



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

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

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

**ALTERACIÓN DE LA FERTILIDAD DEL SUELO ATRIBUIBLE AL CAMBIO
CLIMÁTICO Y SU IMPACTO SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DE CAFÉ EN EL
ESTADO DE VERACRUZ, MÉXICO**

JUAN GABRIEL BRIGIDO MORALES

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO DE MÉXICO

2014

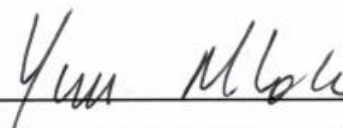
La presente tesis, titulada: **Alteración de la fertilidad del suelo atribuible al cambio climático y su impacto sobre la productividad de café en el Estado de Veracruz, México**, realizada por el alumno: **Juan Gabriel Brigido Morales**, bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada 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:


MC. LILIANA TERRAZAS MENDOZA

ASESOR:


MC. SERGIO SANTIAGO HERRERA GÓMEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Enero de 2014

ALTERACIÓN DE LA FERTILIDAD DEL SUELO ATRIBUIBLE AL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU IMPACTO SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DE CAFÉ EN EL ESTADO DE VERACRUZ, MÉXICO

RESUMEN

Todas las investigaciones sobre el cambio climático global indican que éste se ve fortalecido con el incremento en la concentración de gases, principalmente CO₂. También se ha encontrado que este incremento pueden intensificar las condiciones climáticas medias normales dentro de las que históricamente se ha dado el desarrollo de la agricultura por lo que ésta se vuelve vulnerable, siendo afectada su productividad. El objetivo principal del presente trabajo fue estimar el papel de la posible modificación del índice de fertilidad del suelo debido al cambio climático en los cálculos de la productividad del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) para 20 municipios cafetaleros del estado de Veracruz utilizando 3 escenarios de cambio climático para México propuestos por el proyecto CMIP5 y estructurados en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM. Para estimar la alteración de la fertilidad del suelo se estableció una relación cuantitativa entre el índice integral de fertilidad del suelo, y un índice climático denominado índice hidrotérmico local (IHT). Se pronosticaron cambios relativos en las productividades real y potencial, considerando el efecto del cambio en la temperatura media del aire, radiación fotosintéticamente activa, precipitación y fertilidad del suelo en función de los escenarios existentes del cambio climático. Los resultados señalan que todos estos factores tienen una influencia imprescindible. En función del escenario climático y del sitio de referencia al final del siglo XXI se esperan cambios en el rendimiento de café, desde pérdidas en la producción a nivel de 50% hasta ganancias del orden de 45%; el papel de la alteración de la fertilidad del suelo atribuible al cambio climático es esencial y puede representar hasta un 30% del valor calculado de rendimiento, esto significa que es un factor que no debe ser desestimado.

Palabras clave: Vulnerabilidad, Agricultura, Índice Hidrotérmico Local, Índice Integral de Fertilidad del Suelo, Café, Escenarios de Cambio Climático.

**ALTERATION OF SOIL FERTILITY ATTRIBUTABLE TO CLIMATE CHANGE
AND ITS IMPACT ON PRODUCTIVITY OF COFFEE IN THE STATE OF
VERACRUZ, MEXICO**

ABSTRACT

All investigations on global climate change indicate that it seems it is strengthened with the increase in the concentration of gases, mainly CO₂. It has been also found that this increase may intensify average climatic conditions within which the agriculture has been developed historically. So the agricultural productivity becomes susceptible to the climate change. The main objective of the present study was to estimate the role of possible changes in the soil fertility because of climate change in calculations of coffee productivity (*Coffea arabica* L.) for 20 municipalities of the Veracruz state using three climate change scenarios for Mexico proposed by the project CMIP5 and structured at the Center for Atmospheric Sciences of the UNAM. A quantitative relationship between the integral soil fertility index and climatic index called as local hydrothermal index (IHT) was established in order to estimate the soil fertility change. Relative changes in the actual and potential productivity were predicted considering the effect of the change in average air temperature, photosynthetically active radiation, precipitation and soil fertility as a function of the existing of climate change scenarios. The results show that all these factors have a vital influence. Depending on the climatic scenario and the reference site location the change in coffee production is expected from 50 % loss to around of 45 % increase at the end of XXI century. The role of altered of soil fertility alteration due to the climate change is essential and can represent up to 30% of the calculated crop yield. It means that this factor should not be disesteemed.

Keywords: Vulnerability, Agriculture, Local Hydrothermal Index, Integral Soil Fertility Index, Coffee, Climate Change Scenarios.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, porque cada día que vivo es solo una muestra de la gracia que recibo.

Al pueblo de México, porque por la contribución de cada uno de sus integrantes es que he podido obtener una beca para realizar esta maestría.

Al Colegio de Postgraduados, por ser la institución que participó activamente en mi proceso de formación, en especial a los académicos del programa de Hidrociencias.

Al Dr. Iouri Nikolskii Gavrilov por dirigir la investigación, por gastar de su tiempo para realizar aportes y observaciones a la misma, a la M.C. Oktiabrina Bakhlaeva Egorova por amistad y calidad humana.

Al Dr. Gabriel Díaz Padilla y Dr. Marcial Castillo Álvarez, porque parte de su trabajo fue de gran utilidad para la realización de la presente investigación.

A las instituciones en las que he colaborado: el extinto CMIH, ANEI A.C. y actualmente COLMERN A.C. ya que debido a sus actividades, me han permitido crecer en el área intelectual y el gusto por la investigación.

A todos y cada uno de mis amigos, compañeros de especialidad, de generación, de trabajo, chavos de manantial.

A todas y cada una de las personas que han estado ahí para brindarme su compañía, sus consejos, sus bromas; sin duda nuestro papel es ser de bendición para otros y ustedes lo han sido para mí.

DEDICATORIA

A ti Dios, porque encontrarme, corregir mis pasos y seguir guiándome.

A ti mamá... porque me has educado, me has regañado, me has corregido, me has alimentado, pero sobre todo, porque me has amado.

A ti papá... porque con tu estilo y a tu manera, me has enseñado a enfrentar las adversidades que encontramos en la vida.

A ustedes hermanos, sus esposas y sus hijas, cada uno de ustedes me ha enseñado cosas importantes en la vida; gracias porque más que mis hermanos han sido unos excelentes amigos, con todo lo que conlleva.

A mis amigos... escribir sus nombres me llevaría mucho, pero sé que al leer estas líneas se sabrán aludidos.

CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivos particulares	3
3. HIPOTESIS	3
4. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
4.1. El cambio climático y la agricultura.....	4
4.2. Escenarios futuros del clima en México.....	6
4.3. Perspectivas y enfoques para el análisis de impactos del cambio climático en la agricultura	9
4.4. Pronósticos de cambio en la productividad de cultivos utilizando escenarios de cambio climático.	10
4.5. La fertilidad del suelo, su influencia en la productividad agrícola y su modelación.	13
4.6. Generalidades del cultivo de café.....	15
4.6.1. Factores ecológicos que influyen en el desarrollo del café	15
5. MATERIALES Y MÉTODOS	18
5.1. Materiales	18
5.2. Métodos	18
5.2.1. Selección del área de estudio	20
5.2.2. Extracción de la información puntual de los escenarios de cambio climático.	21
5.2.3. Cálculo del Índice Hidrotérmico Local para la zona cafetalera en el estado de Veracruz.....	22
5.2.4. Análisis de las propiedades físicas y químicas de los suelos y establecimiento de la relación entre éstas y el IHT para condiciones actuales.	28
5.2.5. Estimación de los rendimientos del cultivo de café (<i>Coffea arabica</i> L.)	29
5.2.5.1. Cálculo del rendimiento potencial máximo ($Y_{máxj}$).	30
5.2.5.2. Cálculo del índice de satisfacción de las necesidades hídricas (INSH).	34
5.2.5.3. Cálculo del índice integral de fertilidad agrícola o del suelo (F_a).....	36
5.2.6. Estimación del cambio en los rendimientos del cultivo de café (<i>Coffea arabica</i> L.) en función de los escenarios del cambio climático	39

6.	RESULTADOS.....	42
6.1.	Caracterización climática de los municipios seleccionados para su estudio en las condiciones actuales (escenario base).....	42
6.2.	Cálculo de rendimientos en la producción de café para las condiciones actuales y la verificación de su confiabilidad de acuerdo con los rendimientos reportados durante el periodo 2003-2011 por la SAGARPA.	44
6.2.1.	Relación entre algunas propiedades de los suelos, el índice integral de fertilidad del suelo y el IHT en las condiciones actuales (escenario base)	44
6.2.2.	Estimación de los rendimientos de producción de café para las condiciones actuales (escenario base).	49
6.3.	Estimación del cambio en las condiciones climáticas de los municipios seleccionados para estudio con base en los escenarios de cambio climático.....	54
6.3.1.	Estimación del cambio en las variables climáticas para el periodo 2015-2039. 54	
6.3.2.	Estimación del cambio en las variables climáticas para el periodo 2075-2099.57	
6.4.	Estimación de la vulnerabilidad de la productividad de café ante escenarios de cambio climático	60
6.4.1.	Estimación del cambio en el rendimiento potencial ($\Delta Y_{m\acute{a}x}$,%).....	60
6.4.2.	Estimación del cambio en el Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas ($\Delta ISNH$,%).....	62
6.4.3.	Estimación del cambio en el índice de integral de Fertilidad (ΔF_a ,%).....	65
6.5.	Valoración integral de la estimación de cambio en la productividad de café.....	67
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
7.1.	Conclusiones.....	72
7.2.	Recomendaciones.....	73
8.	LITERATURA CITADA.....	74
9.	ANEXOS	82

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Grupos analizados para los escenarios de cambio climático regionales esperados en México.....	7
Cuadro 2. Regiones cafetaleras del estado de Veracruz y el porcentaje que representan del total de la superficie cafetalera.....	20
Cuadro 3. Estaciones climatológicas utilizadas para la obtención de información de los municipios estudiados.....	22
Cuadro 4. Valores promedio anuales temperatura media (T^{2000}), precipitación (Pr^{2000}), radiación neta (Rn^{2000}) e índice climático (IHT^{2000}), para el escenario base de inicios del siglo XXI en los municipios seleccionados con producción de café.....	43
Cuadro 5. Rendimientos observados (Y_{real}), rendimientos potenciales del cultivo de café ($Y_{máx}$), Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas (INSH) e Índice integral de fertilidad (F_a) para los municipios del estado de Veracruz a inicios del siglo XXI.....	49
Cuadro 6. Cambio en la variable de la temperatura media (ΔT , %) para los municipios seleccionados utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas: 4.5 (650 ppm de CO_2) y 8.5 (1370 ppm de CO_2).....	54
Cuadro 7. Cambio en la variable de precipitación (ΔPr , %) para los municipios seleccionados utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas: 4.5 (650 ppm de CO_2) y 8.5 (1370 ppm de CO_2).....	55
Cuadro 8. Cambio en la variable de Radiación neta (ΔRn , %) para los municipios seleccionados utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas: 4.5 (650 ppm de CO_2) y 8.5 (1370 ppm de CO_2).....	56
Cuadro 9. Cambio en la variable de la temperatura media (ΔT , %) para los municipios seleccionados utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de	

	concentración representativas: 4.5 (650 ppm de CO ₂) y 8.5 (1370 ppm de CO ₂)	57
Cuadro 10.	Cambio en la variable de precipitación (ΔPr , %) utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO ₂) y 8.5 (1370 ppm de CO ₂)	58
Cuadro 11.	Cambio en la variable de Radiación neta (ΔRn , %) utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO ₂) y 8.5 (1370 ppm de CO ₂)	59
Cuadro 12.	Cambio en el rendimiento potencial ($\Delta Y_{m\acute{a}x}$, %) para el periodo 2015-2039, utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO ₂) y 8.5 (1370 ppm de CO ₂)	60
Cuadro 13.	Cambio en el rendimiento potencial ($\Delta Y_{m\acute{a}x}$, %) para el periodo 2075-2099, utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO ₂) y 8.5 (1370 ppm de CO ₂)	61
Cuadro 14.	Cambio en el Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas ($\Delta INSH$, %) para el periodo 2015-2039, utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO ₂) y 8.5 (1370 ppm de CO ₂)	62
Cuadro 15.	Cambio en el Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas ($\Delta INSH$, %) para el periodo 2075-2099, utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO ₂) y 8.5 (1370 ppm de CO ₂)	63
Cuadro 16.	Cambio en el índice integral de Fertilidad (ΔF_a , %) para el periodo 2015-2039, utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración	

	representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO ₂) y 8.5 (1370 ppm de CO ₂).....	65
Cuadro 17.	Cambio en el índice integral de Fertilidad (ΔF_a , %) para el periodo 2075-2099, utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO ₂) y 8.5 (1370 ppm de CO ₂).....	65
Cuadro 18.	Cambio en la productividad de café (ΔY_{calc} , %) para el periodo 2015-2039, utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO ₂) y 8.5 (1370 ppm de CO ₂).....	67
Cuadro 19.	Cambio en la productividad de café (ΔY_{calc} , %) para el periodo 2075-2099, utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO ₂) y 8.5 (1370 ppm de CO ₂).....	68
Cuadro 20.	Valores porcentuales de error generados por la exclusión del componente de fertilidad en el modelo utilizado para el cálculo de la productividad de café (ΔY_{calc} , %) para el periodo 2075-2099, utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO ₂) y 8.5 (1370 ppm de CO ₂).....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Municipios seleccionados de las regiones cafetaleras de mayor importancia en el estado de Veracruz.	21
Figura 2. Esquema de predicción del cambio del índice integral de fertilidad agrícola F_a en una zona cafetalera de referencia en función del escenario del cambio del índice climático IHT en transcurso del siglo XXI ($j = 2015-2039$ y $j = 2075-2099$).	38
Figura 3. Comparación de la distribución de los valores modales de MO, pH, P, Na, K, Ca y el IHT en suelos de los municipios cafetaleros para diferentes altitudes del estado de Veracruz en función del índice climático IHT con las mismas propiedades típicas para suelos vírgenes ubicados en los terrenos con la pendiente menor de 3% en toda la República Mexicana.	45
Figura 4. Comparación de distribución de los valores de Relación entre los valores modales de Mg, CIC, CE, Sab en suelos de los municipios cafetaleros para diferentes altitudes del estado de Veracruz en función del índice climático IHT con las mismas propiedades típicas para suelos vírgenes ubicados en los terrenos con la pendiente menor de 3% en toda la República Mexicana.....	46
Figura 5. Dependencia del índice integral de fertilidad F_{a2000} de suelos vírgenes y de los cafetales del estado de Veracruz, para altitudes de 0 a 2500 m en función del IHT^{2000} al inicio del siglo XXI. Las líneas punteadas corresponden al rango de cambio del IHT en los cafetales del estado de Veracruz.	48
Figura 6. Comparación entre las fracciones de rendimientos observados (durante los últimos años) y estimados (modelo IIASA/FAO) para condiciones de clima actual, considerando escurrimiento para una pendiente de 0-5%	51
Figura 7. Comparación entre las fracciones de rendimientos observados (durante los últimos años) y estimados (modelo IIASA/FAO) para	

condiciones de clima actual, considerando escurrimiento para una pendiente de 5-10%52

Figura 8. Comparación entre las fracciones de rendimientos observados (durante los últimos años) y estimados (modelo IIASA/FAO para condiciones de clima actual.....53

ÍNDICE DE ANEXOS

	Página
Anexo 1. Ubicación geográfica de los municipios que integran las regiones cafetaleras, seleccionados para el estudio.	82
Anexo 2. Días representativos y número de días por mes para estimar valores promedios mensuales de Radiación.	82
Anexo 3. Valores de Radiación neta, precipitación e IHT calculado para las estaciones seleccionadas y estaciones aledañas a la zona de estudio en condiciones de inicios de siglo XXI (Actual).....	83
Anexo 4. Propiedades físicas y químicas medidas en algunos pozos de las zonas cafetaleras en el estado de Veracruz (parte I).....	84
Anexo 5. Propiedades físicas y químicas medidas en algunos pozos de las zonas cafetaleras en el estado de Veracruz (parte II).....	85
Anexo 6. Rendimientos reportados de producción del café por municipio para los años 2003-2011 en kg/ha.....	86

1. INTRODUCCIÓN

Desde que el cultivo de café llegó a tierras de América Latina, su producción se ha convertido en una de las actividades agrícolas más importantes a nivel nacional, tanto por el número de actores sociales que intervienen, como por su importancia económica; producto de los ingresos que se generan de su exportación (Robles, 2011). Se cultiva en 12 estados de la República Mexicana, predominando los pequeños productores; se tiene una superficie de 761,000 hectáreas pertenecientes a cerca de 300,000 cafecultores, de los cuales 180,000 son indígenas (Contreras, 2010).

