - \text{ISNH}^{2000}) * 100 / \text{ISNH}^{2000}$ . Los símbolos 2000 y 2050 corresponden al inicio y mediados del siglo XXI, respectivamente.

En el Cuadro 5 se observa el cambio del índice hídrico calculado para los escenarios de emisiones de GEI. El escenario A1B es el que presenta mayor porcentaje de disminución en el índice hídrico en las seis regiones cafetaleras el cual va de -3.8% a -8%. El escenario A2 es el que presenta menor cambio,



incluso sólo las regiones de Coatepec y Huatusco presentan decremento en el porcentaje del índice hídrico de -2.4% y -2.1%, respectivamente. Analizando el escenario B1 se observa que únicamente la región de Atzalan es la que presenta un ligero incremento en el índice hídrico de 1.9%. Por el contrario, para el escenario COM el decremento del índice hídrico se presenta en cuatro de las regiones cafetaleras en un rango de -2.6% a -6.1%.

### **5.5. Evaluación de la estimación de la vulnerabilidad del cultivo de café**

La estimación de la vulnerabilidad del cultivo de café variedad *C. Arabica* con alto nivel de insumos atribuible al cambio climático se realizó a través del cálculo de los rendimientos promedio anuales a principios del siglo XXI ( $Y_{\text{calc}}^{2000}$ ) y a mediados del mismo siglo ( $Y_{\text{calc}}^{2050}$ ), para 47 estaciones meteorológicas ubicadas dentro de las siete regiones productoras de café representativas de la zona centro del estado de Veracruz.

Los cambios en la productividad  $\Delta Y = Y_{\text{calc}}^{2050} - Y_{\text{calc}}^{2000}$  debido al cambio climático global se estimaron considerando cambio de los componentes particulares de la productividad del cultivo tales como: cambios en la productividad potencial ó biofísica y cambios en el balance hídrico agroclimático del agua en el suelo debidos. Los rendimientos  $Y_{\text{calc}}^{2050}$  y  $Y_{\text{calc}}^{2000}$  se han calculado con la ecuación (3).

Los escenarios climáticos utilizados para las estimaciones de cambios en la productividad fueron obtenidos mediante la aplicación de la herramienta estadística de *Predictibilidad del Clima (CPT)*, del Instituto Internacional para la Investigación del Clima y la Sociedad, de Estados Unidos (INE, 2010). Los escenarios son de resolución temporal mensual y espacial de 50 km x 50 km para el periodo 2000-2099 de los escenarios climáticos en función de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) A2, A1B, B1 y COMMITED.

Los cálculos de los cambios en la productividad del cultivo de café variedad *C. Arabica* se realizaron para los sitios de referencia, considerando datos de 47 estaciones meteorológicas. En el Cuadro 6 se presentan los cambios esperados en las componentes del rendimiento ( $\Delta Y_{\text{máx}}$ ,  $\Delta \text{ISNH}$  y  $\Delta Y_{\text{calc}}$ ) del cultivo de café a mediados del siglo XXI, según escenarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI): A2, A1B, B1 y COM (INE, 2010). Los datos más detallados correspondientes a cada sitio de referencia se presentan en los Anexos del 2 al 6.

**Cuadro 6.** Estimación de cambios en las componentes del rendimiento para el cultivo de café variedad *C. Arabica* a mediados del siglo XXI para los escenarios de cambio climático A2, A1B, B1 y COM.

Sitios de referencia	Cambio climático: escenarios de emisiones de GEI											
	$\Delta Y_{\text{máx}}$ (%)				$\Delta \text{ISNH}$ (%)				$\Delta Y_{\text{calc}}$ (%)			
	A2	A1B	B1	COM	A2	A1B	B1	COM	A2	A1B	B1	COM
Atzalan	1.5	2.3	2.2	1.0	0.0	-6.8	1.9	1.3	0.6	-6.7	1.5	2.8
Coatepec	-1.5	-1.7	-0.4	-0.2	-2.4	-6.0	-0.3	-6.1	-3.9	-7.2	-1.6	-5.9
Córdoba	-1.8	-1.5	-0.6	-0.7	1.6	-3.8	-0.6	-3.2	0.7	-6.0	-1.4	-1.1
Huatusco	0.1	-0.2	1.8	0.3	-2.1	-4.3	-1.5	-2.6	-2.0	-4.4	0.4	-2.3
Misantla	-2.2	-2.3	-1.6	-0.5	2.2	-8.0	-2.9	1.3	0.1	-10.5	-4.6	0.8
Tezonapa	-3.0	-3.7	-2.0	-0.9	1.3	-4.6	-0.7	-4.6	-1.8	-8.1	-2.7	-5.5

Nota:  $\Delta Y_{\text{máx}} = (Y_{\text{máx}}^{2050} - Y_{\text{máx}}^{2000})100/Y_{\text{máx}}^{2000}$ ;  $\Delta \text{ISNH} = (\text{ISNH}^{2050} - \text{ISNH}^{2000})100/\text{ISNH}^{2000}$ ;  $\Delta Y_{\text{calc}} = (Y_{\text{calc}}^{2050} - Y_{\text{calc}}^{2000})100/Y_{\text{calc}}^{2000}$ . Los símbolos 2000 y 2050 corresponden al inicio y mediados del siglo XXI, respectivamente.

El análisis del Cuadro 6 señala que:

- A nivel del año 2050 se espera principalmente la pérdida media de la producción de café variedad *C. Arabica* (de 7 a 10%) debido al crecimiento de las temperaturas y reducción de la precipitación. El cambio de la productividad en las regiones cafetaleras se estima dentro de los siguientes intervalos: Atzalan de +3 a -7%, Coatepec de -2 a -7%, Córdoba de +1 a -6%, Huatusco de 0 a -4%, Misantla de +1 a -10% y Tezonapa de -2 a -8%. Es decir, la mayor pérdida de cosecha se espera en la región Misantla (hasta 10%) y la menor en Huatusco (hasta 4%).

- Se presenta cierta diferencia entre los pronósticos del cambio del rendimiento final calculado ( $\Delta Y_{\text{calc}}$ ) para los escenarios climáticos A2, A1B, B1 y COM más confiables para México. En la mayoría de los sitios geográficos tomados de referencia se espera la disminución de la productividad del cultivo de café. Recordando la ecuación (4) para obtener el rendimiento calculado se observa evidentemente que los escenarios A1B y COM son los que presentan alto porcentaje en la disminución del rendimiento calculado.
- Existe cierta congruencia entre el cambio esperado en los rendimientos máximos ( $\Delta Y_{\text{máx}}$ ) para los escenarios de emisiones del cambio climático. El escenario A1B es el que presenta notablemente disminución en el rendimiento máximo en cinco de las regiones cafetaleras variando de -3.7% a -0.2%; mientras que en el escenario COM no se refleja mucho el decremento en porcentaje.

Para calcular la aportación del  $\Delta \text{ISNH}$  y  $\Delta Y_{\text{máx}}$  en  $\Delta Y_{\text{calc}}$  se puede considerar que la suma de aportaciones del cambio de  $\Delta \text{ISNH}$  y  $\Delta Y_{\text{máx}}$  es igual a  $\Delta Y_{\text{calc}}$ . Entonces

$\frac{\Delta Y_{\text{máx}}}{\Delta Y_{\text{calc}}} + \frac{\Delta \text{ISNH}}{\Delta Y_{\text{calc}}} = 1$ . Tomando del Cuadro 6 por ejemplo  $\Delta Y_{\text{máx}} = -1.5\% = -0.015$ ;

$\Delta \text{ISNH} = -2.4\% = -0.024$  y  $\Delta Y_{\text{calc}} = -3.9\% = -0.039$ , tenemos  $\frac{\Delta \text{ISNH}}{\Delta Y_{\text{calc}}} = 0.62 = 62\%$  y

$\frac{\Delta Y_{\text{máx}}}{\Delta Y_{\text{calc}}} = 0.38 = 38\%$ .

Otro ejemplo:  $\Delta Y_{\text{máx}} = -3.0\% = -0.030$ ;  $\Delta \text{ISNH} = +1.3\% = +0.012$  y  $\Delta Y_{\text{calc}} = -1.8\% = -0.018$ . En este caso, donde los signos de los componentes  $\Delta Y_{\text{máx}}$  y

$\Delta \text{ISNH}$  son diferentes, es necesario de la relación  $\frac{\Delta \text{ISNH}}{\Delta Y_{\text{calc}}}$  ó  $\frac{\Delta Y_{\text{máx}}}{\Delta Y_{\text{calc}}}$  mayor de 1, restar

1; y restar de 1 la relación  $\frac{\Delta \text{ISNH}}{\Delta Y_{\text{calc}}}$  ó  $\frac{\Delta Y_{\text{máx}}}{\Delta Y_{\text{calc}}}$  menor de 1.

Entonces, tenemos  $\frac{\Delta \text{ISNH}}{\Delta Y_{\text{calc}}} = -0.7 + 1 = 0.3 = 30\%$  y  $\frac{\Delta Y_{\text{máx}}}{\Delta Y_{\text{calc}}} = +1.7 - 1 = 0.7 = 70\%$ .

En forma global se puede concluir que la aportación del cambio del Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas del cultivo de café es significativo y se estima a nivel de 60-70% del cambio del rendimiento. Los 30% corresponden al cambio del rendimiento máximo  $Y_{m\acute{a}x}$ . El cambio del ISNH es relativamente más notable para el escenario climático A1B, el cual apunta hacia un decremento en todas las regiones cafetaleras del índice hídrico que va de -3.8% a -8.0%.

En México se cuenta con la estimación de la vulnerabilidad del cultivo de café al cambio climático global realizada por Gay *et al.*, (2004) mediante la aplicación de un modelo empírico de regresión, el cual considera los factores climáticos e integra la variable económica de salarios. Según este estudio se espera una reducción del 73 al 78% en la producción de café de acuerdo a los modelos HadCM2 (Hadley Centre) y ECHAM4 (Modelos de pronóstico del European Centre for Medium-Range Wather Forecasts, modificados y extendidos en Hamburgo) para todo el estado de Veracruz, no utilizados en nuestra investigación.