Además, es uno de los cultivos tropicales más importantes, no solo para los 56 países productores en vías de desarrollo, sino para los Estados Unidos de America, Europa y Japón, que consumen el 80% del café producido (Moguel y Toledo, 1996). En particular para el caso de México, éste grano contribuye con más de la tercera parte de las divisas generadas por el sector agropecuario y la cuarta en las exportaciones totales del país, sólo superado por el petróleo, el turismo y la metalurgia.

Todo lo antes mencionado nos da una idea de la importancia económica nacional y local que tiene el café, por lo cual se hace necesario prestar atención a los impactos potenciales que puedan tener los cambios en las variables climáticas sobre este cultivo. Bazzaz y Sombroek (1996) mencionan que existe evidencia de que los cambios en el clima regional, que se esperan durante el siglo XXI, pueden afectar de manera significativa en la productividad agrícola y causar alteraciones en los diferentes recursos naturales.

De acuerdo con los estudios que se han desarrollado en el Instituto Nacional de Ecología, México es un país altamente vulnerable a variaciones en el clima, pudiendo reflejarse éstas en impactos negativos como sequías e inundaciones; si bien estos son fenómenos naturales y son parte de la variabilidad existente en el clima, generalmente variaciones enormes constituyen desastres naturales (Moreno y Urbina, 2008).

Entonces resulta importante hacer estimaciones de la vulnerabilidad de este cultivo ante los escenarios de cambio climático en el transcurso del siglo XXI; puesto que en caso de que los resultados nos indiquen pérdidas en la cosecha de este cultivo, puedan desarrollarse algunas medidas para la reducción de la afectación. La prevención en la afectación a la productividad es una estrategia fundamental para el desarrollo sostenible, dado que permite compatibilizar el ecosistema natural y la sociedad que lo ocupa y explota, dosificando y orientando la acción del hombre sobre el medio ambiente y viceversa. Para aprovechar los recursos naturales en forma segura es necesario conocer la amenaza y la vulnerabilidad como elementos dinámicos es decir, en constante cambio (Magaña, 2010)

En México hay pocos estudios relacionados con la estimación de la vulnerabilidad de los cultivos agrícolas al cambio climático (Conde *et al.*, 1997; Gay *et al.*, 2004). Además, en la mayoría de estos estudios no se considera el efecto de la posible alteración de la fertilidad del suelo y su impacto sobre la productividad agrícola; es decir, se asume que el cambio climático no debería afectar la fertilidad del suelo.

Durante los últimos años se han publicado varios trabajos donde fue estimada la alteración de la fertilidad de los suelos agrícolas atribuible al cambio climático, y concluido que ese factor puede tener una gran importancia en el cambio esperado de la productividad de los cultivos de maíz, trigo y sorgo (Nikolskii *et al.*, 2006; Castillo *et al.*, 2007; Terrazas *et al.*, 2011). La metodología de pronóstico de alteración de la fertilidad del suelo atribuible al cambio climático está basada en la Ley Geográfica de Zonificación del Suelo y otros recursos naturales (Tetumo *et al.*, 2001; Contreras *et al.*, 2002; Nikol'skii *et al.*, 2006; Castillo *et al.*, 2007).

Esta metodología, establece una relación cuantitativa entre los valores modales regionales de algunas propiedades químicas y biológicas del suelo virgen (no usado en la agricultura) y un índice climático llamado de aridez de Budyko llamado el Índice Hidrotémico Local (IHT). Se asume que esta metodología es válida para estimar la alteración posible del suelo para cafetales, aun si el cultivo se establece bajo la sombra de los árboles típicos de la zona.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- Determinar vulnerabilidad al cambio climático de rendimientos del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en los sitios cafetaleros de referencia del estado de Veracruz, México; considerando el impacto directo del clima sobre el cultivo y además la alteración posible en la fertilidad del suelo debido al mismo cambio climático.

2.2. Objetivos particulares

- Establecer la relación cuantitativa entre algunas propiedades y el índice integral de la fertilidad del suelo típica para las zonas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el estado de Veracruz, México; en función del índice climático IHT.
- Estimar nivel de alteración del índice integral de la fertilidad del suelo atribuible al cambio climático global en los sitios cafetaleros de referencia del estado de Veracruz durante el transcurso del siglo XXI.
- Estimar el impacto de alteración de la fertilidad del suelo y de las condiciones climáticas (actuales y futuras) sobre la productividad de los sitios cafetaleros de referencia del estado de Veracruz.
- Desarrollar recomendaciones generales para mitigar la pérdida posible de productividad de café a consecuencia del cambio climático.

3. HIPOTESIS

- Los rendimientos en la producción del cultivo de café pueden verse deteriorados a consecuencia del cambio climático.
- En los modelos de predicción de la productividad de café en función de los escenarios del cambio climático es necesario considerar no solamente el efecto directo del clima sino el efecto indirecto de la alteración posible en la fertilidad del suelo debido al mismo cambio climático.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. El cambio climático y la agricultura

A diferencia del concepto tradicional de clima, como el promedio de alguna variable, hoy en día se piensa en éste como un estado cambiante de la atmósfera, y dependiente de un gran número de factores que interactúan de manera compleja. Las formas de variabilidad del clima son muchas y, por tanto, resulta complicado pronosticarlo a largo plazo (Magaña, 2004).

Las sociedades humanas, en general, fueron capaces de adaptarse con éxito a este tipo de variabilidad climática, que generalmente se ha dado dentro de rangos manejables y cuya manifestación ha sido de manera paulatina; siendo predecible con algún grado de certeza. Sin embargo, numerosos estudios recientes apuntan a que la variación del clima registrada en los últimos años es particularmente extraordinaria (Halper y Ropelewski, 1992; Jacoby *et al.*, 1997; Mann *et al.*, 1998; Mann *et al.*, 1999; Rodney y Freddy, 2002; Caballero *et al.*, 2010).

De acuerdo con algunas de las investigaciones que se han venido realizando, se sabe de ciertos factores que pueden producir cambios en el clima; tal es el caso del aumento en la concentración de gases de invernadero en la atmósfera, principalmente el CO₂, el cual puede estar relacionado directa o indirectamente con actividades humanas como el uso de combustibles fósiles y la deforestación etc. (González *et al.*, 2003; Magaña, 2004).

Según el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), las principales anomalías que se han registrado a consecuencia del cambio climático son las siguientes (IPCC, 2012):

- Aumento de la temperatura media de la superficie terrestre, aunque con diferencias significativas por regiones. Se ha observado un aumento de días de calor extremo y reducción de días de frío extremo; además, la información histórica confirma que la temperatura media anual actualmente

es la más alta de los últimos 500 años, que la temperatura en los últimos 50 años es inusual con respecto a los últimos 1,300 años y que 11 de los 12 años entre 1995 y 2006 son más cálidos desde 1859.

- Modificación de los patrones de precipitación con diferencias regionales significativas. Se han intensificado los patrones hidrológicos de modo que llueva más en regiones de alta precipitación y menos en regiones áridas, lo que aumenta la frecuencia de inundaciones y sequías.
- Aumento del nivel del mar. Durante el siglo XX el nivel del mar aumentó entre 1,3 y 2,3 mm, con un promedio de 1,8 mm/año entre 1961 y 2003 y entre 2,4 y 3,8 mm, con un promedio de 3,1 mm/año en el período 1993-2003.
- Modificaciones en los tipos y patrones de intensidad y frecuencia de los eventos climáticos extremos.

La evidencia disponible sobre el cambio climático en América Latina y el Caribe muestra patrones regulares similares a los de nivel global.

Por otra parte, dado que la agricultura es un sector estrechamente vinculado con el clima y base de los recursos naturales, especialmente de los recursos agua y suelo, es importante estimar la vulnerabilidad agrícola a los escenarios existentes de cambio climático que se espera en el transcurso del siglo XX para determinar estrategias de su adaptación (Gay *et al.*, 2000; González *et al.*, 2003).

En general, la mayoría de los estudios dan cuenta de posibles pérdidas en la producción de ciertos cultivos básicos en la alimentación; otros estudios revelan que los mayores efectos negativos se presentarían en los países en vías de desarrollo, pues de acuerdo a sus conclusiones; los productores agrícolas en países subdesarrollados son más sensibles que los de países desarrollados (Rosenzweig y Parry, 1994; Maddison *et al.*, 2007; Cline, 2007; Mendelsohn y Seo, 2007).

Los estudios del cambio climático global y sus posibles impactos en México tienen como un antecedente fundamental la publicación de Gay (1994), en el cual se

plantearon posibles escenarios de cambio climático para nuestro país y se estudiaron también los posibles impactos en sectores tan importantes como la agricultura, los recursos hídricos y las zonas costeras, por mencionar solo algunos.

Si bien esos estudios fueron de gran relevancia, hoy los países han comprendido que el proceso de cambio climático global es un hecho que ya se está desarrollando y que, a pesar de las múltiples incertidumbres asociadas a tratar de “predecir el futuro”, es una imperiosa necesidad aplicar desde ahora estrategias de adaptación para las posibles condiciones climáticas futuras.

4.2. Escenarios futuros del clima en México

El sistema del clima-productividad agrícola es no lineal, por lo que con el fin de predecir la vulnerabilidad agrícola y medidas de adaptación de la agricultura al cambio climático, fue indispensable utilizar los resultados numéricos del cambio de clima en transcurso del siglo XXI.

Los Modelos de Circulación General de la Atmósfera (GCMs, por sus siglas en inglés) constituyen la herramienta para proyectar el clima. Una de las estrategias que se ha seguido para generar escenarios del clima futuro fue trabajar con diversos GCMs, preparando experimentos numéricos que partieran de condiciones iniciales ligeramente diferentes entre sí, bajo diversos forzantes radiativos resultado de escenarios de emisiones globales de GEI, para llegar a lo que se conoce como un ensamble multimodelo de cambio climático (Magaña, 2010).

Para que un modelo climático se considere para usarse como herramienta de análisis debe poder simular, al menos aproximadamente, el ciclo anual promedio del clima. El desarrollo de los últimos escenarios climáticos regionales para México, fue llevado a cabo por la conjunción de esfuerzos entre el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C, (CICESE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y Centro de Ciencias de la

Atmósfera de la UNAM (CCA-UNAM) en coordinación con el Instituto Nacional de Ecología (INE) ahora Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y financiado por el fondo del Medio Ambiente Mundial.

En dicho estudio se realizó un análisis regional del periodo histórico y de las proyecciones de 15 modelos de circulación global a futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099). El sustento de dicho análisis tiene sus bases en la modelación del clima desarrollado por el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5); el cual a través de un conjunto de experimentos numéricos estudia la predecibilidad del clima, explorando los alcances y limitaciones de los modelos globales. Se consideró como escenario base datos históricos (1961-2000) y para las proyecciones futuras se seleccionaron los escenarios RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5.

La abreviación RCP de los nuevos escenarios significa: Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCP, por siglas en inglés). Estos escenarios se dividen en cuatro grupos: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5, que se refieren a la radiación global de energía expresada en W/m^2 ; asumiendo que esta varía al incrementar los gases de efecto de invernadero. El cuadro 1 concentra los grupos referidos anteriormente junto a algunas de sus características.

Cuadro 1. Grupos analizados para los escenarios de cambio climático regionales esperados en México.

	FORZAMIENTO RADIATIVO	CONCENTRACIÓN (p.p.m.)	TRAYECTORIA
RCP 8.5	>8.5 Wm^{-2} en 2100	>1,370 CO_2	Aumentando
RCP 6.0	6 Wm^{-2} estable después de 2100	850 CO_2 estable después de 2100	Estable sin pararse
RCP 4.5	4.5 Wm^{-2} estable después de 2100	650 CO_2 estable después de 2100	Estable sin pararse
RCP 2.6	Pico en 3 Wm^{-2} antes del 2100 y disminuye después	Pico en 450 CO_2 antes del 2100 y disminuye después	Aumenta y posteriormente disminuye

Este estudio fue presentado en el Quinto reporte de evaluación del IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) sobre cambio climático.

Posteriormente a partir del reporte anterior; se estructuraron ejemplos de nuevos escenarios de cambio climático para México en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, utilizando 3 modelos de circulación general propuestos por el proyecto CMIP5:

- MPI-ESM-LR (Max-Planck Institute)
- GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory)
- HADGEM2-ES (Met Office Hadley).

Con el propósito de establecer consistencia con los estudios presentados en el 4to reporte de evaluación del IPCC sobre cambio climático, utilizaron la misma climatología base (1950-2000) como referencia.

Los nuevos escenarios presentados contaban con una resolución espacial original de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (55 x 55 km aproximadamente). A partir de ellos se obtuvo su respectiva anomalía y mediante un proceso de reducción de escala, se estructuraron a $30'' \times 30''$ (926 x 926 m aproximadamente). Posteriormente se sumaron las anomalías a la climatología base correspondiente y de esa forma se generaron los nuevos escenarios a muy alta resolución espacial y que incorporan el efecto topográfico considerado en la climatología base.

Asimismo para cada uno de ellos se desarrollaron bases de datos de promedios mensuales de temperatura media y precipitación (para los 12 meses) y pusieron a disponibilidad para su descarga libre y gratuita en formatos GeoTiff y txt georreferenciados; mismos que se encuentran en su portal de internet en: <http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml/index.html#ModelosGlobales5ta>.

4.3. Perspectivas y enfoques para el análisis de impactos del cambio climático en la agricultura

La agricultura es muy diversa, tanto como lo es el clima; pues dependiendo de la zona climática será el tipo de agricultura que se desarrolle. Aunado a esto, una variable más que interviene es el tipo de agricultura, que va desde la subsistencia hasta las grandes plantaciones para exportación. Esto origina que existan diferentes enfoques para el estudio de los impactos del cambio climático en la agricultura.

La determinación de los impactos del cambio climático es un tema complejo, no sólo por la interacción en las variables involucradas en la producción agrícola (agua, suelo, temperatura), sino también por las diferentes posibles escalas de análisis (global, regional, nacional, local, finca) y la variedad de enfoques metodológicos empleados para determinar impactos (CEPAL, 2010).

En términos generales se distinguen dos familias de enfoque para determinar impactos: aquellos utilizados para determinar impactos físicos y los que intentan cuantificar en términos económicos los costos de los impactos.

De acuerdo con Brklacich (2006) citado por la CEPAL (2010), se pueden distinguir dos generaciones en los estudios para la determinación de impactos físicos:

La primera generación incluye modelos en los que básicamente hay una direccionalidad lineal que incluye:

- a) El uso de escenarios de cambios climáticos para determinar impactos de primer orden; por ejemplo, de los efectos agroclimáticos a nivel regional.
- b) La determinación de impactos de segundo orden; por ejemplo, en la productividad de los cultivos y en la aptitud de las tierras agrícolas.
- c) Impactos de orden superior; por ejemplo, sobre la producción a nivel regional o de finca.

La segunda generación de estudios incorpora respuestas a los cambios climáticos observados o previstos, tanto en términos de adaptación y mitigación, como de las consecuencias de la ausencia de respuesta. Estos estudios se basan en el uso de modelos de evaluación integrada, que combinan información climatológica (datos climatológicos históricos, escenarios de cambio climático) con información de uso de la tierra, requerimientos ecológicos, dotación de recursos naturales, modelos de cultivo, modelos tecnológicos y de gestión, así como información socioeconómica.

En los estudios orientados a la determinación del costo económico de los impactos o de las opciones de mitigación, adaptación o no acción, se identifican dos enfoques metodológicos. El primero es la estimación de relaciones estadísticas o de funciones de producción; el segundo es el denominado enfoque ricardiano cuya teoría se basa en el valor de la tierra, según la cual la renta de ésta varía dependiendo del grado de fertilidad de los suelos. .

Si bien cada uno de los enfoques trata de explicar lo que pasará con la agricultura, la utilidad de cada uno tiene sus limitaciones por los grados de complejidad de los análisis, estos aspectos hacen que los resultados entre países no siempre puedan ser comparados.

4.4. Pronósticos de cambio en la productividad de cultivos utilizando escenarios de cambio climático.

Cabas *et al.* (2010) estudió los efectos de variables climáticas y no climáticas en los cultivos de maíz, soya y trigo de invierno en el suroeste de Ontario Canadá durante un periodo de 26 años; utilizó tres modelos para explicar la media y la varianza de rendimiento de maíz, soja y trigo de invierno. Sus modelos fueron estocásticos del tipo función de producción; cuyo enfoque permite estimación de los impactos de una variable de entrada, como el clima, el resultado esperado y su varianza.

En el primer modelo, sólo usó como variable independiente la económica y la de características del lugar, sin considerar medidas climáticas; en el segundo y tercer modelo utilizó dos variables climáticas (temperatura y precipitación) además de las mismas variables económicas y características del lugar que utilizó en el primer modelo. En sus resultados encontró que las variables climáticas tienen un impacto importante en el rendimiento; sobre todo las variables de temperatura y precipitación; sus proyecciones con el futuro cambio climático sugieren un efecto positivo, resultando en mayores rendimientos para el futuro.

El Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT, 2012) presentó un trabajo en 2012 cuyo objetivo principal fue la generación de escenarios climáticos futuros para predecir el impacto del cambio climático sobre la aptitud del cultivo de cacao en las principales zonas productoras de Nicaragua utilizando un método de inteligencia artificial denominado MAXENT; elaboraron tres sets de variables para modelar el comportamiento del cultivo: el primero contenía las variables climáticas (precipitación y temperatura), el segundo incluía además variables estimadas a partir de evapotranspiración potencial mensual, y un tercero que solamente consideraba las variables climáticas de precipitación más las variables de evapotranspiración. Según las proyecciones utilizadas de los escenarios de cambio climático habrá un incremento de temperatura y una disminución de la precipitación en las zonas productoras de cacao de Nicaragua. Y sin embargo, aunque a primera vista estos cambios podían parecer tener impactos negativos sobre el cultivo, los resultados obtenidos sugirieron cambios positivos en la aptitud climática, en comparación con la situación actual.

En México, entre las investigaciones que se han llevado a cabo encontramos la realizada por Conde *et al.* (2000) quien usó el modelo CERES-Maize para estimar la vulnerabilidad del maíz de temporal de México, simulando los efectos del clima y los cambios en el manejo del cultivo. En la mayoría de los sitios seleccionados en este estudio, los efectos de un cambio climático en los rendimientos de maíz de temporal resultaron negativos, con acortamientos en la estación de crecimiento del maíz, particularmente en la fase de llenado de grano. Aunque para sitios con una

altitud mayor de los 2000 m en el centro de México, los incrementos de temperatura propuestos resultaron benéficos, aún en los casos de decrementos en la precipitación.

Al aplicar estudios de sensibilidad observaron que, en todos los casos, un incremento de precipitación de 20% implicaba una disminución en los rendimientos del cultivo de maíz de temporal; la explicación sugerida fue un efecto de lavado de nutrientes del suelo, sin especificar detalles.

Para el caso del cultivo de café, también se han desarrollado en los últimos años importantes estudios: Gay *et al.* (2004) desarrolló un trabajo en el cual utilizó un modelo econométrico desarrollado para evaluar los efectos de variables climáticas y económicas sobre la producción de café en Veracruz; concluyó que la producción esperada en el 2050 podría disminuir entre un 73 y 78% de acuerdo con los escenarios optimista y pesimista respectivamente. Villers *et al.* (2009) estudio los impactos del cambio climático sobre la floración y el desarrollo del fruto del café en Veracruz. Y finalmente Schroth *et al.* (2009), quien utilizó el software MAXENT con el fin de predecir el cambio en la aptitud para la producción de café en la Sierra Madre como resultado de cambio climático (utilizando un conjunto de 17 variables climáticas); en todos los casos se estimó pérdidas cuantiosas en la producción de café.

En todos los trabajos mencionados anteriormente la vulnerabilidad de los cultivos agrícolas se ha estimada únicamente considerando efecto del cambio climático, ignorando el efecto de alteración posible de la fertilidad del suelo atribuible al mismo cambio climático, pero la cual puede afectar también la productividad agrícola.

Durante los últimos años en los trabajos de Tetumo *et al.* (2001), Contreras *et al.* (2002), Nikolskii *et al.* (2001 y 2006) se ha desarrollado una metodología para estimar grado de alteración de la fertilidad del suelo en función de los escenarios climáticos. Ésta se ha aplicado con el fin de verificar que papel tiene el factor de cambio de la fertilidad del suelo en el cambio esperado de la productividad de los

cultivos de maíz, trigo y frijol en condiciones de temporal o riego para diferentes zonas climáticas de México y específicamente en terrenos planos y con pendientes menores de 3%.

Para calcular los rendimientos de los cultivos agrícolas han utilizado un método propuesto por la FAO-IIASA (2000), el cual considera efecto del cambio de la radiación fotosintéticamente activa (una fracción de la radiación solar global), la temperatura del aire y la precipitación; que actualmente es uno de los métodos más utilizados en el mundo para la estimación de rendimiento de los cultivos agrícolas. Sus resultados han mostrado que la ignorancia del factor de alteración de la fertilidad del suelo puede causar errores de hasta un 40% en los rendimientos calculados; esto significa que es necesario tomar en cuenta este factor en las estimaciones de vulnerabilidad agrícola al cambio climático (Tetumo *et al.*, 2001; Contreras *et al.*, 2002; Nikolskii *et al.*, 2001 y Nikol'skii *et al.*, 2006; Castillo *et al.*, 2007; Herrera, 2008; Terrazas *et al.*, 2011).

4.5. La fertilidad del suelo, su influencia en la productividad agrícola y su modelación.

Jenny (1941) postula que el suelo es una función de los factores de estado: clima organismos, relieve, material paretal y tiempo. A su vez varios investigadores han estudiado factores particulares, en perfiles aislados o en secuencias (Wang y Arnold, 1973; Admundson *et al.*, 1989; Katyal y Sharma, 1991). Buol *et al.*, (1981) consideró a estos factores de la formación de suelos como agentes, fuerzas, condiciones o combinaciones de éstos que influyen sobre el material paretal con la potencialidad de determinar su cambio (Zapata, 2002).

Partiendo de los elementos que se han mencionado, es de esperarse que la intervención del hombre al cambiar la vegetación natural y establecer cultivos agrícolas, ocasione cambios en el microclima (temperatura y humedad del aire y del suelo, radiación neta, fracción de precipitación que anualmente se infiltra al suelo, etc) con respecto al que estaba presenta anteriormente; así de acuerdo con

Tetumo *et al.*, (2001) las nuevas condiciones presentes conllevan la generación de cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo hasta alcanzar un equilibrio con las nuevas condiciones microclimáticas del lugar.

Volobuyev (1974) encontró que los valores promedio anuales de la radiación neta Rn y precipitación Pr (o más bien la fracción de precipitación que anualmente se infiltra al suelo y que participa en su formación) son las dos principales características climáticas responsables de la formación del suelo y de sus propiedades físicas y químicas. Al encontrar esta dependencia establecieron una base para investigar los cambios en las propiedades del suelo a través del Índice Hidrotérmico Local (IHT) propuesto por Budyko en 1974, y que relaciona estas 2 variables, de acuerdo a la siguiente ecuación:

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

O más frecuentemente

$$IHT = \frac{Rn}{\lambda Pr} \quad (2)$$

Donde Rn es la radiación neta promedio anual en ($\text{MJ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$); λ es el calor latente de evaporación del agua ($2.512 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$); Pr es la precipitación anual (mm año^{-1}) y Es es el escurrimiento superficial anual (mm año^{-1}).

Posteriormente Aydarov (1985), Nikolskii (1987), Parfenova y Reshetkina (1995) utilizaron este enfoque para estudiar las propiedades físicas y químicas estables de los suelos de la Ex URSS no usados en la agricultura y con condiciones de geomorfología similar (Tetumo *et al.*, 2001). Así construyeron gráficas correspondientes a esta función con el cambio de los valores de cantidad de materia orgánica (MO), relación entre el ácido húmico (Ah) y ácido fúlvico (Af) en el humus, valor de acidez (pH), contenido de arcilla y limo $d < 0.001 \text{ mm}$ (siendo d el diámetro de las partículas), capacidad de intercambio catiónico (CIC),

conductividad eléctrica (CE) y contenido de agregados estables en agua (AEA); considerados por Pegov y Jomyakov (1991), como las principales propiedades del suelo, responsables de su fertilidad (Contreras *et al.*, 2002, Terrazas *et al.*, 2010).

En México Contreras *et al.*, (2002) realizó un trabajo con el fin de pronosticar cambios en algunas propiedades de los suelos agrícolas al modificarse las condiciones agrícolas. Posteriormente otros investigadores han usado este enfoque para determinar la alteración de la fertilidad del suelo usando escenarios de cambio climático y estimar su posible impacto en la agricultura (Castillo *et al.*, 2007; Herrera, 2008; Terrazas *et al.*, 2010).

4.6. Generalidades del cultivo de café

Existe una gran cantidad de información acerca del cultivo del café, y dado que no es el motivo de esta investigación escribir acerca de las características de éste cultivo, solo se abordan en el presente los factores que se relacionan directamente con las variables que serán consideradas durante el desarrollo de la misma; esta información fue tomada de Gómez *et al.* (2010).

4.6.1. Factores ecológicos que influyen en el desarrollo del café

Temperatura. La temperatura es el componente más relacionado con el crecimiento de la planta, pues bajas temperaturas propician un desarrollo lento y una maduración de frutos tardía; por otra parte, las temperaturas altas aceleran la senescencia de los frutos, disminuyen la fotosíntesis, y reducen el crecimiento y producción.

Asimismo se ha observado que la temperatura puede afectar la longevidad de la planta, su productividad y rendimiento; en general, cultivo de café necesita temperaturas mínima de 20 °C y máxima de 25 °C para lograr su desarrollo y productividad; aunque los cafetos de la especie *Coffea arabica* crecen y se desarrollan mejor bajo temperaturas que fluctúan entre los 20 y 27 °C.

Precipitación. El rango de lluvia para el cultivo de café es de 1 200 a 1 800 mm, para lograr una buena floración se necesitan un promedio de 20 mm bien distribuidas durante el año. El período seco se requiere para estimular el crecimiento de las raíces, desarrollo de ramas laterales, hojas y la formación de capullos florales. Aunque el café muestra cierta tolerancia a la sequía, un período seco prolongado disminuye la cosecha del año siguiente y puede ocasionar deficiencias nutricionales por una menor difusión de elementos en el suelo.

La lluvia excesiva inhibe la diferenciación de las yemas florales; también puede ocasionar deficiencias de nitrógeno por dilución del elemento y reducción del crecimiento de la planta.

Altitud. El cafeto se adapta desde los 500 a 1 500 msnm el mejor desarrollo y calidad del café se consigue a altitudes entre los 900 a 1 300 metros de altura sobre el nivel del mar. La altitud es un factor determinante de la calidad del café, el grano producido en altura es de mayor tamaño y rendimiento, mejor calidad, más cuerpo, aroma y acidez que el de áreas bajas.

Además la altitud incide en forma directa sobre la temperatura, de manera indirecta en la lluvia, e inversa con la iluminación.

Luminosidad. Cuando la intensidad lumínica es alta se da el cierre de estomas en las hojas del cafeto, para protegerse de una transpiración excesiva, esto trae como consecuencia una disminución en el proceso de fabricación de alimentos de la planta y por ende una baja en producción. Por otra parte cuando es baja y prolongada favorece la incidencia de plagas, da problemas de maduración del grano y, por ende, de recolección; el cafeto se considera una planta de día corto por lo que necesita de ocho a 13 horas de iluminación para florecer.

Vientos. El rango óptimo de velocidad del viento, para el café es de 5 a 15 Km/h; valores más altos provocan alta defoliación y caída de flores y frutos. Asimismo los vientos fuertes tienen una acción desecadora, provocando la intensificación de la transpiración; misma que causa una deshidratación en las hojas de la planta.

Humedad Relativa. El rango aceptable para el cultivo de café es de 65 a 85 %. Si la humedad relativa excede el 85 % se afecta la calidad del café y se favorece la incidencia de enfermedades. La humedad ayuda a fraccionar o disipar los rayos solares sirviendo como filtro y disminuyendo la intensidad lumínica. En localidades donde existen estas condiciones puede cultivarse el cafeto a plena exposición solar.

Suelos. La condición óptima de suelo para el cultivo de café es con textura franca; pero se adapta a suelos desde Franco Arcillosos hasta Franco Arenoso, con pendiente suave del cinco a 12 %.

Propiedades físicas: el suelo ideal para el cultivo de café es uno con 50 cm de profundidad, 50 % de porosidad, 45 % de sustancia mineral y 5 % de materia orgánica.

Propiedades químicas: Para el buen crecimiento del cafeto es necesaria la disponibilidad de nutrientes; Que haya sistemas de amortiguamiento que regulan la concentración de los nutrientes como materia orgánica viva o muerta. La descomposición de ciertos compuestos orgánicos, mantienen un nivel adecuado de aniones. La pérdida de materia orgánica, la acidificación, el aumento de la solución de hierro y aluminio, y la presencia de arcilla de baja actividad, en los suelos tropicales, reducen la fertilidad de los mismos.