La diferencia que existe entre los resultados que presenta Gay *et al.*, (2004) y los obtenidos en el presente estudio se puede deber a las diferencias en las predicciones del clima, ya que en el estudio de dicho autor consideran únicamente los modelos HadCM2 y ECHAM4 basados únicamente en el escenario de emisiones de A2, mientras que en el presente estudio los escenarios climáticos en función de emisiones de gases de efecto invernadero están integrados de 17 a 24 Modelos de Circulación General de la atmósfera. Además de que en su estudio para simular la variabilidad futura en las series climáticas, utilizaron un generador de números aleatorios de datos observados de 1969 – 1998. Otro factor importante que causa diferencia en los resultados se debe a que el modelo del autor integra la variable económica de salarios, que representa el 80% de los costos de producción del café, así como la temperatura de invierno y de verano, y la precipitación en primavera; mientras que en dicho estudio la variable económica no fue considerada.

El resultado que nos dan los cambios en la productividad en el presente trabajo cuando se considera el escenario A1B se debe a que en dicho escenario se

presenta un aumento en la temperatura media, lo que conlleva a una disminución de hasta -10.5% de la producción para la región de Misantla.

#### **5.6. Mapas de cambios en la productividad del cultivo de café en la zona centro del estado de Veracruz**

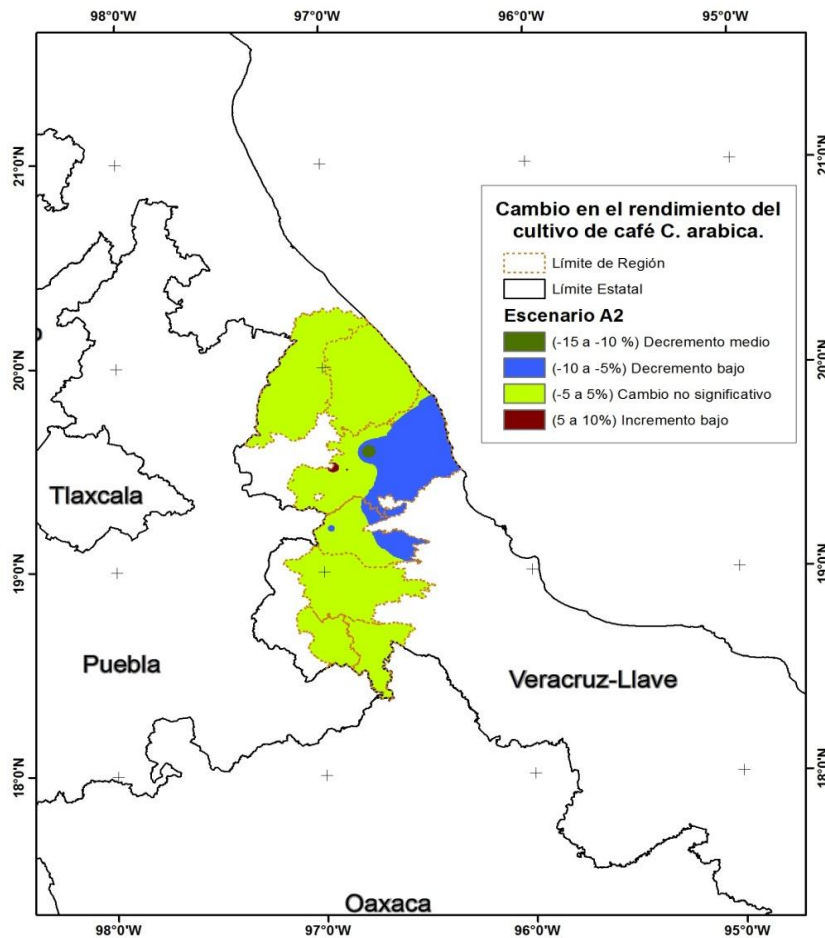
Los pronósticos de cambio en la productividad del cultivo de café variedad *C. Arabica* (Cuadro 6), se pueden expresar en un mapa de gran escala para dar una idea general sobre la estructura espacial de los cambios y en forma un tanto provisional la problemática relacionada con los impactos del cambio climático sobre la productividad de este cultivo de gran importancia a nivel 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 siembra o cosecha 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 representa una primera aproximación a la representación espacial de los pronósticos de cambio en el rendimiento del cultivo de café variedad *C. Arabica* con un nivel alto de insumos utilizando los escenarios climáticos relacionados con diferentes escenarios de las posibles emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y la metodología de pronóstico de cambio en rendimientos realizada 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 lluvia (donde por ejemplo los escenarios difieren hasta en el signo de cambio) hasta los debidos a estimaciones de variables como la radiación global, se considera que cambios en los rendimientos en el intervalo comprendido entre (+5 a -5 %) no son significativos.

Considerando la propia naturaleza del índice hídrico, 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 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 del cultivo de café en el sitio.

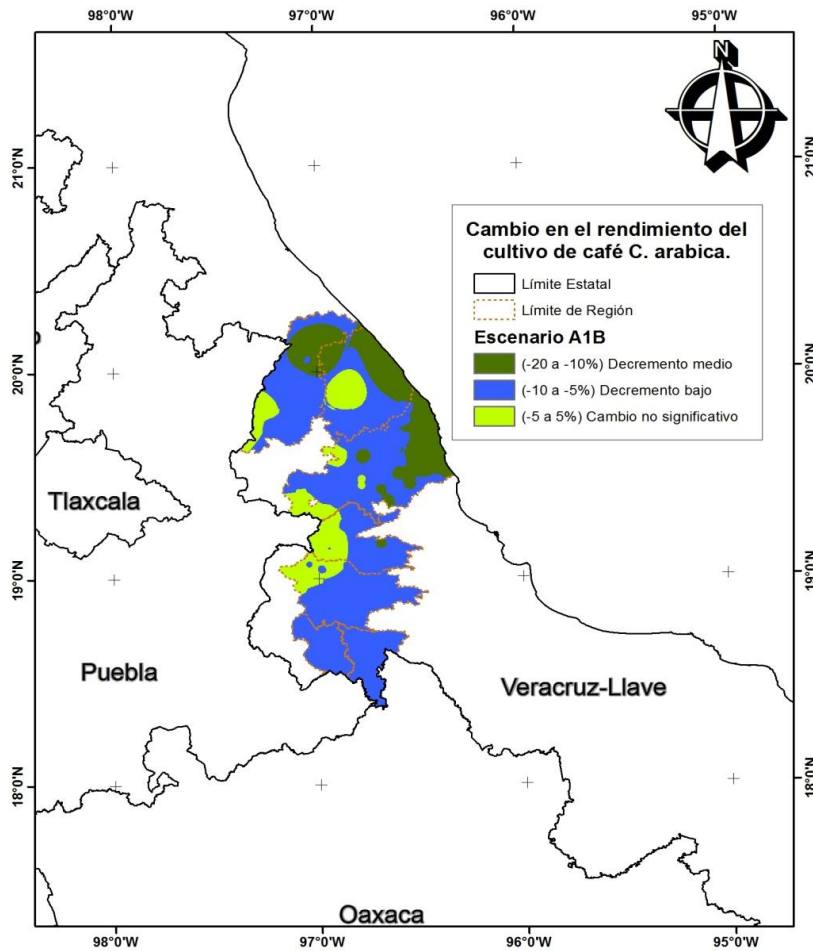
La serie de mapas de las Figuras 4 – 7 muestran en general una parte considerable del territorio a nivel estatal con pronósticos de cambio de la productividad agrícola del cultivo de café variedad *C. Arabica* con cuatro escenarios climáticos de emisiones de gases de efecto invernadero a mediados del siglo XXI (2050). Lo que se nota es que según este trabajo se espera menor vulnerabilidad del cultivo de café al cambio climático en comparación con los pronósticos hechos anteriormente por Gay *et al.* (2004), lo que puede explicarse por razón del uso en este trabajo de un modelo diferente de estimación en 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.

Es importante mencionar que en los mapas que a continuación se presentan se incluyó la región de Zongolica (región sin estación meteorológica), en donde se interpoló el cambio de los rendimientos en base a las estaciones que inciden sobre las regiones de Córdoba y Tezonapa.



**Figura 4.** Cambios en la productividad del cultivo de café variedad *C. Arabica* en la zona centro del estado de Veracruz, utilizando el escenario climático A2.

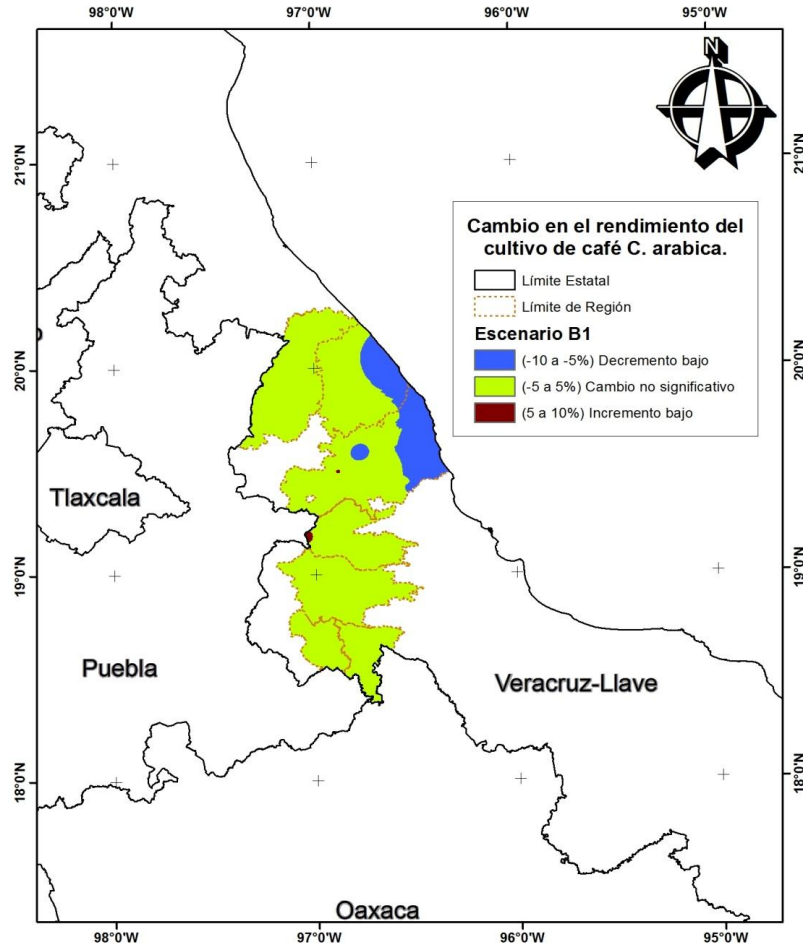
La Figura 4 muestra los probables impactos sobre la productividad del cultivo de café que puede tener el escenario climático A2. Este escenario pronostica cambios positivos en precipitación y en la temperatura del aire lo que permite concluir que de darse este escenario los cambios dominantes en la mayor parte de las regiones cafetaleras de la zona centro del estado de Veracruz serian no significativos. Si los incrementos en la temperatura son pequeños pero se presentan decrementos en la precipitación como pronostica el escenario para algunas regiones, en estas mismas regiones podría presentarse un incremento bajo pero significativo en los rendimientos, sobre todo hacia el Este de las regiones. Cabe mencionar que sobre la región de Coatepec se presenta una pequeña área con incremento bajo.