Propiedades biológicas: En el suelo viven un gran número de organismos grandes y pequeños, que participan activamente en los procesos de transformación de materia orgánica y la transferencia de energía; razón por la cual son muy importantes para el buen desarrollo de la planta.

Acidez o pH. Es el potencial de Hidrógeno o acidez; el café tiene un rango óptimo de 5.5 a 6.5, valores debajo o arriba de ellos, afectan el desarrollo normal de raíces, crecimiento y producción.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Materiales

- Normales climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional para el estado de Veracruz, para el periodo 1981-2010. (SMN, 2013)
- Información sobre las propiedades del suelo: Contenido de materia orgánica (MO); Fósforo disponible para el cultivo (P); cationes intercambiables de potasio (K), sodio (Na), calcio (Ca) y magnesio (Mg); valores de capacidad de intercambio catiónico (CIC); y de acidez del suelo (pH) (INIFAP, 2012).
- Modelo ecofisiológico del desarrollo para el cultivo de café (IIASA/FAO, 2012).
- Información estadística sobre la producción de café por municipio en el estado de Veracruz (SIAP, 2013).
- Modelos y escenarios de la 5a Comunicación Nacional de México para la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (Cavazos *et al.*, 2013).
- Software ArcGis 10.0 (ESRI, 2010).
- Software Curve Expert (Hyams, 2010).
- Paquetería de Office.

5.2. Métodos

Para pronosticar los rendimientos del cultivo de café (*Coffea arabica* L.), en los sitios de referencia seleccionados se ha aplicado el esquema de trabajo siguiente:

1. Se han seleccionado los municipios cafetaleros para la aplicación de la presente metodología, con base en la información disponible sobre las propiedades de suelo.

2. Se han recolectado los datos climáticos de inicios del siglo XXI, para cada uno de estos municipios cafetaleros (SMN, 2013) y se ha calculado el índice climático IHT.
3. Utilizando las bases existentes (INIFAP, 2012) se han analizado las propiedades de suelos en dichos municipios cafetaleros.
4. Éstas propiedades de suelos se han colocado sobre las gráficas existentes que relacionan las propiedades de los suelos con el IHT, para suelos vírgenes no usados en la agricultura de todo el país de México; en terrenos sin erosión hídrica ni eólica y con pendientes menores de 3%. En función de concordancia entre los valores medios de las propiedades de suelos de estos municipios cafetaleros y la variación de las propiedades de los suelos vírgenes, se ha tomado la decisión para interpretar la dependencia entre los valores modales de las propiedades de suelos de las cafetales en función del IHT; definiendo así el valor del índice integral de Fertilidad del suelo (F_a).
5. Se ha calculado la productividad de café (*Coffea arabica* L.) en cada uno de estos municipios y comparado con los rendimientos promedio anuales registrados (SIAP, 2013).
6. Se han aplicado los escenarios del cambio climático existentes en transcurso del siglo XXI para cada uno de estos municipios para el cálculo del índice climático IHT.
7. Se ha estimado cambio de la fertilidad típica de suelos de los municipios cafetaleros en el transcurso del siglo XXI en función de los escenarios del cambio climático.
8. Se han calculado los rendimientos de café para cada uno de estos municipios para los períodos 2015-2039 y 2075-2099 considerando los factores climáticos y del cambio de fertilidad de suelos y se ha estimado cambio relativo esperado de los rendimientos en futuro como fracción de los rendimientos actuales.

5.2.1. Selección del área de estudio

La primera parte del trabajo consistió en la realización de un análisis del estado de Veracruz, para la identificación de las regiones cafetaleras. De acuerdo con la Asociación Veracruzana de la Cadena Productiva del Café, existen 10 regiones cafetaleras conformadas por un total de 84 municipios cafetaleros (Avercafé, 2009) En el cuadro 2 se presentan las 10 regiones cafetaleras del estado de Veracruz y el porcentaje de superficie correspondiente a cada una de ellas.

Cuadro 2. Regiones cafetaleras del estado de Veracruz y el porcentaje que representan del total de la superficie cafetalera.

REGIÓN	% DE SUPERFICIE
Los Tuxtlas	2.91%
Atzalan	8.60%
Chicontepec	2.46%
Coatepec	19.93%
Córdoba	15.31%
Huatusco	20.40%
Misantla	7.98%
Papantla	2.78%
Tezonapa	12.55%
Zongolica	7.07%
Total General	100.00%

Fuente: Avercafé (2009)

Por otra parte, los estudios con que se cuenta sobre la cafecultura en el estado de Veracruz, abarcan primordialmente 7 regiones productoras de café, que se encuentran ubicadas en la zona centro, y donde se concentra el 90% de los productores y el 93% del total de la superficie cafetalera de la entidad; éstas son: Atzalan, Coatepec, Córdoba, Huatusco, Misantla, Tezonapa y Zongolica (Moguel y Toledo (1996 y 1999); López *et al.*, 2007).

Una vez que fueron identificadas las regiones cafetaleras se procedió a seleccionar los municipios que de acuerdo a la información disponible de propiedades del suelo, rendimientos y normales climatológicas podrían incluirse en el presente estudio. En la Figura 1 se muestra ubicación de las principales

regiones productoras de café (izquierda) y los municipios que las componen, donde se han coloreado los que se utilizarán para el presente estudio (derecha).

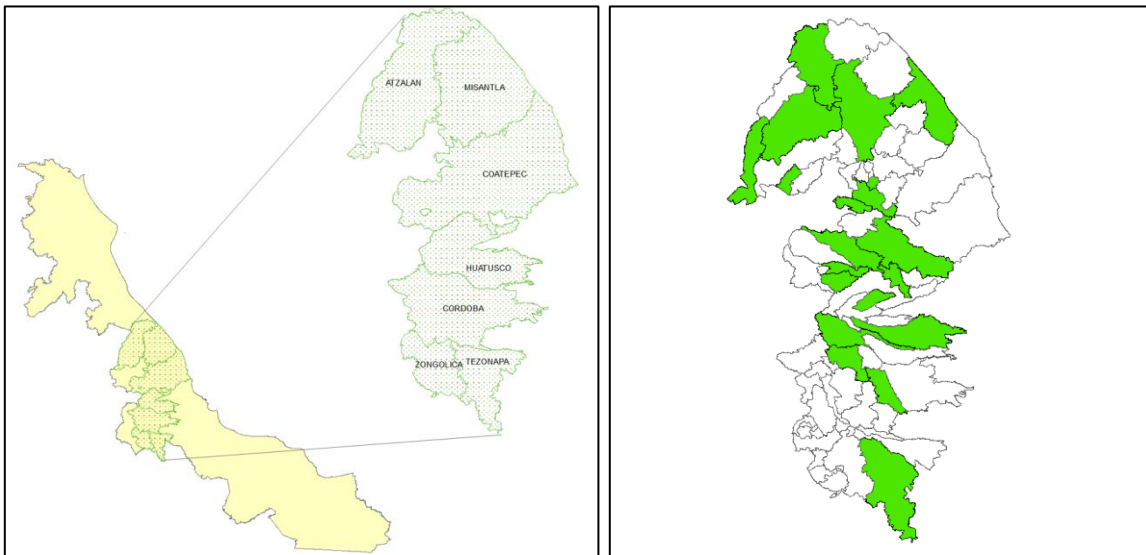


Figura 1. Municipios seleccionados de las regiones cafetaleras de mayor importancia en el estado de Veracruz.

5.2.2. Extracción de la información puntual de los escenarios de cambio climático.

La información climática actual fue obtenida de las estaciones meteorológicas del estado de Veracruz mencionadas en el Cuadro 3.

Como se mencionó anteriormente, la información de los escenarios de cambio climático fue generada en mapas de alta resolución espacial en formato geotiff georeferenciados; la información generada contiene datos promedios mensuales de temperatura media y precipitación (Cavazos *et al.*, 2013).

Para conocer los datos puntuales correspondientes a las estaciones climatológicas seleccionadas para el estudio, se utilizó el software ArcGis 10 (ESRI, 2010) y mediante una herramienta de análisis espacial, se extrajo el valor de temperatura media y precipitación de cada uno de los mapas generados para los escenarios de cambio climático; correspondiente a las coordenadas de cada estación.

Cuadro 3. Estaciones climatológicas utilizadas para la obtención de información de los municipios estudiados

REGIÓN CAFETALERA	MUNICIPIO	NOMBRE DE LA ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA	NO. DE ESTACION
Atzalan	Atzalan	Atzalan, Atzalan	30012
	Jalacingo	Jalacingo, Jalacingo	30074
	Las minas	Las minas, Las minas	30089
	Martínez de la torre	Martínez de la torre	30213
Coatepec	Naolinco	Almolonga, naolinco	30007
	Coatepec	Coatepec, Coatepec	30026
	Jalcomulco	Jalcomulco, Jalcomulco	30076
	Teocelo	Teocelo, Teocelo	30179
	Jilotepec	La concepción, Jilotepec	30267
	Cosautlán de Carvajal	Cosautlán, Cosautlán	30311
Córdoba	Emiliano Zapata	Cerro gordo, Emiliano Zapata	30339
	Ixhuatlán del café	Ixhuatlán del café	30072
	Atoyac	Santa Anita, Atoyac	30155
Huatusco	Comapa	El coyol, Comapa (CFE)	30047
	Tenampa	Tenampa, Tenampa	30177
	Huatusco	Centro Regional, Huatusco	30342
Misantla	Vega de Alatorre	Vega de Alatorre	30191
	Misantla	Libertad, Misantla	30337
	Acatlán	Acatlán, Acatlán	30338
Tezonapa	Tezonapa	Vista hermosa, Zongolica	30197

Dado que entre los datos necesarios debíamos conocer la Temperatura máxima y Temperatura mínima, una vez que se extrajeron los valores de temperatura media, se asumió que la oscilación térmica se mantiene y se estimaron dichos datos.

5.2.3. Cálculo del Índice Hidrotérmico Local para la zona cafetalera en el estado de Veracruz

Debido a que para la presente investigación asumimos que el Índice integral de fertilidad del suelo puede ser modelado a través del Índice Hidrotérmico Local (IHT). Una vez conocida la zona de estudio, fue necesario calcular los valores de IHT, utilizando la ecuación 2, en función de las condiciones climáticas del escenario base (actuales).

Así que para el cálculo de éste y con el fin de obtener un valor de IHT en cualquier punto de las zonas cafetaleras a fin de relacionarlo con los muestreos de propiedades de suelos, se usaron los datos de todas las estaciones presentes en la zona cafetalera, incluyendo los municipios aledaños y posteriormente se interpolaron valores por el método de Kriging.

Los valores de Radiación neta se calcularon con base en las ecuaciones presentadas por Allen *et al.* (2006) para el caso de ausencia de información medida, utilizando mínimos datos climatológicos (Temperatura máxima, Temperatura mínima y Precipitación); sin embargo, dado que el procedimiento que presenta es para realizar cálculos diarios, se adaptó uno de los procedimientos seguidos por Contreras *et al.* (2002), quien menciona en su investigación que para estimar los valores promedios mensuales de radiación, se puede tomar un día representativo para el cual se realiza el cálculo y posteriormente se multiplica por el número de días del mes, en el anexo 2 se muestran los días representativos para cada mes.

El procedimiento para su cálculo fue el siguiente:

1. Cálculo de la **Radiación extraterrestre (R_a)**. La radiación extraterrestre es función de la latitud, la época del año y la hora del día.

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (3)$$

Donde:

R_a = Radiación extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]

G_{sc} = Constante solar = $0.082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$

d_r = Distancia relativa inversa Tierra-Sol

ω_s = Ángulo de radiación a la puesta de sol [Rad]

φ = Latitud [Rad]

δ = Declinación solar [Rad]

El cálculo de cada uno de los componentes de la Radiación extraterrestre (R_a) se obtiene con las ecuaciones 4, 5 y 6; y haciendo uso de la ecuación 6 para la conversión coordenadas en grados decimales a radianes.

Distancia relativa de la tierra al sol de un determinado día (d_r)

$$d_r = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (4)$$

Donde:

J = Día Juliano

Ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol (ω_s)

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad (5)$$

Donde:

φ = Latitud [Rad]

δ = Declinación solar [Rad]

Declinación solar (δ)

$$\delta = 0.409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (6)$$

Donde:

J = Día Juliano

Conversión de grados decimales a radianes

$$[\text{radianes}] = \frac{\pi}{180} [\text{grados decimales}] \quad (7)$$

2. Cálculo de la **Radiación solar global (R_s)**. La radiación solar puede ser derivada de las ondas térmicas. Este principio se basa la ecuación de radiación de Hargreaves, la cual ha sido ajustada y validada en varias estaciones meteorológicas en una amplia variedad de condiciones climáticas.

$$R_s = k_{Rs} \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} R_a \quad (8)$$

Donde:

R_a = Radiación extraterrestre [MJ m⁻² día⁻¹]

T_{\max} = Temperatura máxima del aire [°C]

T_{\min} = Temperatura mínima del aire [°C]

k_{Rs} = Coeficiente de ajuste (0.16 ó 0.19) [°C^{-0.5}]

Para las localidades “interiores”, en donde la masa de tierra domina y las masas de aire no están influenciadas fuertemente por un cuerpo grande del agua, $k_{Rs} \approx 0.16$; y para las localizaciones “costeras”, situadas en la costa o cerca de una masa grande de tierra y donde las masas de aire están influenciadas por un cuerpo de agua cercano, $k_{Rs} \approx 0.19$.

3. Cálculo de la **Radiación neta de onda corta (R_{ns})**. La radiación neta de onda corta es resultante del equilibrio entre la radiación solar entrante y la reflejada.

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (9)$$

Donde

R_{ns} = Radiación neta de onda corta [MJ m⁻² día⁻¹]

α = albedo o coeficiente de reflexión del cultivo [Adimensional]

R_s = Radiación solar entrante [MJ m⁻² día⁻¹]

De acuerdo con investigaciones realizadas para la evaluación de aspectos microclimáticos en zonas cafetaleras bajo condiciones de sombrío y exposición solar y a diferentes posiciones geográficas y altitudes, se encontró que el valor de albedo era del 15% (Jaramillo y Santos, 1980; Escobar y Jaramillo, 1983; Jaramillo y Gómez, 1989; Jaramillo 2005).

4. Cálculo de la **Radiación neta de onda larga (R_{nl})**. La cantidad de emisión de energía de onda larga es proporcional a la temperatura absoluta de la superficie elevada a la cuarta potencia; relación expresada cuantitativamente por la ley de Stefan-Boltzmann. No obstante, la humedad y la nubosidad tienen un papel importante, por lo que es necesario una corrección a la ley de Stefan-Boltzmann para estimar el flujo saliente neto de la radiación de onda larga.

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{(T_{\max,K})^4 + (T_{\min,K})^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (10)$$

Donde

R_{nl} = Radiación neta de onda larga [MJ m⁻² día⁻¹]

σ = Constante de Stefan-Boltzmann [4.903 X 10⁻⁹ MJ K⁻⁴ m⁻² día⁻¹]

$T_{\max,K}$ = Temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas
[K=°C + 273.16]

$T_{\min,K}$ = Temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas
[K=°C + 273.16]

e_a = Presión de vapor real [kPa]

R_s/R_{so} = Radiación relativa de onda corta (valores ≤ 1.0)

R_s = Radiación solar medida o calculada [MJ m⁻² día⁻¹]

R_{so} = Radiación en un día despejado [MJ m⁻² día⁻¹]

El término $(0,34-0,14\sqrt{e_a})$ expresa la corrección para la humedad del aire y el efecto de la nubosidad se expresa por $(1.35 R_s/R_{so} - 0.35)$.

El cálculo de cada uno de los componentes de la Radiación neta de onda larga (R_{nl}) se obtiene con las ecuaciones 10, 7 y 11.

Presión real de vapor (e_a)

El cálculo de la presión real de vapor requiere de parámetros como la temperatura del punto de rocío ($T_{\text{rocío}}$) o la humedad relativa (HR); sin embargo cuando los

datos de HR o $T_{\text{rocío}}$ no son confiables o bien no se cuenta con ellos, se puede asumir que $T_{\text{rocío}} \approx T_{\text{mín}}$.

Así se asume implícitamente que a la salida del sol, cuando la temperatura del aire esta alrededor de $T_{\text{mín}}$, el aire está casi saturado con vapor de agua y que la humedad relativa es de alrededor de 100%.

$$e_a = 0.611 \exp \left[\frac{17.27 T_{\text{mín}}}{T_{\text{mín}} + 237.3} \right] \quad (11)$$

Donde

e_a = Presión real de vapor [kPa]

$T_{\text{mín}}$ = Temperatura mínima (°C)

La relación $T_{\text{rocío}} \approx T_{\text{mín}}$ se mantiene para regiones húmedas y subhúmedas.

Radiación de onda corta en un día despejado (R_{so})

Una buena aproximación de R_{so} para periodos diarios y horarios está dada por la ecuación (12) y es válida para elevaciones menores de 6 000 m con baja turbidez atmosférica:

$$R_{\text{so}} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad (12)$$

Donde

R_{so} = Radiación neta de onda larga [MJ m⁻² día⁻¹]

z = Elevación de la estación (m)

R_a = Radiación extraterrestre [MJ m⁻² día⁻¹]

5. Cálculo de la **Radiación neta (R_n)**. La Radiación neta (R_n) es la diferencia entre la Radiación neta de onda corta (R_{ns}) y la Radiación neta de onda larga (R_{nl}):

$$R_n = R_{\text{ns}} - R_{\text{nl}} \quad (13)$$

Los valores de precipitación fueron tomados de las normales climatológicas; en cuanto al escurrimiento superficial, es sabido que existen metodologías para el cálculo del mismo con el fin de estimar volúmenes que podrían almacenarse (Escorrimento medio, Método de curvas numéricas, etc), sin embargo, éstos son muy generalizados y se tienen pocos estudios en los que se pueda verificar volúmenes escurridos.

Pérez *et al.* (2005) evaluó el escurrimiento y pérdida de suelo para diferentes sistemas agroforestales de café bajo sombra en un estudio llevado a cabo entre los años 2000 y 2001. De los 132 eventos de lluvia registrados en el 2000 sólo en 29% hubo escurrimiento superficial y de 178 eventos en el 2001 sólo en 34%. Originando bajos coeficientes de escurrimiento (0.8 a 14%); por lo que en la presente investigación no se considera escurrimiento superficial.

Posteriormente usando el mismo procedimiento se realizan los cálculos de IHT para condiciones futuras, para los periodos referidos en los escenarios de cambio climático durante el siglo XXI (2015-2039 y 2075-2099).

5.2.4. Análisis de las propiedades físicas y químicas de los suelos y establecimiento de la relación entre éstas y el IHT para condiciones actuales.

El Instituto de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) con sede en Xalapa, Veracruz; muestreó varias propiedades del suelo a diferentes profundidades y en diversos pozos edáficos situados dentro de las región cafetalera del estado de Veracruz (INIFAP, 2012).

Las propiedades químicas del suelo muestreadas fueron las siguientes:

- Logaritmo negativo de la actividad del ion hidrógeno, pH (adimensional)
- Contenido de materia orgánica MO (%)
- Capacidad de intercambio catiónico, CIC (meq/100 g)
- Saturación de bases, Sab (%)

- Conductividad eléctrica, CE (mmhos/cm)
- Fósforo disponible para los cultivos agrícolas, P (ppm)
- Calcio intercambiable, Ca (ppm)
- Magnesio intercambiable, Mg (ppm)
- Sodio intercambiable, Na (ppm)
- Potasio intercambiable, K (ppm)

Como el Índice Hidrotérmico Local es representativo para el estrato superficial del suelo, que es el que está siendo afectado constantemente por el intemperismo; y de acuerdo con la literatura, el 90% de las raíces activas se encuentra en los primeros 30 cm de profundidad del suelo. Las propiedades de los muestreos obtenidas se utilizaron de acuerdo a esta profundidad.

Para construir las gráficas que conducen a la relación de IHT con la fertilidad, se tomaron los datos que recopiló Contreras *et al.* (2002) y se sobrepuso la información medida por el INIFAP, con el fin de verificar la validez de usar la relación entre el IHT y el índice integral de fertilidad del suelo (F_a) encontrada por dicho investigador.

5.2.5. Estimación de los rendimientos del cultivo de café (*Coffea arabica* L.)

Los rendimientos del cultivo de café variedad *Coffea arabica* L., para los años de referencia con el superíndice j se calcularon con la ecuación propuesta por la IIASA/FAO (2012) y Pegov y Jomyakov (1991):

$$Y_{\text{calc}}^j = Y_{\text{máx}}^j * ISNH^j * F_a^j \quad (14)$$

Donde:

Y_{calc}^j = Productividad agrícola del cultivo de café variedad (*Coffea arabica* L.) (en 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 periodos referidos en los escenarios de cambio climático durante el siglo XXI ($j = 2015-2039$ y $j = 2075-2099$).

$Y_{\text{máx}}^j$ = Rendimiento potencial máximo o agroclimático de la materia seca económicamente aprovechable que pueden producir plantas sanas con un suministro adecuado de agua y nutrientes (en $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$); 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 (*Coffea arabica* L.), para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$), y para los periodos referidos en los escenarios de cambio climático durante el siglo XXI ($j = 2015-2039$ y $j = 2075-2099$).

ISNH^j = Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas (adimensional), que caracteriza la disponibilidad de agua para los cultivos y depende de la precipitación y evapotranspiración, estimado para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$), y para los periodos referidos en los escenarios de cambio climático durante el siglo XXI ($j = 2015-2039$ y $j = 2075-2099$).

F_a^j = Índice integral de fertilidad agrícola o fertilidad del suelo (adimensional); estimado para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$), y para los periodos referidos en los escenarios de cambio climático durante el siglo XXI ($j = 2015-2039$ y $j = 2075-2099$).

5.2.5.1. Cálculo del rendimiento potencial máximo ($Y_{\text{máx}}^j$).

El cálculo de la biomasa y el rendimiento potencial ó máximo $Y_{\text{máx}}^j$ (en kg ha^{-1}) del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) se realizó utilizando un modelo basado en principios ecofisiológicos (IIASA/FAO, 2012). El rendimiento está estimado en función del régimen de las variables climáticas de temperatura y radiación solar, y se calcula de acuerdo a la ecuación siguiente:

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

Donde:

$Y_{\text{máx}}^j$ = El rendimiento potencial máximo o agroclimático de la materia seca económicamente aprovechable que pueden producir plantas sanas con un suministro adecuado de agua y nutrientes (en $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$); 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 (*Coffea arabica* L.), para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$), y para los periodos referidos en los escenarios de cambio climático durante el siglo XXI ($j = 2015-239$ y $j = 2075-2099$).

Bn = Biomasa neta de la materia seca total (en kg ha^{-1});

IC = Índice de cosecha, o la fracción de Bn correspondiente al producto agrícola (adimensional).

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

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

Donde:

b_{gm} = Tasa máxima de producción de biomasa bruta de un cultivo de referencia con el Índice de Área Foliar (IAF) igual a 5 (en $\text{kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$); b_{gm} depende principalmente de la Radiación Fotosintéticamente Activa y de la concentración de CO_2 en la atmósfera

L = 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: $IAF < 5$ (adimensional).

N = Duración del ciclo normal del cultivo (en días); para el cultivo de café (*Coffea arabica* L.) la duración de ciclo es de 270 días (IIASA/FAO, 2012).

C_t = Fracción de la tasa de producción de biomasa bruta (como CH_2O) que se pierde por la respiración de mantenimiento, misma que depende del tipo de cultivo (leguminosa o no leguminosa) y de la temperatura media del aire (kg dia^{-1}).

Para el cálculo de cada uno de los componentes de la ecuación 16, los procedimientos se muestran a continuación:

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

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

$$b_{gm} = F(0.8 + 0.01 P_m)b_O + (1-F)(0.5 + 0.025P_m)b_C \quad (17)$$

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

$$b_{gm} = F(0.8 + 0.01 P_m)b_O + (1-F)(0.5 + 0.025P_m)b_C \quad (18)$$

Donde:

F = Parámetro adimensional dependiente de la Radiación Fotosintéticamente Activa (A_c) teórica o potencial diaria con el cielo totalmente despejado (en $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y de la Radiación global de onda corta (R_g , en $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$). Esta ecuación asume que la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) real es la mitad de la Radiación global y que en un día nublado, la RFA es el 20% de la teórica (A_c).

$$F = \frac{A_c - 0.5R_g}{0.8 A_c} \quad (19)$$

b_o = Tasa bruta 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, con dosel cubriendo completamente el terreno y una tasa máxima de producción de biomasa de $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

b_c : Tasa bruta 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 despejados, con dosel cubriendo completamente el terreno y una tasa máxima de producción de biomasa de $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

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

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

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

$$C_t = C_{30}(0.0044 + 0.0019 T + 0.0010 T^2) \quad (20)$$

Donde:

T = Temperatura media mensual del aire durante el ciclo del cultivo.

C_{30} = Tasa de pérdida de producción de biomasa bruta por la respiración de mantenimiento a 30°C (0.0108 para plantas no leguminosas, como en este caso).

La información bibliográfica sobre IC, n, IAF, ruta fotosintética, Pm, b_o , b_c y datos regionales sobre inicio y duración del ciclo del cultivo de café en México obtenidos la publicación "Global Agro-ecological Zones" (IIASA/FAO, 2012) y "Photosynthesis of leaf Canopies" (De Wit, 1966).

En cuanto a la información para el cálculo según los periodos referidos en los escenarios de cambio climático para del siglo XXI ($j = 2015-239$ y $j = 2075-2099$), se tomaron las siguientes consideraciones:

- El IC prácticamente no depende del cambio climático, por lo que no se considera cambio; asimismo el IAF se considera sin cambio (Cure y Acock, 1986; Anthony y Ziska, 2000).
- La duración del ciclo del cultivo (N), se considera sin cambio; pues en la metodología no se consideran cambios para la fenología del cultivo de café; debido a que no se cuenta con investigaciones referentes al tema en nuestro país.
- Se asume que la transmisividad de la atmósfera no cambia de modo significativo debido a su propiedad diatérmica, por lo que los parámetros b_o , b_c permanecen sin cambio.

5.2.5.2. Cálculo del índice de satisfacción de las necesidades hídricas (INSH).

El índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas se calculó a través del balance hídrico anual en la zona radical, de tipo acumulativo, utilizando una escala mensual, con base en la ecuación propuesta por Frére y Popov (1986):

$$INSH_i^j = INSH_{i-1}^j - \left(\frac{DEF_i^j}{\sum_i^n NH^j} \right) * 100 \quad (21)$$

Donde

$INSH_i^j$ = Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas en el mes i para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$), y para los periodos referidos en los escenarios de cambio climático durante el siglo XXI ($j = 2015-239$ y $j = 2075-2099$).

$INSH_{i-1}^j$ = Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas para el mes anterior; para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$), y para los periodos

referidos en los escenarios de cambio climático durante el siglo XXI ($j = 2015-239$ y $j = 2075-2099$).

DEF_i^j = Es el valor absoluto de la Deficiencia de Humedad en el mes i para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$), y para los periodos referidos en los escenarios de cambio climático durante el siglo XXI ($j = 2015-239$ y $j = 2075-2099$).

$\sum_i^n NH^j$ = Es la sumatoria de las Necesidades Hídricas del cultivo, desde el mes i hasta el n considerando su ciclo (270 días) para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$), y para los periodos referidos en los escenarios de cambio climático durante el siglo XXI ($j = 2015-239$ y $j = 2075-2099$).

El cálculo de las Necesidades Hídricas del cultivo se realizó utilizando la siguiente ecuación (Jiménez *et al.*, 2004):

$$NH = ET_i^j * Kc_i^j \quad (22)$$

Donde:

NH = Necesidades Hídricas del cultivo en el mes i para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$), y para los periodos referidos en los escenarios de cambio climático durante el siglo XXI ($j = 2015-239$ y $j = 2075-2099$).

ET_i^j = Evapotranspiración potencial del cultivo de referencia (mm), en el mes i para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$), y para los periodos referidos en los escenarios de cambio climático durante el siglo XXI ($j = 2015-2039$ y $j = 2075-2099$).

Kc_i^j = Coeficiente que integra las diferencias en la evaporación del suelo y en la tasa de transpiración del cultivo, entre el cultivo de café (*Coffea arabica* L.) y el cultivo de referencia en el mes i para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$), y para los periodos referidos en los escenarios de cambio climático durante el siglo XXI ($j = 2015-2039$ y $j = 2075-2099$).

El ciclo de cultivo considerado fue de 270 días, correspondiendo éstas al periodo comprendido entre el 15 de Febrero al 18 de Noviembre; que es considerado el periodo durante el cual la planta tiene producción de biomasa (IIASA/FAO, 2012).

El cálculo de la evapotranspiración se realizó con base en las recomendaciones de Allen *et al.* (2006), con mínimos datos climatológicos, de tal manera que existiera congruencia con los cálculos para IHT; para ello se utilizó el programa CROPWAT (v8.0) (FAO, 2013)

El valor del coeficiente único de cultivo (Kc) utilizado fue Kc=1.1 durante todo el ciclo del cultivo (Allen *et al.*, 2006).

Los datos de la lámina de agua aprovechable almacenada disponible para el cultivo, fueron calculados con base en la textura de suelo (misma que se obtuvo a partir de las mediciones de porcentaje de arena, limo y arcilla utilizando el triángulo de texturas) y para una profundidad de 70 cm profundidad, que corresponde a la zona radical del cafeto.

5.2.5.3. Cálculo del índice integral de fertilidad agrícola o del suelo (F_a)

El índice integral de fertilidad agrícola (F_a) para el escenario base se ha calculado según la fórmula propuesta por Pegov y Jomyakov (1991) modificada por Nikolskii *et al.*, (2006).

$$F_a^j = 0.46 \frac{M.O.}{M.O.máx.} + 0.28 \sqrt{\frac{P}{P_{máx.}} \frac{K}{K_{máx.}}} + 0.26 e^{-\left(\frac{pH-6}{2}\right)^2} \quad (23)$$

Donde:

F_a^j = Fertilidad agrícola (o del suelo) para el escenario base a inicios del siglo XXI (j = 2000)

M.O. = Valor modal del contenido de materia orgánica en el suelo, típico para los suelos de cafetales con el mismo índice climático IHT para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$).

P = Valor modal del contenido de fósforo disponible en el suelo, típico para los suelos de cafetales con el mismo índice climático IHT para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$).