**Figura 5.** Cambios en la productividad del cultivo de café variedad *C. Arabica* en la zona centro del estado de Veracruz, utilizando el escenario climático A1B.

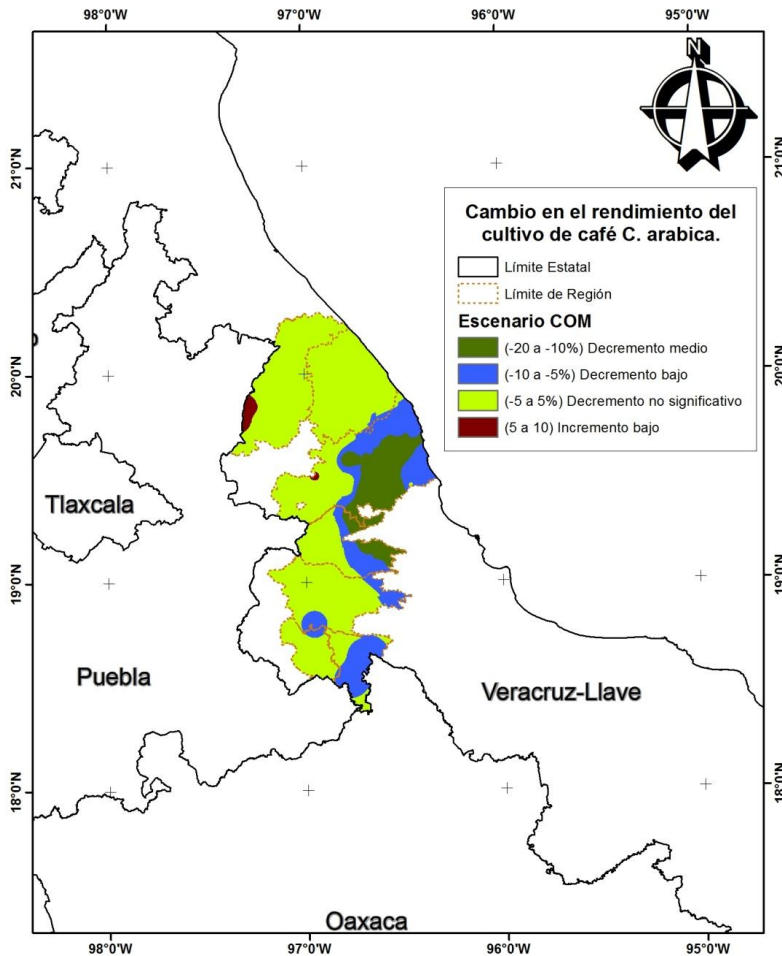
Para el caso del escenario climático A1B de emisiones de GEI se tienen pronósticos contrarios en los rendimientos en una amplia franja que recorre todas las regiones cafetaleras. El escenario permite pronosticar decrementos bajos, lo que claramente muestra la restricción debida a la necesidad de un mejor balance de humedad. Algunas zonas hacia el Este de las regiones, muestran decremento medio y en pocos sitios de referencia nos permiten observar pronósticos de cambios no significativos debido a que estos no tienen cambios importantes en sus pronósticos en el ciclo de crecimiento (Figura 5).





**Figura 6.** Cambios en la productividad del cultivo de café variedad *C. Arabica* en la zona centro del estado de Veracruz, utilizando el escenario climático B1.

En la Figura 6 se observa que en el escenario climático 1B de emisiones de GEI, los rendimientos no tienen cambio significativo en la mayor parte de las regiones debido a que la precipitación presenta incrementos, incluso mayores al escenario A2 y la temperatura se tienen incrementos un poco más bajos que el escenario A2, lo que produce que no existan cambios significativos. Se observan también decrementos bajos sobre algunos puntos de las regiones donde la precipitación tiende a disminuir.



**Figura 7.** Cambios en la productividad del cultivo de café variedad *C. Arabica* en la zona centro del estado de Veracruz, utilizando el escenario climático COM.

La Figura 7 muestra los probables impactos sobre la productividad del cultivo de café que puede tener el escenario climático idealizado COM de emisiones de GEI, el cual pronostica mayor disminución sobre la precipitación comparado con los escenarios A2, A1B y B1 en todas las regiones cafetaleras lo que provoca que existan zonas donde se presenten decrementos medios. Si los incrementos en las temperaturas son un poco más pequeños y se presenta un decremento en la precipitación se presentan sitios donde el decremento es bajo. La mayor parte de las regiones presentan un cambio no significativo. Es importante mencionar que en la región de Atzalan bajo este escenario de cambio climático se podría llegar a tener incrementos bajos en la parte de dicha región.

## **5.7. Medidas de mitigación del deterioro de la productividad agrícola por el cambio climático global**

Las medidas de mitigación o adaptación para la producción agrícola del cultivo de café variedad *C. Arabica* es necesario desarrollar en los sitios donde aparentemente un cambio en el clima puede resultar benéfico en algunos sentidos. Por ejemplo, en la región de Huatusco, actualmente está considerada como una región de siembra óptima. Entonces, un incremento en las temperaturas reduciría probablemente el inicio de la floración y la etapa de maduración del fruto, apuntando a un descenso en la producción de café en la región (Villers *et al.* 2009). 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 agua.

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 cortinas rompevientos, algunas otras especies forestales que sirvan de sombra para el cultivo, variedades de café más resistentes al estrés hídrico y al calor, ó posiblemente el intercalado con otros cultivos.

De manera general, se pueden considerar los casos de pérdida potencial de cosecha del cultivo de café por incremento de la temperatura del aire y principalmente por el cambio en las precipitaciones.

De manera resumida se sugiere que para las regiones donde se espera decremento de la precipitación se puedan recomendar las siguientes medidas de mitigación del cambio climático (CP-UACH, 1991):

- Aumentar infiltración de agua al suelo reduciendo escurrimiento superficial. Esta medida se realiza a través de la formación de surcos y bordos transversales a la pendiente (microcuencas) y/o aflojando periódicamente

el suelo (este puede causar la erosión hídrica). Para plantaciones cafetaleras es recomendable hacer microcuencas.

- Reducir la pérdida del agua en procesos de evaporación de la superficie del suelo. Para esto la superficie del suelo puede ser cubierta con hojarasca. Tal medida también es viable para plantaciones cafetaleras.
- Se pueden hacer los drenes topos en la profundidad de 25 a 40 cm en dirección transversal a la pendiente superficial.
- Teóricamente se puede reducir la pérdida de agua a través de infiltración profunda; pero esta medida no es práctica debido a que es difícil de realizarla.

En casos de aparición de las lluvias torrenciales se recomienda realizar las medidas para prevenir la inundación posible de los terrenos y exceso temporal de la humedad del suelo estableciendo interceptores (surcos y bordos) de agua superficial en la parte superior de las cafetaleras, así mismo, se pueden eliminar las micro depresiones para que no se formen charcos en ellas y estableciendo surcos, los cuales van a desalojar excesos de agua superficial.

El conjunto de medidas de mitigación propuestas, para obtener un mayor nivel de adopción por los agricultores deberá ser acorde a su situación económica, sin ser contradictorias a las políticas de desarrollo agropecuario regional, 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 realiza nada al respecto.

Las medidas de mitigación o adaptación deben ser implementadas desde un corto plazo y con beneficios concretos aún cuando el escenario pronosticado se presente o no. Con esto nos referimos a que se tiene que edificar una cultura de acciones a corto plazo que permita afrontar los problemas que podrían agudizarse a largo plazo.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

- La evaluación de la vulnerabilidad de la producción del cultivo de café variedad *C. Arabica* en la zona centro del estado de Veracruz atribuible a los escenarios climáticos realizada mediante aplicación del modelo teórico fenomenológico de desarrollo del cultivo en función de sus características biológicas y las características climáticas, señala que a nivel del año 2050 existe el riesgo de la pérdida media de la producción de café variedad *C. Arabica* (de 7 a 10%) debido al aumento de las temperaturas y disminución de la precipitación.
- Los cálculos del rendimiento del cultivo de café variedad *C. Arabica* con este modelo a principios del siglo XXI y comparación de los resultados con los datos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) señalan que son bastante confiables. El coeficiente de correlación entre los rendimientos calculados y observados realmente es igual a 0.96 y con error estándar igual a 0.04.
- La aportación del cambio del Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas del cultivo de café (ISNH) es significativo y se estima a nivel de 70% del cambio del rendimiento.
- Se comprobó la hipótesis de que el modelo fenomenológico basado en principios agroecológicos y en un número reducido de variables climáticas se puede utilizar como herramienta para predecir la vulnerabilidad de la productividad del cultivo de café variedad *C. Arabica* ante escenarios de cambio climático.
- Los resultados de este trabajo indican que se espera menor vulnerabilidad del cultivo de café variedad *C. Arabica* en comparación con los pronósticos hechos anteriormente por Gay *et al.* (2004); lo que puede ser 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. Otra diferencia que puede existir entre los resultados de Gay *et al.*, (2004) y los obtenidos en el presente estudio se puede deber a las diferencias en las predicciones del clima, ya que en el estudio de dicho autor consideran únicamente los modelos HadCM2 y ECHAM4 basados únicamente en el escenario de emisiones de A2, mientras que en este trabajo los escenarios climáticos en función de emisiones de gases de efecto invernadero están integrados de 17 a 24 Modelos de Circulación General de la atmósfera.

## 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 del cultivo de café y otros cultivos de importancia nacional considerando otros estados de la República Mexicana 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 más recientes, los cuales se supone deben publicarse posteriormente y en los cuales debería resolverse el problema del pronóstico más confiable de cambio en la variable de precipitación.
  