K = Valor modal del contenido de potasio disponible en el suelo, típico para los suelos de cafetales con el mismo índice climático IHT para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$).

pH = Valor modal de pH en el suelo, típico para los suelos de cafetales con el mismo índice climático IHT para el escenario base a inicios del siglo XXI

M.O._{máx.}, P_{máx.} y pH = Valores máximos observados de M.O., P y K en los terrenos estudiados ($j = 2000$).

El valor F es adimensional y varía entre 1 y 0. 1 corresponde al suelo más fértil potencialmente y 0 al suelo completamente degradado e infértil.

El pronóstico del cambio en la fertilidad del suelo para los periodos referidos en los escenarios de cambio climático durante el siglo XXI ($j = 2015-2039$ y $j = 2075-2099$), se tomó como base la dependencia existente del índice de la fertilidad F en función del índice climático IHT para inicios del siglo XXI para los terrenos vírgenes sin problemas de erosión hídrica y eólica (Nikolskii *et al.*, 2001 y 2006; Castillo *et al.*, 2007; Herrera *et al.*, 2008; Terrazas *et al.*, 2010). Para ello, utilizando la gráfica F(IHT) y sabiendo los valores del IHT para inicio del siglo XXI ($j = 2000$) y para futuro ($j = 2015-2039$ y $j = 2075-2099$) en cada sitio de referencia (es decir, en municipio cafetalero); se ha estimado el cambio relativo del índice F en el futuro con respecto a su valor correspondiente al inicio del siglo ($j = 2000$).

El esquema de estimación del cambio del índice de la fertilidad F en función del cambio del índice climático IHT se muestra en la Figura 2.

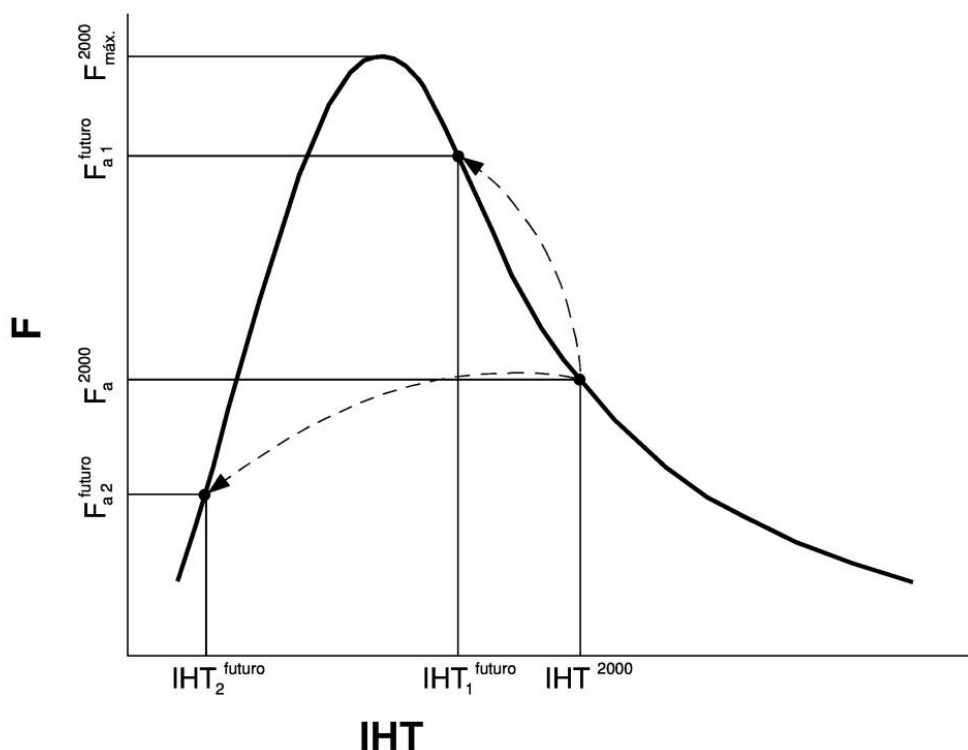


Figura 2. Esquema de predicción del cambio del índice integral de fertilidad agrícola F_a en una zona cafetalera de referencia en función del escenario del cambio del índice climático IHT en transcurso del siglo XXI ($j = 2015-2039$ y $j = 2075-2099$).

La figura 2 corresponde a las condiciones actuales del escenario base (inicio del siglo XXI). IHT^{2000} y F^{2000} son los valores del IHT y F correspondientes una zona cafetalera a principios del siglo XXI; $F_{\text{máx.}}^{2000}$ es el valor modal regional máximo observado entre todos los sitios analizados a nivel del país; IHT_1^{futuro} e IHT_2^{futuro} son los valores posibles del cambio del IHT en el mismo sitio para el caso de los escenarios del cambio climático 1 y 2, respectivamente ($j = 2015-2039$ y $j = 2075-2099$); F_1^{futuro} y F_2^{futuro} son valores posibles del cambio del índice integral de la fertilidad del suelo en la misma zona cafetalera para dichos escenarios del cambio climático.

5.2.6. Estimación del cambio en los rendimientos del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en función de los escenarios del cambio climático

Con el fin de conocer el impacto que tiene cada uno de los componentes de la ecuación, se hizo un análisis para determinar el cambio en cada uno de ellos, de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$\Delta Y = \left(\frac{Y_{\text{máx}}^{2015-2039}}{Y_{\text{máx}}^{2000}} \frac{\text{INSH}^{2015-2039}}{\text{INSH}^{2000}} \frac{F_a^{2015-2039}}{F_a^{2000}} - 1 \right) 100 \quad (24)$$

Y

$$\Delta Y = \left(\frac{Y_{\text{máx}}^{2075-2099}}{Y_{\text{máx}}^{2000}} \frac{\text{INSH}^{2075-2099}}{\text{INSH}^{2000}} \frac{F_a^{2075-2099}}{F_a^{2000}} - 1 \right) 100 \quad (25)$$

Donde:

$Y_{\text{máx}}^{2000}$, $Y_{\text{máx}}^{2015-2039}$ y $Y_{\text{máx}}^{2075-2099}$ = Rendimientos del cultivo, calculados para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$), y para los periodos referidos en los escenarios de cambio climático durante el siglo XXI ($j = 2015-239$ y $j = 2075-2099$).

$\frac{Y_{\text{máx}}^{2075-2099}}{Y_{\text{máx}}^{2000}}$ y $\frac{Y_{\text{máx}}^{2015-2039}}{Y_{\text{máx}}^{2000}}$ = Relación entre rendimientos

$\frac{\text{INSH}^{2075-2099}}{\text{INSH}^{2000}}$ y $\frac{\text{INSH}^{2015-2039}}{\text{INSH}^{2000}}$ = Relación entre los Índices de Satisfacción de las Necesidades Hídricas calculados para el ciclo de cultivo; para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$), y para los periodos referidos en los escenarios de cambio climático durante el siglo XXI ($j = 2015-239$ y $j = 2075-2099$).

$\frac{F_a^{2015-2039}}{F_a^{2000}}$ y $\frac{F_a^{2075-2099}}{F_a^{2000}}$ = Relación entre los índices integrales de la fertilidad del suelo agrícola estimados para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$), y para los periodos referidos en los escenarios de cambio climático durante el siglo XXI ($j = 2015-239$ y $j = 2075-2099$).

Posteriormente se realizó la estimación del cambio relativo en el rendimiento del cultivo de café (ΔY , en %), producido para los escenarios seleccionados se realizó con la siguiente ecuación:

$$\Delta Y = \left(\frac{Y_{\text{calc}}^{2015-2039} - Y_{\text{calc}}^{2000}}{Y_{\text{calc}}^{2000}} \right) 100 \quad (26)$$

Y

$$\Delta Y = \left(\frac{Y_{\text{calc}}^{2075-2099} - Y_{\text{calc}}^{2000}}{Y_{\text{calc}}^{2000}} \right) 100 \quad (27)$$

Donde:

Y_{calc}^{2000} , $Y_{\text{calc}}^{2015-2039}$ y $Y_{\text{calc}}^{2075-2099}$ = Rendimientos del cultivo, calculados para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$), y para los periodos referidos en los escenarios de cambio climático durante el siglo XXI ($j = 2015-239$ y $j = 2075-2099$).

$$\frac{Y_{\text{calc}}^{2075-2099}}{Y_{\text{calc}}^{2000}} \text{ y } \frac{Y_{\text{calc}}^{2015-2039}}{Y_{\text{calc}}^{2000}} = \text{Relación entre rendimientos}$$

Finalmente para conocer el impacto real que tiene la inclusión o exclusión del componente de fertilidad en modelo utilizado para estimar la productividad del café, se utilizó la siguiente expresión:

$$\text{Error porcentual} = \left(\frac{\Delta Y_{\text{calc}}^{2075-2099}(\text{con } F_a) - \Delta Y_{\text{calc}}^{2075-2099}(\text{sin } F_a)}{\Delta Y_{\text{calc}}^{2075-2099}(\text{con } F_a)} \right) 100 \quad (28)$$

Donde:

$\Delta Y_{\text{calc}}^{2075-2099}(\text{con } F_a)$ = Es el valor de cambio de la productividad estimada tomando en cuenta la fertilidad en el modelo.

$\Delta Y_{\text{calc}}^{2075-2099}(\text{sin } F_a)$ = Es el valor de cambio de la productividad estimada, sin tomar en cuenta la fertilidad en el modelo.

Como se menciona, fue estimado el cambio relativo de los rendimientos con respecto a los rendimientos actuales; lo que significa que no fue importante saber los rendimientos absolutos, sino relativos como fracción de los rendimientos al inicio del siglo XXI. Así también se ha estimado el cambio de los componentes de los rendimientos calculados.

6. RESULTADOS

Los resultados que se presentan a continuación se encuentran divididos en 3 secciones:

- 1) Caracterización climática de los municipios seleccionados para estudio y estimación de la fertilidad para las condiciones actuales (escenario base).
- 2) Cálculo de rendimientos en la producción de café para las condiciones actuales y la verificación de su confiabilidad de acuerdo con los rendimientos reportados durante el periodo 2003-2011 por la SAGARPA.
- 3) Estimación del cambio en las condiciones climáticas de los municipios seleccionados para estudio con base en los escenarios de cambio climático.
- 4) Estimación de la vulnerabilidad de la productividad de café ante escenarios de cambio climático
- 5) Valoración integral de la estimación de cambio en la productividad de café

6.1. Caracterización climática de los municipios seleccionados para su estudio en las condiciones actuales (escenario base).

Los municipios seleccionados tienen reportadas altitudes que van desde los 25 msnm hasta los 1880 msnm. Si bien a primera vista pareciera que las altitudes no coinciden con las altitudes reportadas para el cultivo del café, es posible que las zonas cafetaleras dentro del municipio se encuentren a una altitud mayor que la de la cabecera municipal; puesto que dichos municipios cuentan con datos de producción de café. Las precipitaciones varían desde una lámina de 935 mm para el más crítico, hasta una lámina de 2755 mm; mientras que el Índice Hidrotérmico Local (ignorando escurrimiento superficial) varía de 0.73 hasta 1.95.

Contreras *et al.* (2002) menciona que los suelos más fértiles de México se encuentran en las zonas con clima semihúmedo, donde la precipitación promedio anual es de alrededor de 1300 mm y el índice IHT de 1.0 a 1.5; con base en ello podemos decir que los suelos de las zonas cafetaleras de encuentran entre los más fértiles.

El cuadro 4, presenta los parámetros que fueron utilizados para el cálculo del IHT en las condiciones actuales.

Cuadro 4. Valores promedio anuales temperatura media (T^{2000}), precipitación (Pr^{2000}), radiación neta (Rn^{2000}) e índice climático (IHT^{2000}), para el escenario base de inicios del siglo XXI en los municipios seleccionados con producción de café.

ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA	MUNICIPIO	T^{2000} °C	Pr^{2000} Mm año ⁻¹	Rn^{2000} Kcal cm ⁻² año ⁻¹	IHT^{2000}
30012	ATZALAN	16.1	1947.32	93.16	0.80
30074	JALACINGO	15.7	1678.52	98.33	0.98
30089	LAS MINAS	17.9	1492.89	68.94	0.77
30213	MARTÍNEZ DE LA TORRE	23.6	1986.44	94.55	0.79
30007	NAOLINCO	22.6	1046.63	120.77	1.92
30026	COATEPEC	19.6	1746.85	117.45	1.12
30076	JALCOMULCO	24.5	1090.12	127.42	1.95
30179	TEOCELO	20.6	2026.2	100.11	0.82
30267	JILOTEPEC	19.4	1663.32	76.22	0.76
30311	COSAUTLÁN DE CARVAJAL	19.8	2111.96	92.68	0.73
30339	EMILIANO ZAPATA	23.2	935.6	97.98	1.75
30072	IXHUATLÁN DEL CAFE	20.2	1900.15	115.13	1.01
30155	ATOYAC	24.5	2116.74	96.47	0.76
30047	COMAPA	23.1	1078.74	104.47	1.61
30177	TENAMPA	19.8	1681.69	82.57	0.82
30342	HUATUSCO	17.2	1960.59	92.44	0.79
30191	VEGA DE ALATORRE	24.2	1578.69	94.76	1.00
30337	MISANTLA	24.7	1715.56	105.28	1.02
30338	ACATLÁN	15.3	1442.24	75.75	0.88
30197	TEZONAPA	24.1	2755.07	126.40	0.76

Nota: Para el caso de la precipitación (Pr) y Radiación neta (Rn) los valores corresponden al acumulado anual; en el caso del IHT, éste es adimensional y característico de la zona.

6.2. Cálculo de rendimientos en la producción de café para las condiciones actuales y la verificación de su confiabilidad de acuerdo con los rendimientos reportados durante el periodo 2003-2011 por la SAGARPA.

6.2.1. Relación entre algunas propiedades de los suelos, el índice integral de fertilidad del suelo y el IHT en las condiciones actuales (escenario base)

Las gráficas que muestran las relaciones de dependencia entre los valores modales de las propiedades químicas (MO, pH, P, Na, K, Ca, Mg, CIC, CE y Sab) de los suelos y del índice hidrotérmico local se construyeron para las propiedades muestreadas y que son interés en este trabajo. Contreras *et al.* (2000) encontró que la altitud no influenciaba la relación de las propiedades con el IHT, misma información que se corrobora con la dispersión mostrada por los pozos muestreados para el presente trabajo y presentados en las figuras 3 y 4.

De acuerdo con las mismas, las propiedades de suelos de los municipios cafetaleros del estado de Veracruz prácticamente coinciden con los suelos vírgenes de los terrenos relativamente planos (con las pendientes menores de 3%) ubicados en México en las zonas con los mismos valores del índice climático IHT calculado sin consideración del escurrimiento superficial. Esto significa que las dependencias existentes en bibliografía de los valores modales de las mismas propiedades típicos para los suelos vírgenes ubicados en los terrenos con pendientes menores de 3% en función del índice climático IHT (Contreras-Benítez *et al.*, 2002; Nikol'skii *et al.*, 2002 y 2010) se puede aplicar también para los cafetales con pendientes de la superficie mayores de 3%.

Una conclusión similar fue obtenida por Cruz-Galindo (2005) quien estudió la dependencia de las mismas propiedades de suelos vírgenes no afectados por la erosión y ubicados en diferentes zonas climáticas de México en los terrenos con diferentes pendientes.