- Realizar estimaciones de la vulnerabilidad del cultivo de café para zonas importantes productoras en México, considerando:
  - Composición de variedades de importancia en la zona.
  - Los cambios en la fenología del cultivo considerando los grados días de desarrollo.

- Introduciendo el probable impacto de las principales plagas y malezas agrícolas utilizando el conocimiento de sus ciclos biológicos.
  - Llevar a cabo 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 agrícola.
- De manera resumida, considerando los resultados del presente trabajo de investigación, para poder prevenir la pérdida de la cosecha por el cambio climático global, se pueden recomendar algunas medidas de mitigación, entre las que destacan:
    - Aumentar infiltración de agua al suelo reduciendo escurrimiento superficial. Esta medida se realiza a través de la formación de surcos y bordos transversales a la pendiente (microcuencas) y/o aflojando periódicamente el suelo (este puede causar la erosión hídrica). Para plantaciones cafetaleras es recomendable hacer microcuencas.
    - Reducir la pérdida del agua en procesos de evaporación de la superficie del suelo. Para esto la superficie del suelo puede ser cubierta con hojarasca. Tal medida también es viable para plantaciones cafetaleras.
    - Se pueden hacer los drenes topos en la profundidad de 25 a 40 cm en dirección transversal a la pendiente superficial.
    - Teóricamente se puede reducir la pérdida de agua a través de infiltración profunda; pero esta medida no es práctica debido a que es difícil de realizarla.

## 7. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Adger W.N. 2006 Vulnerability. *Global Environmental Change Part A: Human & Policy Dimensions* 16:268-281. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006.

Adger W.N., and Kelly P.M. 1999. Social Vulnerability to Climate Change and the Architecture of Entitlements. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 4:253-266. DOI: 10.1023/a:1009601904210.

Anthony, E. H., y Ziska, L. H. 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.

Birkmann J. 2007. Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications. *Environmental Hazards* 7:20-31. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envhaz.2007.04.002>.

Camargo, M. B. P. 2010. The impact of climatic variability and climate change on *Arabic Coffee* crop in Brazil. *Agrometeorología. Bragantia, Campinas*. Vol.69. n1. 239 - 247pp.

Carvalho, M. 2009. El Sol de México. Organización Editorial Mexicana en línea. <http://www.oem.com.mx/oem/notas/n1359287.htm>.

Castillo, A. M. 2007. Vulnerabilidad de la productividad agrícola de temporal al cambio climático global en México. Tesis de doctorado en Ciencias. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados.

CONABIO. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Mapoteca Digital. Disponible en:

[http://www.conabio.gob.mx/informacion/geo\\_espanol/doctos/cart\\_linea.html](http://www.conabio.gob.mx/informacion/geo_espanol/doctos/cart_linea.html)

Conde, A. C; y Gay, G. C. 2008. Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. México. 1 – 105 pp.

Conde, C., Ferrer, R. M y Liverman, D. 2003. Estudio de la vulnerabilidad de la agricultura de maíz de temporal mediante el modelo Ceres – Maize. *En: Gay C (Ed). 2000. México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México, 220 p. ISBN 968-36-7562-X.*

CP-UACH. 1991. Manual de conservación del suelo y agua. Instructivo. Publ. Colegio de Postgraduados, Montecillo, 248 p.

Cure, J. D., y Acock. B. 1986. Crop responses to carbón dioxide doubling: a literatura survey. *Agricultural and Forest Meteorology*. 38: 127 – 145 Pág.

De Wit, C. T. 1966. Photosynthesis of leaf canopies. *Agricultural Research Reports*. No. 663. 1 – 56 pág.



Doorenbos J. y Kassam, A. H. 1980. Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Pub. No. 33. FAO. Roma, Italia. 212 p.

Escamilla, P. E. 1997. Evaluación técnica-económica de plantaciones de café en el sistema de policultivo comercial en Veracruz. Tesis de Maestría en Agroecosistemas Tropicales. Campus Veracruz. Colegio de Postgraduados.

Escamilla, P. E. 2007. Influencia de los factores ambientales, genéticos, agronómicos y sociales en la calidad del café orgánico en México. Colegio de Postgraduados/Campus Veracruz. Tesis de Doctorado. M.F. Altamirano, Veracruz, México. 254 p.

FAO. 2009. The ETo Calculator. Reference Manual. Version 3.1.

FAO. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje. Roma. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/idp56s.pdf>

FAO - IIASA. 2000. Global Agroecological Zones. Methodology and results of the Global Agro-Ecological Zones Model. Food and Agriculture Organization (en línea) Versión: 1.0. <http://www.fao.org>.

Frére M., Popov, G.F. 1986. Pronóstico agrometeorológico del rendimiento de los cultivos. FAO. Roma, Italia. 194 p.

Füssel H. M. 2007. Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. Global Environmental Change Part A: Human & Policy Dimensions 17:155-167. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.05.002.

Gay, C. 2000. México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México, 220 p. ISBN 968-36-7562-X.

Gay, C., Estrada, F., Conde, C. y Eakin, H. 2004. Impactos potenciales del cambio climático en la agricultura: escenarios de producción de café para el 2050 en Veracruz (México). Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). 651 – 660pp.

Gay, C., Estrada, C. Conde, H. Eakin y L. Villers. 2006. Potential impacts of climate change on agriculture: a case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. Climate Change. pp 79: 259-288.

Gay, C., Estrada, F. 2007. Cambio climático en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera. México. 1 – 31pp.

Herrera, G. S. 2008. Alteración de la fertilidad del suelo por el cambio climático y su efecto en la productividad de maíz y trigo bajo riego. Tesis de maestría en Ciencias. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados.

Hulme, M. y Sheard, N. 1999. Climate change scenarios for Mesoamerica. Climatic Research Unit. University of East Anglia, Norwich, UK. 6 pág.

Hyams D. 1997. A curve fitting system for Windows (computer programme). Version 1.34. Ed. Microsoft Corp., USA).

INE. 2010. Manual de uso del Sistema de Información de Escenarios de Cambio Climático Regionalizados (SIECCRe). Disponible en: <http://zimbra.ine.gob.mx/escenarios/>

INEGI. 1999. Modelos digitales de elevación de la República Mexicana. Escalas 1:50000 y 1:250000. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. CD.

INEGI. 1988. Conjunto de las cartas de topografía, geología, uso de suelo y edafología, (escala 1:250000 y 1:50000) de la República Mexicana. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

IPCC. 2007a. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.

IPCC, 2007b: Resumen para Responsables de Políticas. En, Cambio Climático 2007: Impactos y Vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden y C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

Liverman, D. M., y O'Brien, K.L. 1991. Global warming and climate change in México. *Global Env. Change* 1: 351-364.

López, M. R., Díaz, P. G. y Martínez, R. J. 2007. Potencial productivo y tipología de productores de café en la zona centro del estado de Veracruz. INIFAP. 7 – 25 pp. (Documento en prensa).

Magaña, V., Conde, C., Sánchez, O. y Gay, C. 1997. Assessment of current and future regional climate scenarios for México. *Climate Res.* 9: 107 1 114.

Magaña, V., C. Conde, O. Sánchez, y C. Gay. 1999. Escenarios físicos regionales. Evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático futuro para México. In: México: Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Centro de ciencias de la atmósfera. UNAM. pp. 1-24.

Magaña, V. y Gay, G. C. 2002. Vulnerabilidad y adaptación regional ante el cambio climático y sus impactos ambientales, sociales y económicos. Instituto Nacional de Ecología. México. *Gaceta Ecológica*, No. 065. Pp. 7 – 23.

Magaña, V. y Caetano, E. 2007. Informe final de trabajo. Dirección General de Investigación sobre Cambio Climático. Pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para

la alimentación del sistema: cambio climático por estado y por sector. Instituto Nacional de Ecología. 1 – 41 pp.

Magaña, V. 2010. Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones. Centro de Ciencias de la Atmósfera Universidad Nacional Autónoma de México. 80 pp.

Martínez, F. J. 2007. ABC de cambio climático: Impactos y Acciones en México. Foro: Sociedad y cambio climático. Instituto Nacional de Ecología.

Moguel, P y Toledo, M. V. 1996. El café en México, ecología, cultura indígena y sustentabilidad. Centro de Ecología, UNAMC. Ciencias No. 43. 40 – 50pp.

Moguel, P and Toledo, V.M. 1999. Biodiversity Conservation in traditional coffee systems of México. *Conservation Biology* 13:1-12.

Nair, P. K. R. 1993. An introduction to agroforestry. Kluwer Academic Publishers. International Centro for Research in Agroforestry. Pp. 1- 479.

Ojeda, B. W. 2010. Agricultura y Cambio Climático en el trópico mexicano. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos.

Pérez, P. E. y Geissert, K. D. 2006. Zonificación agroecológica de sistemas agroforestales: El caso café (*Coffea arabica* L.) – Palma camedor (*Chamaedorea elegans* Mart.). México. 3 (8). 556 – 562 pp.

Sáenz, C. A. 1990. El cultivo del cafeto en México. Instituto Mexicano del café. México. 29 – 217 pp.

Santo, D. M. A y Camargo, M. B. P. 2006. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de Produtividade do Cafeeiro nas condições do estado de São Paulo. *Bragantia: revista de ciencias agronômicas*. Campinas, Brasil. Vol 65. Número 001. 173 – 183 pp.

SARH, 1977. Manual de conservación del suelo y del agua. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 584 p.

Siles, G. P. 2001. Comportamiento fisiológico del café asociado con *Eucalyptus deglupta*, *Terminalia ivorensis* y sin sombra. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 88pp.

Toledo, V. y Moguel, P. 2001. En busca de un café sostenible en México: la importancia de la biodiversidad biológica y cultural. In: Primer Congreso del Café Sostenible: 175-183.

Villers. L., Arizpe. N., Orellana. R., Conde. C., Hernández. J. 2009. Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia*. Vol. 34 No. 5. 322 – 329pp.

Wintgens, N. J. 2004. Coffee: Growing, processing, sustainable, production. A guidebook for growers, processors, traders, and researchers. Nextle. WILEY-VCH.

Zullo, J. J., Silveira, P. H. y Delgado, A. E. 2006. Impact assessment study of climate change on agricultural zoning. Campinas, Sao Paulo, Brasil. Meteorol. Appl. (Supplement), 69 – 80pp.

## 8. ANEXOS

### ANEXO 1

Cambios esperados en la radiación global ( $\Delta R_g$ ), Temperatura del aire ( $\Delta T$ ) y la Precipitación ( $\Delta Pr$ ) de acuerdo con los escenarios climáticos a mitad del siglo XXI .

Región Cafetalera	Estación	Municipio	$\Delta R_g$ (%)				$\Delta T$ (%)				$\Delta Pr$ (%)			
			A2	A1B	B1	COM	A2	A1B	B1	COM	A2	A1B	B1	COM
ATZALAN	30008	ALTOTONGA	-4.7	4.6	5.0	4.7	10.8	11.5	8.1	5.4	-1.7	-1.2	-1.7	-8.4
ATZALAN	30012	ATZALAN	0.5	21.0	22.1	20.4	9.5	10.2	7.1	4.7	-1.3	-0.9	-1.3	-6.3
ATZALAN	30074	JALACINGO	0.5	16.0	16.2	16.2	9.8	10.4	7.3	4.8	-1.5	-1.1	-1.5	-7.3
ATZALAN	30089	LAS MINAS	-0.9	9.8	5.1	4.5	8.6	9.2	6.4	4.3	-1.7	-1.2	-1.6	-8.2
ATZALAN	30102	MARTINEZ DE LA TORRE	0.8	-0.8	-0.4	-1.2	6.3	6.7	4.7	3.1	-1.4	-1.0	-1.4	-7.1
ATZALAN	30213	MARTINEZ DE LA TORRE	1.1	14.6	14.8	14.9	6.5	6.9	4.8	3.2	-1.3	-0.9	-1.2	-6.2
COATEPEC	30003	ACTOPAN	0.3	11.6	12.6	11.6	5.9	6.3	4.5	2.9	0.9	-1.0	0.4	-8.8
COATEPEC	30007	NAOLINCO	0.5	-22.5	-21.8	-23.1	6.5	7.0	5.0	3.2	0.7	-0.8	0.3	-7.2
COATEPEC	30021	EMILIANO ZAPATA	0.5	11.4	11.3	11.4	6.0	6.4	4.5	3.0	2.3	-0.9	3.1	-11.2
COATEPEC	30026	COATEPEC	2.2	12.4	14.0	13.1	7.6	8.5	5.9	3.8	1.2	-0.5	1.6	-5.7
COATEPEC	30068	ACTOPAN	0.0	-6.8	-6.0	-7.0	5.7	6.4	4.4	2.9	2.3	-0.9	3.1	-11.1
COATEPEC	30076	JALCOMULCO	-0.4	-11.3	-10.4	-11.3	6.1	6.8	4.7	3.0	1.9	-0.8	2.6	-9.1
COATEPEC	30085	XICO	1.1	-3.8	-3.7	-4.2	15.9	16.9	11.8	7.9	-1.7	-1.2	-1.7	-8.3
COATEPEC	30087	XALAPA	-0.8	16.4	16.6	15.9	7.5	8.0	5.8	3.7	0.5	-0.6	0.2	-5.5
COATEPEC	30112	ACTOPAN	0.6	-23.9	-20.9	-21.2	5.8	6.2	4.4	2.8	-1.2	-0.7	3.7	-8.6
COATEPEC	30114	NAOLINCO	-0.8	11.7	12.9	10.1	8.4	9.0	6.5	4.1	0.5	-0.5	0.2	-4.7
COATEPEC	30140	EMILIANO ZAPATA	1.6	19.4	20.0	19.6	7.3	8.2	5.6	3.6	1.8	-0.7	2.5	-8.7
COATEPEC	30141	EMILIANO ZAPATA	0.6	19.3	21.4	20.6	5.8	6.5	4.5	2.9	2.4	-0.9	3.2	-11.3
COATEPEC	30157	JALCOMULCO	-0.8	-14.6	-13.7	-14.4	5.8	6.6	4.5	2.9	2.2	-0.9	3.0	-10.5
COATEPEC	30158	ACTOPAN	-0.4	-12.1	-11.5	-11.6	6.3	6.8	4.9	3.2	-1.7	-0.6	5.7	-0.5
COATEPEC	30175	XICO	-0.5	3.2	4.0	3.4	16.0	17.0	11.9	7.9	-1.5	-1.0	-1.5	-7.3
COATEPEC	30179	TEOCELO	1.7	4.1	5.2	4.4	7.2	8.1	5.6	3.6	1.0	-0.4	1.4	-4.9
COATEPEC	30195	EMILIANO ZAPATA	1.3	2.0	3.0	1.9	5.9	6.7	4.6	3.0	2.3	-0.9	3.1	-10.8
COATEPEC	30209	IXHUACAN DE LOS REYES	0.9	-3.9	-3.2	-2.9	9.8	10.7	7.6	5.0	0.2	0.4	0.6	-2.3
COATEPEC	30266	ACTOPAN	0.5	5.7	4.7	5.7	6.1	6.9	4.8	3.1	2.3	-0.9	3.1	-11.2
COATEPEC	30267	JILOTEPEC	-0.1	3.3	4.3	4.4	7.6	8.1	5.9	3.7	0.4	-0.5	0.2	-4.5
COATEPEC	30311	COSAUTLAN DE CARVAJAL	-0.2	-13.2	-13.5	-12.8	7.5	8.4	5.8	3.8	1.0	-0.4	1.3	-4.7
COATEPEC	30336	IXHUACAN DE LOS REYES	1.2	0.4	-0.5	2.5	9.8	10.8	7.7	5.1	0.2	0.4	0.6	-2.3
COATEPEC	30339	EMILIANO ZAPATA	-1.0	0.2	-1.3	0.8	6.4	7.2	5.0	3.2	2.2	-0.9	3.0	-10.6
COATEPEC	30353	ACTOPAN	-0.7	-0.3	0.4	1.4	5.6	5.9	4.2	2.7	-0.8	-0.4	2.3	-5.4
COATEPEC	30452	COATEPEC	-0.4	-0.3	0.7	1.2	8.3	8.9	6.4	4.1	0.4	-0.5	0.2	-4.4
CORDOBA	30032	COSCOMATEPEC	0.1	22.8	23.8	22.1	8.8	9.6	6.9	4.5	0.3	0.5	0.7	-2.9
CORDOBA	30072	IXHUATLAN DEL CAFÉ	-1.6	13.8	13.7	13.6	7.4	8.3	5.7	3.7	1.1	-0.4	1.5	-5.2
CORDOBA	30115	FORTIN	0.0	5.6	6.4	6.3	7.0	7.7	5.5	3.3	0.7	-0.4	1.3	-6.0
CORDOBA	30155	ATOYAC	0.3	7.7	7.1	6.7	6.3	6.9	4.9	3.0	0.8	-0.5	1.5	-6.9
HUATUSCO	30047	COMAPA	-0.6	16.8	18.6	17.8	6.5	7.2	5.0	3.2	1.9	-0.8	2.6	-9.2
HUATUSCO	30052	HUATUSCO	-0.9	26.1	25.1	25.8	9.2	10.1	7.2	4.8	0.2	0.5	0.7	-2.8
HUATUSCO	30066	HUATUSCO	2.1	-1.4	0.0	-0.7	7.7	8.6	6.0	3.9	1.0	-0.4	1.4	-5.0
HUATUSCO	30177	TENAMPA	4.3	19.0	20.0	20.0	7.5	8.5	5.9	3.8	1.2	-0.5	1.7	-5.9
HUATUSCO	30187	TOTUTLA	0.7	16.7	16.8	15.6	8.0	9.0	6.2	4.0	1.0	-0.4	1.4	-4.8
HUATUSCO	30342	HUATUSCO	-1.4	-1.7	-0.4	0.4	8.6	9.7	6.7	4.3	1.1	-0.4	1.4	-5.1
MISANTLA	30108	MISANTLA	0.9	25.5	24.8	25.8	6.8	7.2	5.2	3.3	0.3	-0.4	0.2	-3.3
MISANTLA	30191	VEGA DE ALATORRE	-0.8	-0.7	-0.2	-0.8	6.1	6.5	4.7	3.0	0.5	-0.6	0.2	-4.7
MISANTLA	30337	MISANTLA	0.5	0.1	0.7	1.4	6.0	6.4	4.6	2.9	0.4	-0.5	0.2	-4.4
MISANTLA	30338	ACATLAN	0.9	-0.3	0.7	1.0	9.6	10.3	7.4	4.7	0.5	-0.6	0.2	-5.2
TEZONAPA	30053	TEZONAPA	-0.1	6.6	7.3	7.1	6.1	6.7	4.8	2.9	0.6	-0.4	1.1	-5.0
TEZONAPA	30197	TEZONAPA	1.8	-6.8	-5.2	-6.7	6.4	7.0	5.0	3.0	0.6	-0.4	1.2	-5.3

## ANEXO 2

Estimación de las variables de Rendimiento máximo ( $Y_{\max}$ ), Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas (ISNH) y rendimiento calculado ( $Y_{\text{calc}}$ ), para el escenario climático actual, en los sitios de referencia empleados en el presente estudio.