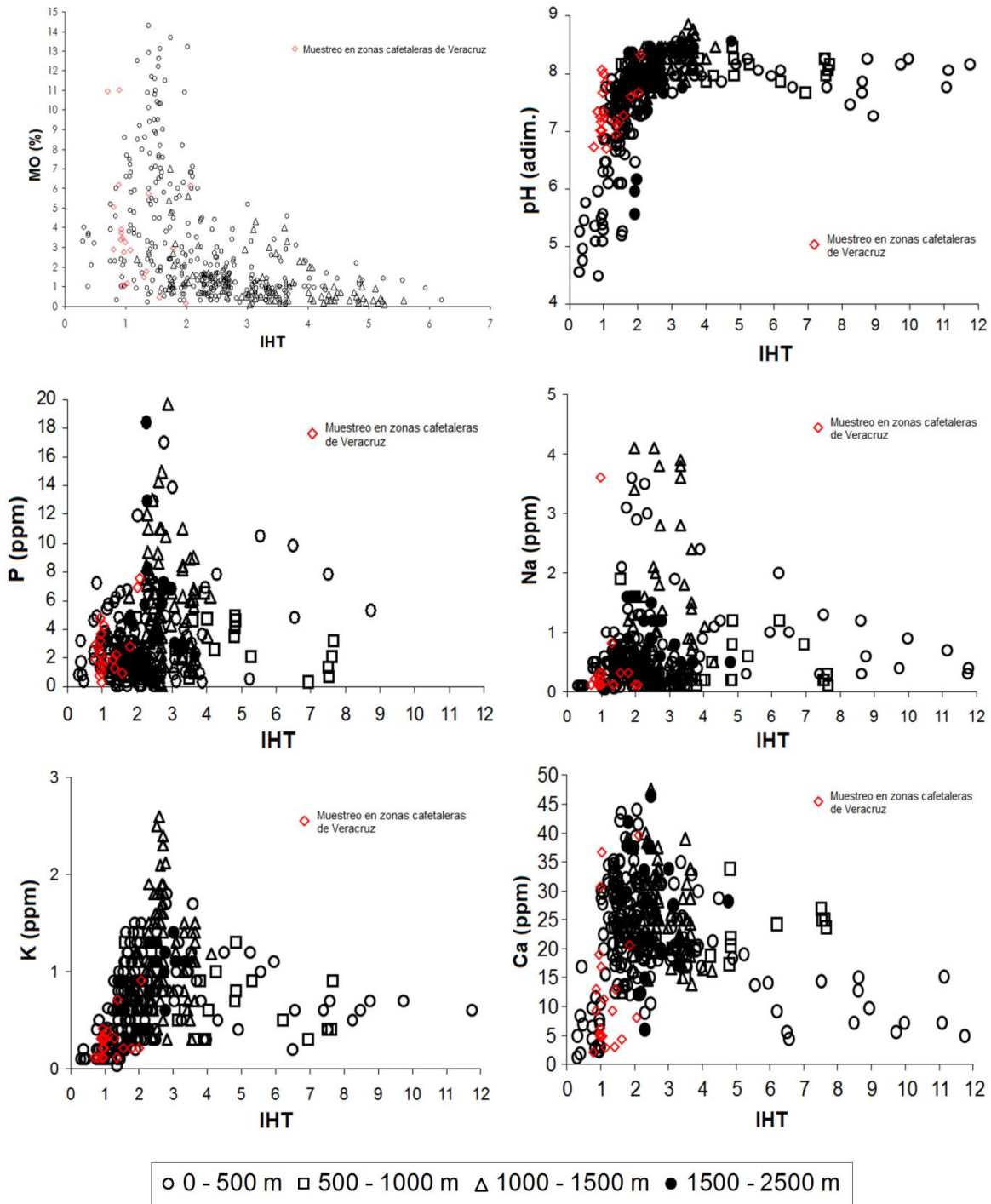


Figura 3. Comparación de la distribución de los valores modales de MO, pH, P, Na, K, Ca y el IHT en suelos de los municipios cafetaleros para diferentes altitudes del estado de Veracruz en función del índice climático IHT con las mismas propiedades típicas para suelos vírgenes ubicados en los terrenos con la pendiente menor de 3% en toda la República Mexicana.

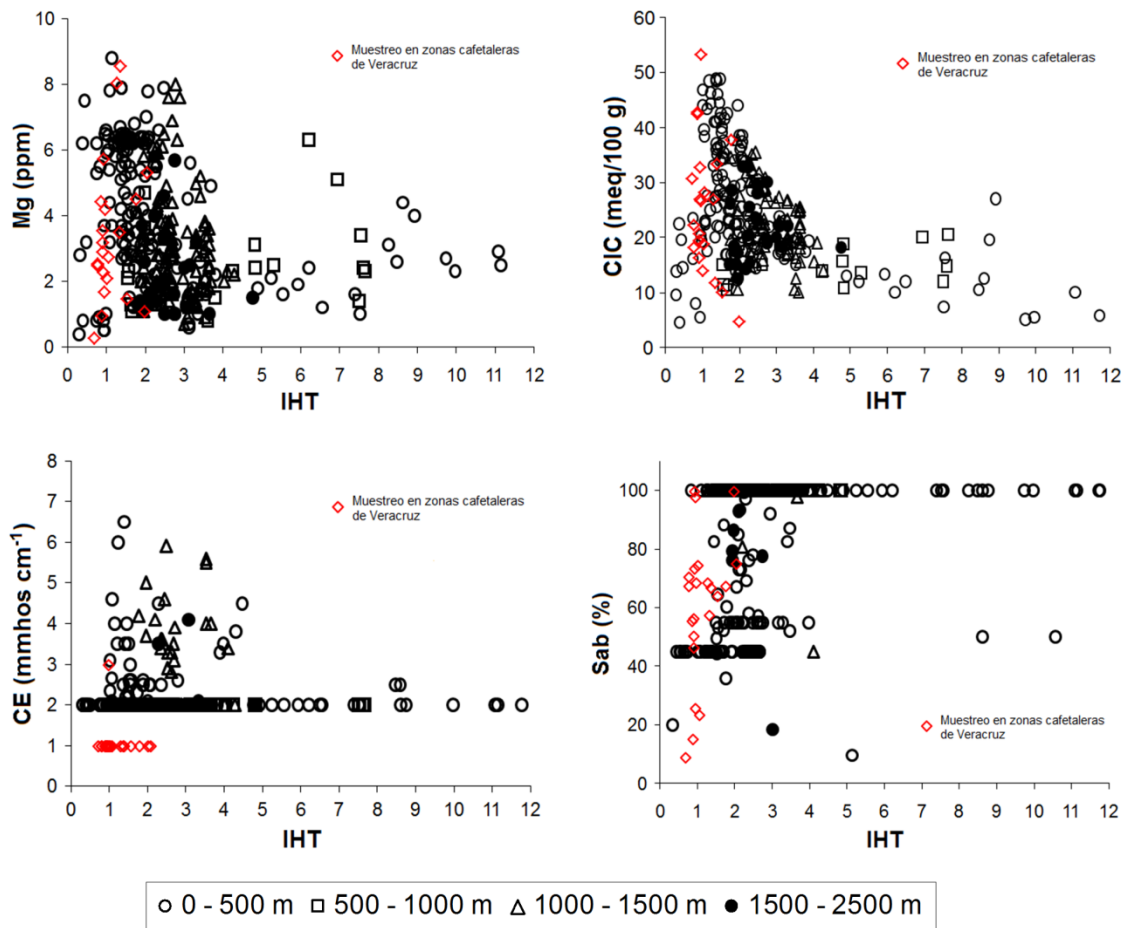


Figura 4. Comparación de distribución de los valores de Relación entre los valores modales de Mg, CIC, CE, Sab en suelos de los municipios cafetaleros para diferentes altitudes del estado de Veracruz en función del índice climático IHT con las mismas propiedades típicas para suelos vírgenes ubicados en los terrenos con la pendiente menor de 3% en toda la República Mexicana.

Anteriormente, en la ecuación (13) se mencionó que para calcular los rendimientos Y_{calc}^j es necesario conocer el valor del índice integral de la fertilidad de suelo F_a^j , el cual está determinado por la ecuación (23). Así entonces, para tomar en cuenta papel de la alteración de la fertilidad de suelo en las predicciones de los rendimientos del cultivo de café se puede utilizar la dependencia $F_a^j(\text{IHT})$ establecida en México para los terrenos planos (Contreras *et al.*, 2002; Nikol'skii *et*

al., 2002 y 2010). A favor de esta observación, es necesario tomar en cuenta que el objetivo del presente trabajo no es estimar los rendimientos absolutos Y_{calc}^j ; sino los relativos $Y_{\text{calc}}^{\text{futuro}} / Y_{\text{calc}}^{2000}$. Esto significa que la importancia no radica en conocer el cambio absoluto del índice de la fertilidad F_a , sino en su cambio relativo $F_a^{\text{futuro}} / F_a^{2000}$.

De acuerdo con los análisis estadísticos que se han hecho para establecer la relación de éstas propiedades con el índice de fertilidad F_a (Tetumo *et al.*, 2001; Contreras *et al.*, 2002; Nikol'skii *et al.*, 2002 y 2010; Castillo *et al.*, 2007); donde todas las observaciones han guardado un comportamiento similar al reportado en las figuras 3 y 4, se ha determinado la curva característica de cambio de los valores modales del índice integral de fertilidad de los suelos vírgenes (F_v^{2000}) y de los suelos de cafetales (F_a^{2000}) en el inicio del siglo XXI en función del IHT^{2000} ; dicha curva se presenta en la figura 5.

De acuerdo con la gráfica se observa que los valores de IHT para México en las condiciones actuales varía de 0.5 – 8.0. Contreras *et al.* (2002) concluyó que dentro de éste rango, los valores menores a 1 corresponden a la zona húmeda tropical con precipitación promedio anual $Pr > 1500$ mm, de 1 a 2 a la zona semihúmeda con $1000 < Pr \leq 1500$ mm, de 2 a 3.5 a la zona semiárida con $300 < Pr \leq 1000$ mm, y los mayores de 3.5 a la zona árida con $Pr \leq 300$ mm.

Castillo *et al.* (2007) reporta que los valores del índice adimensional de fertilidad varían de 0.23 a 0.33 en las zonas áridas donde $IHT^{2000} > 4$ hasta 0.79 en las zonas subhúmedas donde $IHT^{2000} \sim 1.5$; por otra parte, en las zonas tropicales húmedas donde $IHT^{2000} < 1$ el índice de fertilidad se reduce hasta 0.36-0.6.

De acuerdo con la gráfica se puede concluir que en el intervalo donde el índice integral de fertilidad tiene una fuerte dependencia del IHT va del 0 al 3; donde pequeños cambios en el IHT pueden ocasionar grandes cambios en la fertilidad y que de acuerdo con Contreras *et al.* (2002) corresponde a las zonas húmedas, zonas semihúmedas y zonas semiáridas.

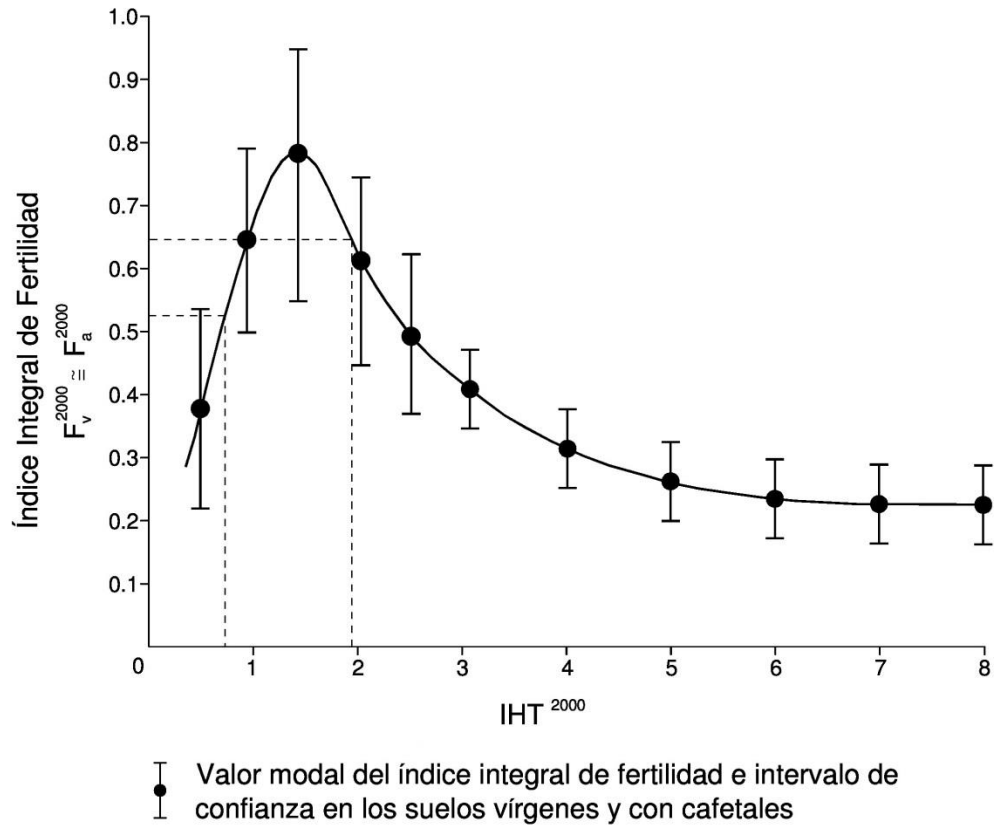


Figura 5. Dependencia del índice integral de fertilidad de los suelos vírgenes y de los cafetales del estado de Veracruz (F_a^{2000}), para altitudes de 0 a 2500 m y pendientes de 0 a 30% en función del IHT^{2000} al inicio del siglo XXI. Las líneas punteadas corresponden al rango de cambio del IHT en los cafetales del estado de Veracruz.

Como se mencionó en el Cuadro 4, los cafetales del estado de Veracruz tienen el índice climático promedio anual IHT entre 0.73 y 1.95. En la Figura 5 se muestra este rango de variación del índice IHT al inicio del siglo XXI y el rango de variación del índice adimensional de la fertilidad agrícola (o del suelo) de los cafetales de 0.52 a 0.65. La gráfica $F_a^{2000}(IHT^{2000})$ en la misma figura se puede utilizar para estimar alteración de la fertilidad de suelo atribuible al cambio climático en los cálculos de los rendimientos del cultivo de café en función de los escenarios del cambio climático.

6.2.2. Estimación de los rendimientos de producción de café para las condiciones actuales (escenario base).

Los resultados de los cálculos de rendimiento mediante la metodología IIASA/FAO (2012) se presentan en cuadro 5; en el mismo se muestran los rendimientos observados en los municipios seleccionados para un periodo de 9 años (2003-2011).

Cuadro 5. Rendimientos observados (Y_{real}), rendimientos potenciales del cultivo de café ($Y_{máx}$), Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas (INSH) e Índice integral de fertilidad (F_a) para los municipios del estado de Veracruz a inicios del siglo XXI.