Región Cafetalera	Estación	Municipio	Longitud	Latitud	Altitud	$Y_{\max}$ Base	ISNH Base	$Y_{\text{calc}}$ Base	$Y_{\text{real}}$
ATZALAN	30008	ALTOTONGA	-97.2	19.8	1867.0	2587.0	0.77	2172.9	2155.7
ATZALAN	30012	ATZALAN	-97.2	19.8	1697.0	2881.0	0.76	2200.3	2155.7
ATZALAN	30074	JALACINGO	-97.3	19.8	1880.0	2875.0	0.75	2156.3	2170.0
ATZALAN	30089	LAS MINAS	-97.1	19.7	1415.0	2737.0	0.82	2217.0	2055.7
ATZALAN	30102	MARTINEZ DE LA TORRE	-97.1	20.1	89.0	2693.0	0.76	2152.0	2202.5
ATZALAN	30213	MARTINEZ DE LA TORRE	-97.1	20.1	63.0	2672.0	0.84	2244.5	2202.5
COATEPEC	30003	ACTOPAN	-96.6	19.5	250.0	2815.0	0.54	1913.8	2041.3
COATEPEC	30007	NAOLINCO	-96.8	19.6	730.0	3020.0	0.71	2144.2	2166.3
COATEPEC	30021	EMILIANO ZAPATA	-96.7	19.4	242.0	2833.0	0.54	1846.4	1793.8
COATEPEC	30026	COATEPEC	-96.9	19.5	1188.0	3119.0	0.72	2280.0	2387.5
COATEPEC	30068	ACTOPAN	-96.5	19.4	100.0	2731.0	0.57	1877.2	2041.3
COATEPEC	30076	JALCOMULCO	-96.8	19.3	335.0	2928.0	0.68	1834.7	1793.8
COATEPEC	30085	XICO	-97.1	19.5	3127.0	857.0	0.72	2280.0	2175.0
COATEPEC	30087	XALAPA	-96.9	19.5	1281.0	2994.0	0.77	2275.5	2118.8
COATEPEC	30112	ACTOPAN	-96.5	19.5	70.0	3267.0	0.40	1873.8	2041.3
COATEPEC	30114	NAOLINCO	-96.9	19.7	1542.0	2816.0	0.77	2168.3	2166.3
COATEPEC	30140	EMILIANO ZAPATA	-96.8	19.4	914.0	2767.0	0.72	1992.2	2041.3
COATEPEC	30141	EMILIANO ZAPATA	-96.6	19.4	263.0	2540.0	0.67	1968.8	2041.3
COATEPEC	30157	JALCOMULCO	-96.7	19.3	282.0	2707.0	0.62	1834.7	1793.8
COATEPEC	30158	ACTOPAN	-96.5	19.5	65.0	3069.0	0.61	1872.1	2041.3
COATEPEC	30175	XICO	-97.1	19.5	3102.0	866.0	0.74	2280.0	2175.0
COATEPEC	30179	TEOCELO	-97.0	19.4	1188.0	2967.0	0.78	2280.0	2182.5
COATEPEC	30195	EMILIANO ZAPATA	-96.8	19.5	924.0	2592.0	0.61	1992.2	2041.3
COATEPEC	30209	IXHUACAN DE LOS REYES	-97.1	19.4	1802.0	2851.0	0.76	2382.4	2480.0
COATEPEC	30266	ACTOPAN	-96.5	19.5	146.0	2651.0	0.71	1945.3	2041.3
COATEPEC	30267	JILOTEPEC	-96.9	19.6	1000.0	2794.0	0.82	2166.3	2072.5
COATEPEC	30311	COSAUTLAN DE CARVAJAL	-97.0	19.3	1274.0	2906.0	0.80	2324.8	2422.5
COATEPEC	30336	IXHUACAN DE LOS REYES	-97.1	19.3	1802.0	2978.0	0.80	2382.4	2480.0
COATEPEC	30339	EMILIANO ZAPATA	-96.7	19.4	580.0	2779.0	0.70	1945.3	2041.3
COATEPEC	30353	ACTOPAN	-96.4	19.6	20.0	2718.0	0.69	1875.4	2041.3
COATEPEC	30452	COATEPEC	-96.9	19.5	1349.0	3043.0	0.79	2404.0	2387.5
CORDOBA	30032	COSCOMATEPEC	-97.0	19.1	1530.0	2928.0	0.84	2186.8	2155.0
CORDOBA	30072	IXHUATLAN DEL CAFÉ	-97.0	19.1	1350.0	3080.0	0.71	2186.8	2155.0
CORDOBA	30115	FORTIN	-97.0	18.8	697.0	2967.0	0.77	2284.6	2105.0
CORDOBA	30155	ATOYAC	-96.8	18.9	826.0	2635.0	0.85	2239.8	2105.0
HUATUSCO	30047	COMAPA	-96.7	19.2	545.0	2846.0	0.77	2191.4	2303.8
HUATUSCO	30052	HUATUSCO	-97.0	19.2	1030.0	2617.0	0.84	2198.3	2268.8
HUATUSCO	30066	HUATUSCO	-97.0	19.2	1284.0	3104.0	0.72	2234.9	2268.8
HUATUSCO	30177	TENAMPA	-96.9	19.3	1015.0	2816.0	0.74	2083.8	2000.0
HUATUSCO	30187	TOTUTLA	-97.0	19.2	1446.0	2707.0	0.82	2219.7	2168.8
HUATUSCO	30342	HUATUSCO	-97.0	19.1	1186.0	2916.0	0.79	2303.6	2268.8
MISANTLA	30108	MISANTLA	-96.9	19.9	310.0	2632.0	0.73	1921.4	2006.3
MISANTLA	30191	VEGA DE ALATORRE	-96.7	20.0	25.0	3069.0	0.83	2547.3	2336.3
MISANTLA	30337	MISANTLA	-97.0	20.1	59.0	2706.0	0.80	2164.8	2270.0
MISANTLA	30338	ACATLAN	-96.8	19.7	1751.0	2659.0	0.77	2047.4	2136.7
TEZONAPA	30053	TEZONAPA	-96.8	18.5	103.0	2680.0	0.76	2036.8	2195.0
TEZONAPA	30197	TEZONAPA	-96.7	18.7	263.0	2952.0	0.76	2243.5	2195.0

### ANEXO 3

Estimación de las variables de Rendimiento máximo (Y<sub>máx</sub>), Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas (ISNH) y rendimiento calculado (Y<sub>calc</sub>), para el escenario climático de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) A2, en los sitios de referencia empleados en el presente estudio.

Región Cafetalera	Estación	Municipio	Longitud	Latitud	Altitud	Y <sub>máx</sub> Escenario A2	ISNH Escenario A2	Y <sub>calc</sub> Escenario A2	Yreal Base
ATZALAN	30008	ALTOTONGA	-97.2	19.8	1867.0	2855.0	0.77	2214.4	2155.7
ATZALAN	30012	ATZALAN	-97.2	19.8	1697.0	2929.0	0.75	2236.5	2155.7
ATZALAN	30074	JALACINGO	-97.3	19.8	1880.0	2976.0	0.75	2232.0	2170.0
ATZALAN	30089	LAS MINAS	-97.1	19.7	1415.0	2733.0	0.82	2218.9	2055.7
ATZALAN	30102	MARTINEZ DE LA TORRE	-97.1	20.1	89.0	2613.0	0.75	2097.1	2202.5
ATZALAN	30213	MARTINEZ DE LA TORRE	-97.1	20.1	63.0	2592.0	0.86	2229.1	2202.5
COATEPEC	30003	ACTOPAN	-96.6	19.5	250.0	2729.0	0.50	1729.5	2041.3
COATEPEC	30007	NAOLINCO	-96.8	19.6	730.0	2934.0	0.62	1819.1	2166.3
COATEPEC	30021	EMILIANO ZAPATA	-96.7	19.4	242.0	2743.0	0.52	1664.4	1793.8
COATEPEC	30026	COATEPEC	-96.9	19.5	1188.0	3168.0	0.76	2290.9	2387.5
COATEPEC	30068	ACTOPAN	-96.5	19.4	100.0	2634.0	0.55	1692.3	2041.3
COATEPEC	30076	JALCOMULCO	-96.8	19.3	335.0	2821.0	0.64	1687.8	1793.8
COATEPEC	30085	XICO	-97.1	19.5	3127.0	1163.0	0.74	2290.9	2175.0
COATEPEC	30087	XALAPA	-96.9	19.5	1281.0	2972.0	0.80	2392.6	2118.8
COATEPEC	30112	ACTOPAN	-96.5	19.5	70.0	3174.0	0.37	1696.0	2041.3
COATEPEC	30114	NAOLINCO	-96.9	19.7	1542.0	2828.0	0.78	2205.8	2166.3
COATEPEC	30140	EMILIANO ZAPATA	-96.8	19.4	914.0	2754.0	0.70	1927.8	2041.3
COATEPEC	30141	EMILIANO ZAPATA	-96.6	19.4	263.0	2457.0	0.62	1845.3	2041.3
COATEPEC	30157	JALCOMULCO	-96.7	19.3	282.0	2617.0	0.60	1687.8	1793.8
COATEPEC	30158	ACTOPAN	-96.5	19.5	65.0	2962.0	0.57	1688.3	2041.3
COATEPEC	30175	XICO	-97.1	19.5	3102.0	1155.0	0.72	2290.9	2175.0
COATEPEC	30179	TEOCELO	-97.0	19.4	1188.0	2938.0	0.74	2290.9	2182.5
COATEPEC	30195	EMILIANO ZAPATA	-96.8	19.5	924.0	2640.0	0.59	1927.8	2041.3
COATEPEC	30209	IXHUACAN DE LOS REYES	-97.1	19.4	1802.0	2953.0	0.76	2369.6	2480.0
COATEPEC	30266	ACTOPAN	-96.5	19.5	146.0	2570.0	0.66	1762.9	2041.3
COATEPEC	30267	JILOTEPEC	-96.9	19.6	1000.0	2770.0	0.85	2166.3	2072.5
COATEPEC	30311	COSAUTLAN DE CARVAJAL	-97.0	19.3	1274.0	2908.0	0.77	2239.2	2422.5
COATEPEC	30336	IXHUACAN DE LOS REYES	-97.1	19.3	1802.0	2962.0	0.80	2369.6	2480.0
COATEPEC	30339	EMILIANO ZAPATA	-96.7	19.4	580.0	2671.0	0.66	1762.9	2041.3
COATEPEC	30353	ACTOPAN	-96.4	19.6	20.0	2621.0	0.65	1703.7	2041.3
COATEPEC	30452	COATEPEC	-96.9	19.5	1349.0	3045.0	0.85	2588.3	2387.5
CORDOBA	30032	COSCOMATEPEC	-97.0	19.1	1530.0	2953.0	0.84	2284.5	2155.0
CORDOBA	30072	IXHUATLAN DEL CAFE	-97.0	19.1	1350.0	3046.0	0.75	2284.5	2155.0
CORDOBA	30115	FORTIN	-97.0	18.8	697.0	2860.0	0.78	2230.8	2105.0
CORDOBA	30155	ATOYAC	-96.8	18.9	826.0	2542.0	0.85	2160.7	2105.0
HUATUSCO	30047	COMAPA	-96.7	19.2	545.0	2743.0	0.75	2057.3	2303.8
HUATUSCO	30052	HUATUSCO	-97.0	19.2	1030.0	2618.0	0.84	2199.1	2268.8
HUATUSCO	30066	HUATUSCO	-97.0	19.2	1284.0	3154.0	0.73	2302.4	2268.8
HUATUSCO	30177	TENAMPA	-96.9	19.3	1015.0	2880.0	0.74	2131.2	2000.0
HUATUSCO	30187	TOTUTLA	-97.0	19.2	1446.0	2736.0	0.76	2079.4	2168.8
HUATUSCO	30342	HUATUSCO	-97.0	19.1	1186.0	2899.0	0.76	2203.2	2268.8
MISANTLA	30108	MISANTLA	-96.9	19.9	310.0	2561.0	0.73	1869.5	2006.3
MISANTLA	30191	VEGA DE ALATORRE	-96.7	20.0	25.0	2858.0	0.91	2600.8	2336.3
MISANTLA	30337	MISANTLA	-97.0	20.1	59.0	2628.0	0.80	2102.4	2270.0
MISANTLA	30338	ACATLAN	-96.8	19.7	1751.0	2781.0	0.76	2113.6	2136.7
TEZONAPA	30053	TEZONAPA	-96.8	18.5	103.0	2581.0	0.77	1987.4	2195.0
TEZONAPA	30197	TEZONAPA	-96.7	18.7	263.0	2880.0	0.77	2217.6	2195.0



## ANEXO 4

Estimación de las variables de Rendimiento máximo ( $Y_{\max}$ ), Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas (ISNH) y rendimiento calculado ( $Y_{\text{calc}}$ ), para el escenario climático de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) A1B, en los sitios de referencia empleados en el presente estudio.

Región Cafetalera	Estación	Municipio	Longitud	Latitud	Altitud	$Y_{\max}$ Escenario A1B	ISNH Escenario A1B	$Y_{\text{calc}}$ Escenario A1B	Yreal
ATZALAN	30008	ALTOTONGA	-97.2	19.8	1867.0	3004.0	0.73	2045.4	2155.7
ATZALAN	30012	ATZALAN	-97.2	19.8	1697.0	2896.0	0.68	2111.8	2155.7
ATZALAN	30074	JALACINGO	-97.3	19.8	1880.0	2988.0	0.71	2121.5	2170.0
ATZALAN	30089	LAS MINAS	-97.1	19.7	1415.0	2730.0	0.77	2035.7	2055.7
ATZALAN	30102	MARTINEZ DE LA TORRE	-97.1	20.1	89.0	2625.0	0.70	1902.9	2202.5
ATZALAN	30213	MARTINEZ DE LA TORRE	-97.1	20.1	63.0	2583.0	0.79	2040.6	2202.5
COATEPEC	30003	ACTOPAN	-96.6	19.5	250.0	2731.0	0.50	1717.9	2041.3
COATEPEC	30007	NAOLINCO	-96.8	19.6	730.0	2917.0	0.64	1866.9	2166.3
COATEPEC	30021	EMILIANO ZAPATA	-96.7	19.4	242.0	2731.0	0.51	1639.4	1793.8
COATEPEC	30026	COATEPEC	-96.9	19.5	1188.0	3145.0	0.67	2150.8	2387.5
COATEPEC	30068	ACTOPAN	-96.5	19.4	100.0	2617.0	0.54	1708.5	2041.3
COATEPEC	30076	JALCOMULCO	-96.8	19.3	335.0	2825.0	0.64	1665.8	1793.8
COATEPEC	30085	XICO	-97.1	19.5	3127.0	1161.0	0.68	2150.8	2175.0
COATEPEC	30087	XALAPA	-96.9	19.5	1281.0	2987.0	0.74	2158.8	2118.8
COATEPEC	30112	ACTOPAN	-96.5	19.5	70.0	3164.0	0.38	1669.3	2041.3
COATEPEC	30114	NAOLINCO	-96.9	19.7	1542.0	2828.0	0.72	2036.2	2166.3
COATEPEC	30140	EMILIANO ZAPATA	-96.8	19.4	914.0	2717.0	0.70	1901.9	2041.3
COATEPEC	30141	EMILIANO ZAPATA	-96.6	19.4	263.0	2536.0	0.58	1820.0	2041.3
COATEPEC	30157	JALCOMULCO	-96.7	19.3	282.0	2627.0	0.58	1665.8	1793.8
COATEPEC	30158	ACTOPAN	-96.5	19.5	65.0	2964.0	0.58	1719.1	2041.3
COATEPEC	30175	XICO	-97.1	19.5	3102.0	1162.0	0.70	2150.8	2175.0
COATEPEC	30179	TEOCELO	-97.0	19.4	1188.0	2926.0	0.75	2150.8	2182.5
COATEPEC	30195	EMILIANO ZAPATA	-96.8	19.5	924.0	2628.0	0.58	1901.9	2041.3
COATEPEC	30209	IXHUACAN DE LOS REYES	-97.1	19.4	1802.0	2948.0	0.73	2266.9	2480.0
COATEPEC	30266	ACTOPAN	-96.5	19.5	146.0	2534.0	0.67	1738.1	2041.3
COATEPEC	30267	JILOTEPEC	-96.9	19.6	1000.0	2770.0	0.77	2166.3	2072.5
COATEPEC	30311	COSAUTLAN DE CARVAJAL	-97.0	19.3	1274.0	2907.0	0.77	2238.4	2422.5
COATEPEC	30336	IXHUACAN DE LOS REYES	-97.1	19.3	1802.0	2944.0	0.77	2266.9	2480.0
COATEPEC	30339	EMILIANO ZAPATA	-96.7	19.4	580.0	2674.0	0.65	1738.1	2041.3
COATEPEC	30353	ACTOPAN	-96.4	19.6	20.0	2612.0	0.62	1619.4	2041.3
COATEPEC	30452	COATEPEC	-96.9	19.5	1349.0	3057.0	0.74	2262.2	2387.5
CORDOBA	30032	COSCOMATEPEC	-97.0	19.1	1530.0	2957.0	0.81	2075.4	2155.0
CORDOBA	30072	IXHUATLAN DEL CAFE	-97.0	19.1	1350.0	3052.0	0.68	2075.4	2155.0
CORDOBA	30115	FORTIN	-97.0	18.8	697.0	2893.0	0.73	2111.9	2105.0
CORDOBA	30155	ATOYAC	-96.8	18.9	826.0	2530.0	0.83	2099.9	2105.0
HUATUSCO	30047	COMAPA	-96.7	19.2	545.0	2727.0	0.72	1963.4	2303.8
HUATUSCO	30052	HUATUSCO	-97.0	19.2	1030.0	2649.0	0.83	2198.7	2268.8
HUATUSCO	30066	HUATUSCO	-97.0	19.2	1284.0	3131.0	0.69	2160.4	2268.8
HUATUSCO	30177	TENAMPA	-96.9	19.3	1015.0	2824.0	0.70	1976.8	2000.0
HUATUSCO	30187	TOTUTLA	-97.0	19.2	1446.0	2742.0	0.79	2166.2	2168.8
HUATUSCO	30342	HUATUSCO	-97.0	19.1	1186.0	2906.0	0.75	2179.5	2268.8
MISANTLA	30108	MISANTLA	-96.9	19.9	310.0	2551.0	0.79	2015.3	2006.3
MISANTLA	30191	VEGA DE ALATORRE	-96.7	20.0	25.0	2862.0	0.72	2060.6	2336.3
MISANTLA	30337	MISANTLA	-97.0	20.1	59.0	2615.0	0.70	1830.5	2270.0
MISANTLA	30338	ACATLAN	-96.8	19.7	1751.0	2782.0	0.67	1863.9	2136.7
TEZONAPA	30053	TEZONAPA	-96.8	18.5	103.0	2573.0	0.73	1878.3	2195.0
TEZONAPA	30197	TEZONAPA	-96.7	18.7	263.0	2853.0	0.72	2054.2	2195.0



## ANEXO 5

Estimación de las variables de Rendimiento máximo (Y<sub>máx</sub>), Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas (ISNH) y rendimiento calculado (Y<sub>calc</sub>), para el escenario climático de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) B1, en los sitios de referencia empleados en el presente estudio.

Región Cafetalera	Estación	Municipio	Longitud	Latitud	Altitud	Y <sub>máx</sub> Escenario B1	ISNH Escenario B1	Y <sub>calc</sub> Escenario B1	Y <sub>real</sub>
ATZALAN	30008	ALTOTONGA	-97.2	19.8	1867.0	2886.0	0.77	2227.2	2155.7
ATZALAN	30012	ATZALAN	-97.2	19.8	1697.0	2936.0	0.76	2225.7	2155.7
ATZALAN	30074	JALACINGO	-97.3	19.8	1880.0	2964.0	0.75	2223.0	2170.0
ATZALAN	30089	LAS MINAS	-97.1	19.7	1415.0	2751.0	0.81	2229.8	2055.7
ATZALAN	30102	MARTINEZ DE LA TORRE	-97.1	20.1	89.0	2637.0	0.84	2181.2	2202.5
ATZALAN	30213	MARTINEZ DE LA TORRE	-97.1	20.1	63.0	2627.0	0.86	2259.2	2202.5
COATEPEC	30003	ACTOPAN	-96.6	19.5	250.0	2776.0	0.52	1841.6	2041.3
COATEPEC	30007	NAOLINCO	-96.8	19.6	730.0	2962.0	0.64	1895.7	2166.3
COATEPEC	30021	EMILIANO ZAPATA	-96.7	19.4	242.0	2772.0	0.54	1805.9	1793.8
COATEPEC	30026	COATEPEC	-96.9	19.5	1188.0	3159.0	0.75	2339.0	2387.5
COATEPEC	30068	ACTOPAN	-96.5	19.4	100.0	2665.0	0.57	1757.1	2041.3
COATEPEC	30076	JALCOMULCO	-96.8	19.3	335.0	2867.0	0.68	1783.0	1793.8
COATEPEC	30085	XICO	-97.1	19.5	3127.0	972.0	0.76	2339.0	2175.0
COATEPEC	30087	XALAPA	-96.9	19.5	1281.0	3026.0	0.80	2395.0	2118.8
COATEPEC	30112	ACTOPAN	-96.5	19.5	70.0	3204.0	0.40	1706.0	2041.3
COATEPEC	30114	NAOLINCO	-96.9	19.7	1542.0	2836.0	0.78	2212.1	2166.3
COATEPEC	30140	EMILIANO ZAPATA	-96.8	19.4	914.0	2754.0	0.75	2065.5	2041.3
COATEPEC	30141	EMILIANO ZAPATA	-96.6	19.4	263.0	2481.0	0.67	1959.8	2041.3
COATEPEC	30157	JALCOMULCO	-96.7	19.3	282.0	2650.0	0.61	1783.0	1793.8
COATEPEC	30158	ACTOPAN	-96.5	19.5	65.0	3009.0	0.56	1685.0	2041.3
COATEPEC	30175	XICO	-97.1	19.5	3102.0	861.0	0.75	2339.0	2175.0
COATEPEC	30179	TEOCELO	-97.0	19.4	1188.0	2960.0	0.78	2339.0	2182.5
COATEPEC	30195	EMILIANO ZAPATA	-96.8	19.5	924.0	2659.0	0.61	2065.5	2041.3
COATEPEC	30209	IXHUACAN DE LOS REYES	-97.1	19.4	1802.0	3150.0	0.76	2295.0	2480.0
COATEPEC	30266	ACTOPAN	-96.5	19.5	146.0	2613.0	0.70	1854.0	2041.3
COATEPEC	30267	JILOTEPEC	-96.9	19.6	1000.0	2806.0	0.83	2166.3	2072.5
COATEPEC	30311	COSAUTLAN DE CARVAJAL	-97.0	19.3	1274.0	2905.0	0.80	2324.0	2422.5
COATEPEC	30336	IXHUACAN DE LOS REYES	-97.1	19.3	1802.0	2905.0	0.79	2295.0	2480.0
COATEPEC	30339	EMILIANO ZAPATA	-96.7	19.4	580.0	2687.0	0.69	1854.0	2041.3
COATEPEC	30353	ACTOPAN	-96.4	19.6	20.0	2657.0	0.65	1727.1	2041.3
COATEPEC	30452	COATEPEC	-96.9	19.5	1349.0	3137.0	0.79	2478.2	2387.5
CORDOBA	30032	COSCOMATEPEC	-97.0	19.1	1530.0	2962.0	0.83	2178.4	2155.0
CORDOBA	30072	IXHUATLAN DEL CAFE	-97.0	19.1	1350.0	3112.0	0.70	2178.4	2155.0
CORDOBA	30115	FORTIN	-97.0	18.8	697.0	2897.0	0.77	2230.7	2105.0
CORDOBA	30155	ATOYAC	-96.8	18.9	826.0	2575.0	0.85	2188.8	2105.0
HUATUSCO	30047	COMAPA	-96.7	19.2	545.0	2775.0	0.76	2109.0	2303.8
HUATUSCO	30052	HUATUSCO	-97.0	19.2	1030.0	2860.0	0.84	2402.4	2268.8
HUATUSCO	30066	HUATUSCO	-97.0	19.2	1284.0	3127.0	0.72	2251.4	2268.8
HUATUSCO	30177	TENAMPA	-96.9	19.3	1015.0	2891.0	0.73	2110.4	2000.0
HUATUSCO	30187	TOTUTLA	-97.0	19.2	1446.0	2728.0	0.78	2127.8	2168.8
HUATUSCO	30342	HUATUSCO	-97.0	19.1	1186.0	2932.0	0.78	2287.0	2268.8
MISANTLA	30108	MISANTLA	-96.9	19.9	310.0	2560.0	0.73	1868.8	2006.3
MISANTLA	30191	VEGA DE ALATORRE	-96.7	20.0	25.0	2895.0	0.79	2287.1	2336.3
MISANTLA	30337	MISANTLA	-97.0	20.1	59.0	2653.0	0.78	2069.3	2270.0
MISANTLA	30338	ACATLAN	-96.8	19.7	1751.0	2783.0	0.74	2059.4	2136.7
TEZONAPA	30053	TEZONAPA	-96.8	18.5	103.0	2609.0	0.76	1982.8	2195.0
TEZONAPA	30197	TEZONAPA	-96.7	18.7	263.0	2912.0	0.75	2184.0	2195.0

## ANEXO 6

Estimación de las variables de Rendimiento máximo (Y<sub>máx</sub>), Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas (ISNH) y rendimiento calculado (Y<sub>calc</sub>), para el escenario climático de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) COM, en los sitios de referencia empleados en el presente estudio.

Región Cafetalera	Estación	Municipio	Longitud	Latitud	Altitud	Y <sub>máx</sub> Escenario COM	ISNH Escenario COM	Y <sub>calc</sub> Escenario COM	Yreal
ATZALAN	30008	ALTOTONGA	-97.2	19.8	1867.0	2719.0	0.80	2251.2	2155.7
ATZALAN	30012	ATZALAN	-97.2	19.8	1697.0	2911.0	0.73	2296.4	2155.7
ATZALAN	30074	JALACINGO	-97.3	19.8	1880.0	2935.0	0.81	2377.4	2170.0
ATZALAN	30089	LAS MINAS	-97.1	19.7	1415.0	2735.0	0.81	2170.2	2055.7
ATZALAN	30102	MARTINEZ DE LA TORRE	-97.1	20.1	89.0	2678.0	0.74	2131.5	2202.5
ATZALAN	30213	MARTINEZ DE LA TORRE	-97.1	20.1	63.0	2633.0	0.87	2290.7	2202.5
COATEPEC	30003	ACTOPAN	-96.6	19.5	250.0	2762.0	0.46	1545.9	2041.3
COATEPEC	30007	NAOLINCO	-96.8	19.6	730.0	2996.0	0.60	1797.6	2166.3
COATEPEC	30021	EMILIANO ZAPATA	-96.7	19.4	242.0	2795.0	0.47	1538.1	1793.8
COATEPEC	30026	COATEPEC	-96.9	19.5	1188.0	3138.0	0.74	2319.1	2387.5
COATEPEC	30068	ACTOPAN	-96.5	19.4	100.0	2683.0	0.50	1643.7	2041.3
COATEPEC	30076	JALCOMULCO	-96.8	19.3	335.0	2885.0	0.58	1556.7	1793.8
COATEPEC	30085	XICO	-97.1	19.5	3127.0	847.0	0.72	2319.1	2175.0
COATEPEC	30087	XALAPA	-96.9	19.5	1281.0	2981.0	0.76	2293.8	2118.8
COATEPEC	30112	ACTOPAN	-96.5	19.5	70.0	3232.0	0.36	1744.6	2041.3
COATEPEC	30114	NAOLINCO	-96.9	19.7	1542.0	2833.0	0.77	2181.4	2166.3
COATEPEC	30140	EMILIANO ZAPATA	-96.8	19.4	914.0	2777.0	0.70	1943.9	2041.3
COATEPEC	30141	EMILIANO ZAPATA	-96.6	19.4	263.0	2505.0	0.56	1768.9	2041.3
COATEPEC	30157	JALCOMULCO	-96.7	19.3	282.0	2667.0	0.54	1556.7	1793.8
COATEPEC	30158	ACTOPAN	-96.5	19.5	65.0	3033.0	0.59	1789.5	2041.3
COATEPEC	30175	XICO	-97.1	19.5	3102.0	860.0	0.74	2319.1	2175.0
COATEPEC	30179	TEOCELO	-97.0	19.4	1188.0	3008.0	0.77	2319.1	2182.5
COATEPEC	30195	EMILIANO ZAPATA	-96.8	19.5	924.0	2693.0	0.53	1943.9	2041.3
COATEPEC	30209	IXHUACAN DE LOS REYES	-97.1	19.4	1802.0	2952.0	0.73	2280.0	2480.0
COATEPEC	30266	ACTOPAN	-96.5	19.5	146.0	2628.0	0.57	1593.8	2041.3
COATEPEC	30267	JILOTEPEC	-96.9	19.6	1000.0	2795.0	0.88	2166.3	2072.5
COATEPEC	30311	COSAUTLAN DE CARVAJAL	-97.0	19.3	1274.0	2929.0	0.79	2313.9	2422.5
COATEPEC	30336	IXHUACAN DE LOS REYES	-97.1	19.3	1802.0	2961.0	0.77	2280.0	2480.0
COATEPEC	30339	EMILIANO ZAPATA	-96.7	19.4	580.0	2748.0	0.58	1593.8	2041.3
COATEPEC	30353	ACTOPAN	-96.4	19.6	20.0	2698.0	0.63	1699.7	2041.3
COATEPEC	30452	COATEPEC	-96.9	19.5	1349.0	3072.0	0.84	2580.5	2387.5
CORDOBA	30032	COSCOMATEPEC	-97.0	19.1	1530.0	2921.0	0.78	2253.5	2155.0
CORDOBA	30072	IXHUATLAN DEL CAFE	-97.0	19.1	1350.0	3087.0	0.73	2253.5	2155.0
CORDOBA	30115	FORTIN	-97.0	18.8	697.0	2925.0	0.73	2135.3	2105.0
CORDOBA	30155	ATOYAC	-96.8	18.9	826.0	2596.0	0.83	2154.7	2105.0
HUATUSCO	30047	COMAPA	-96.7	19.2	545.0	2804.0	0.70	1962.8	2303.8
HUATUSCO	30052	HUATUSCO	-97.0	19.2	1030.0	2619.0	0.84	2200.0	2268.8
HUATUSCO	30066	HUATUSCO	-97.0	19.2	1284.0	3134.0	0.71	2225.1	2268.8
HUATUSCO	30177	TENAMPA	-96.9	19.3	1015.0	2831.0	0.72	2038.3	2000.0
HUATUSCO	30187	TOTUTLA	-97.0	19.2	1446.0	2737.0	0.82	2244.3	2168.8
HUATUSCO	30342	HUATUSCO	-97.0	19.1	1186.0	2934.0	0.77	2259.2	2268.8
MISANTLA	30108	MISANTLA	-96.9	19.9	310.0	2600.0	0.76	1976.0	2006.3
MISANTLA	30191	VEGA DE ALATORRE	-96.7	20.0	25.0	2953.0	0.89	2628.2	2336.3
MISANTLA	30337	MISANTLA	-97.0	20.1	59.0	2686.0	0.79	2121.9	2270.0
MISANTLA	30338	ACATLAN	-96.8	19.7	1751.0	2775.0	0.73	2025.8	2136.7
TEZONAPA	30053	TEZONAPA	-96.8	18.5	103.0	2639.0	0.73	1926.5	2195.0
TEZONAPA	30197	TEZONAPA	-96.7	18.7	263.0	2940.0	0.72	2116.8	2195.0