MUNICIPIO	(Y_{real})	($Y_{máx}$)	ISNH	F	(Y_{calc})
ATZALAN	2471.1	3447.2	0.76	0.63	1650.53
JALACINGO	2211.3	3487.3	0.75	0.72	1883.12
LAS MINAS	2111.3	3210.7	0.83	0.62	1652.22
MARTÍNEZ DE LA TORRE	2346.7	3013.6	0.84	0.63	1594.77
NAOLINCO	1986.7	3434.7	0.69	0.60	1421.97
COATEPEC	2357.8	3712.1	0.73	0.76	2059.45
JALCOMULCO	1761.1	3297.9	0.69	0.58	1319.80
TEOCELO	2256.7	3425.0	0.79	0.64	1731.69
JILOTEPEC	1903.3	3271.4	0.83	0.61	1656.31
COSAUTLÁN DE CARVAJAL	2386.7	3423.2	0.81	0.59	1635.94
EMILIANO ZAPATA	2018.9	3112.1	0.71	0.66	1458.33
IXHUATLÁN DEL CAFE	2237.8	3628.0	0.72	0.73	1906.88
ATOYAC	2121.1	2957.7	0.85	0.61	1533.58
COMAPA	2358.9	3201.5	0.77	0.71	1750.23
TENAMPA	2062.2	3301.9	0.74	0.64	1563.76
HUATUSCO	2316.7	3443.6	0.79	0.63	1713.87
VEGA DE ALATORRE	2061.1	2967.0	0.81	0.72	1730.35
MISANTLA	2323.3	3038.2	0.74	0.73	1641.23
ACATLÁN	1917.1	3179.9	0.77	0.67	1640.48
TEZONAPA	1823.3	3345.4	0.77	0.61	1571.33

Como se ve en el Cuadro 5 los rendimientos calculados absolutos (Y_{calc}), en la mayoría de los casos son significativamente menores que los rendimientos observados (Y_{real}). Esto, puede explicarse por varias razones:

- Simplificación del proceso de cálculo de los rendimientos. En realidad este proceso es mucho más complicado que como se considera en la metodología IIASA/FAO (2012).
- Ignorancia de la variabilidad diaria de las condiciones climáticas.
- Subestimación y gran variabilidad espacial de del cambio de los índices INSH y F.
- Ignorancia de la tecnología de manejo del cultivo.
- Ignorancia del impacto potencial de plagas y enfermedades.
- Otros factores.

Sin embargo, considerando que el objetivo del trabajo presente es estimar cambio relativo de los rendimientos en futuro como fracción de los rendimientos actuales y además estimar papel de alteración de la fertilidad de suelo, se puede aceptar la metodología IIASA/FAO (2012).

Con objeto de verificar la confiabilidad del modelo para pronosticar la productividad del café, se estableció una comparación entre los rendimientos observados (Y_{real}) y los estimados (Y_{calc}). Para ello se tomaron los valores de cada variable como fracción de su rendimiento máximo y se graficaron para establecer el grado de correlación.

Asimismo para verificar la hipótesis sobre la no consideración del escurrimiento superficial, se realizaron los cálculos de rendimientos considerando el escurrimiento superficial para pendientes de 0-5% y 5-10% utilizando la metodología publicada en el Manual de Conservación de Suelo y Agua (SARH, 1991).

La función analítica $y(x)$ fue obtenida con el programa Curve Expert 1.4 (Hyams, 2010) obteniendo una ecuación lineal de la forma:

$$y=a+bx \tag{29}$$

Donde, para el caso del cálculo con la consideración de escurrimiento superficial (Es) para pendientes de 0-5% $a = 0.27$ y $b=0.86$; el coeficiente de correlación resultante $r^2=0.83$ y un error estándar $\sigma = 0.11$.

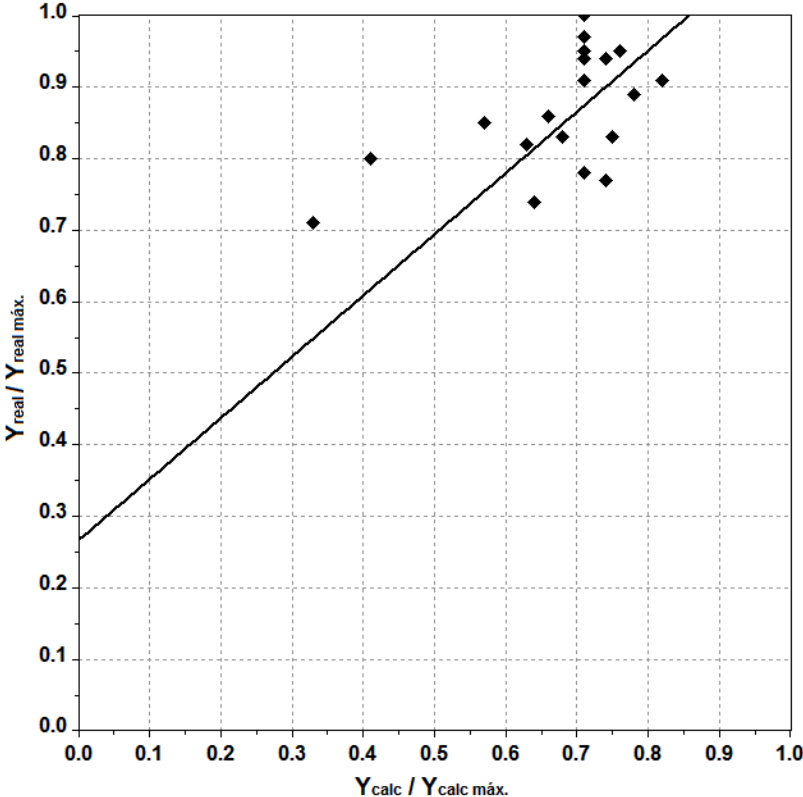


Figura 6. Comparación entre las fracciones de rendimientos observados (durante los últimos años) y estimados (modelo IIASA/FAO) para condiciones de clima actual, considerando escurrimiento para una pendiente de 0-5% .

En el caso de la consideración de escurrimiento superficial (Es) en pendientes del 5-10% $a = 0.4$ y $b=0.6$; el coeficiente de correlación resultante $r^2=0.70$ y un error estándar $\sigma = 0.15$.

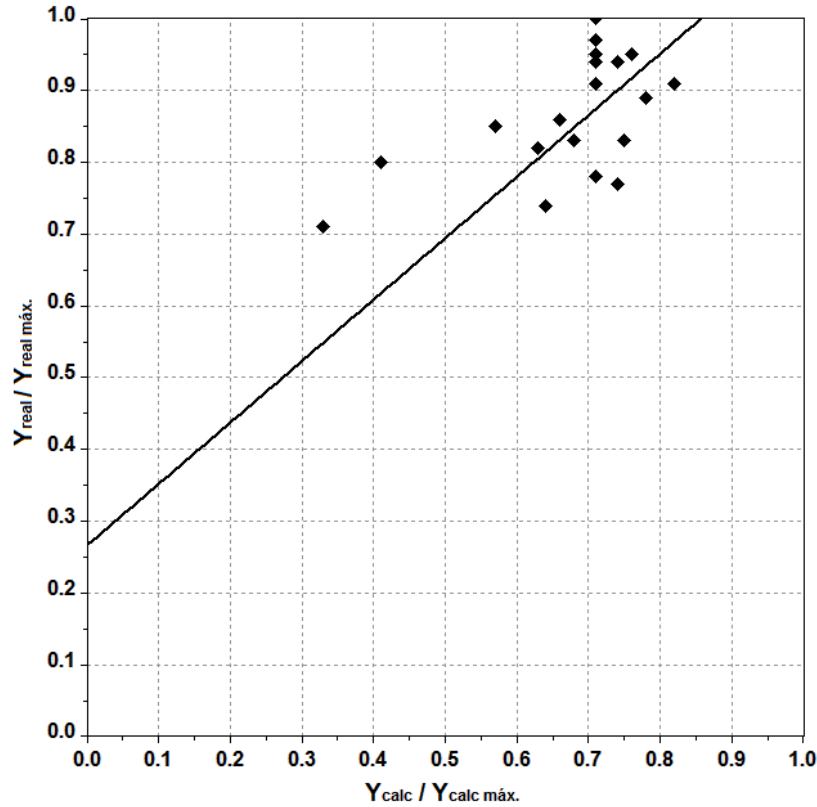


Figura 7. Comparación entre las fracciones de rendimientos observados (durante los últimos años) y estimados (modelo IIASA/FAO) para condiciones de clima actual, considerando escurrimiento para una pendiente de 5-10% .

Finalmente, en el caso de no considerar el escurrimiento superficial (E_s) los valores obtenidos son los siguientes: $a = 0.07$ y $b=0.99$; el coeficiente de correlación resultante $r^2=0.93$ y un error estándar $\sigma = 0.08$. Estos parámetros nos indican que el modelo con esta consideración es capaz de estimar la producción de manera más confiable.

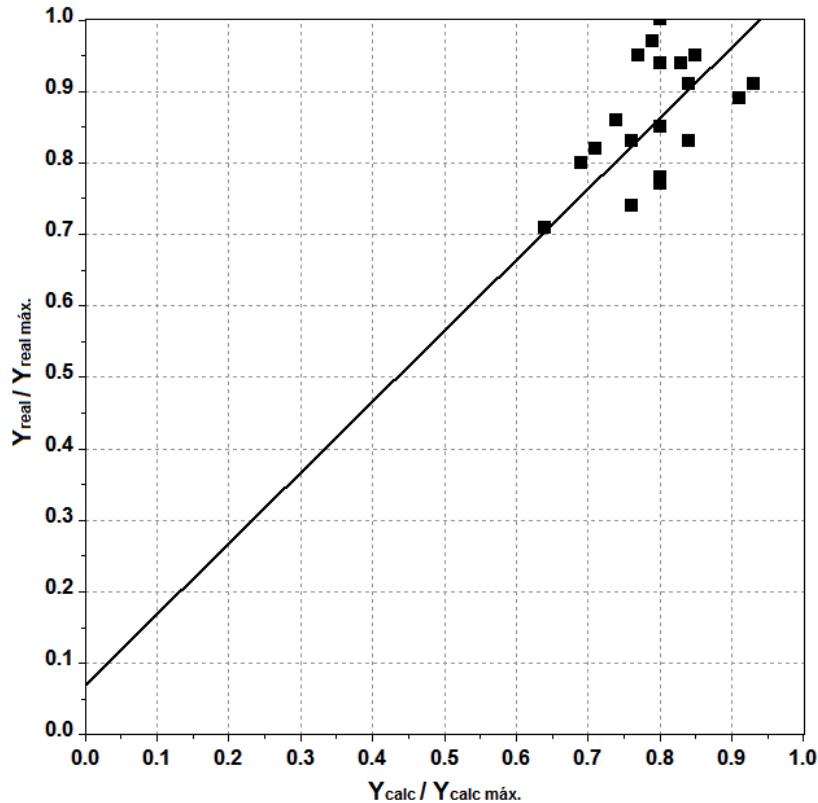


Figura 8. Comparación entre las fracciones de rendimientos observados (durante los últimos años) y estimados (modelo IIASA/FAO para condiciones de clima actual).

Como se puede observar, la correlación entre los valores de los rendimientos calculados y observados en las Figuras 6 y 7, donde fue considerado el efecto del escurrimiento superficial de agua (E_s) es mucho menor que en caso de la ignorancia del mismo, mostrado en la Figura 8. Posiblemente esto se puede explicar por la presencia de hojarasca y hierbas pequeñas que normalmente se encuentran en la superficie de suelos de cafetales, y que tiene provoquen una alta permeabilidad hidráulica causando una infiltración de prácticamente toda precipitación.

Esto significa que en los cálculos de los rendimientos del cultivo de café en función de los escenarios climáticos en transcurso del siglo XXI se puede ignorar el efecto del escurrimiento superficial (E_s).

6.3. Estimación del cambio en las condiciones climáticas de los municipios seleccionados para estudio con base en los escenarios de cambio climático.

6.3.1. Estimación del cambio en las variables climáticas para el periodo 2015-2039.

En los cuadros 6, 7 y 8 se presentan los resultados esperados en el cambio porcentual para las variables temperatura media, precipitación y Radiación neta.

Cuadro 6. Cambio en la variable de la temperatura media (ΔT , %) para los municipios seleccionados utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas: 4.5 (650 ppm de CO₂) y 8.5 (1370 ppm de CO₂)

MUNICIPIO	RCP 4.5			RCP 8.5		
	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR
ATZALAN	11.47	10.31	9.91	11.15	10.94	10.95
JALACINGO	10.21	9.06	8.62	9.89	9.68	9.69
LAS MINAS	5.80	4.76	4.40	5.52	5.33	5.33
MARTÍNEZ DE LA TORRE	10.44	9.76	9.52	10.30	10.30	10.26
NAOLINCO	-0.35	-1.17	-1.42	-0.64	-0.61	-0.73
COATEPEC	5.48	4.49	4.06	4.98	5.09	5.08
JALCOMULCO	3.86	3.09	2.74	3.50	3.55	3.55
TEOCELO	1.43	0.52	0.11	1.00	1.07	1.07
JILOTEPEC	7.88	6.93	6.63	7.55	7.59	7.44
COSAUTLÁN DE CARVAJAL	4.15	3.17	2.77	3.69	3.78	3.77
EMILIANO ZAPATA	3.11	2.28	1.93	2.72	2.78	2.78
IXHUATLÁN DEL CAFE	-0.80	-1.74	-2.17	-1.27	-1.18	-1.17
ATOYAC	-8.49	-9.07	-9.37	-8.71	-8.73	-8.48
COMAPA	6.59	5.75	5.39	6.18	6.27	6.26
TENAMPA	9.74	8.77	8.37	9.27	9.38	9.36
HUATUSCO	19.84	18.73	18.24	19.30	19.40	19.41
VEGA DE ALATORRE	12.82	12.13	11.87	12.43	12.58	12.62
MISANTLA	6.27	5.58	5.32	5.89	6.02	6.06
ACATLÁN	10.10	8.91	8.53	9.68	9.73	9.56
TEZONAPA	8.64	8.04	7.73	8.38	8.39	8.63

En general los tres modelos muestran valores similares para los cambios en el valor de la temperatura media para cada municipio, incluso los cambios esperados

para la trayectoria de concentración de 1370 ppm de CO₂ no difiere tanto de la trayectoria de concentración de 650 ppm de CO₂.

Existen algunos municipios en los que los cambios son notables, como en el caso de los municipios de Huatusco, Vega de Alatorre y Atzalán, donde los cambios en la temperatura media se presentan como incrementos mayores al 10%. Por otra parte el municipio de Atoyac presenta un decremento en la temperatura media de hasta un 9%; si bien este decremento es notable, cabe mencionar que dicho municipio presenta uno de los mayores valores de temperatura media, por lo que se espera la afectación en la productividad no sea tan notoria.

Cuadro 7. Cambio en la variable de precipitación (ΔPr , %) para los municipios seleccionados utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas: 4.5 (650 ppm de CO₂) y 8.5 (1370 ppm de CO₂)

MUNICIPIO	RCP 4.5			RCP 8.5		
	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR
ATZALAN	-2.94	-2.07	3.58	-3.56	1.63	2.60
JALACINGO	0.98	1.99	8.55	0.27	6.28	7.42
LAS MINAS	10.52	11.66	19.03	9.72	16.49	17.76
MARTÍNEZ DE LA TORRE	-37.68	-36.62	-32.54	-38.78	-31.49	-33.25
NAOLINCO	-5.89	-3.79	2.90	-7.51	2.33	1.56
COATEPEC	-4.40	-2.74	1.44	-4.40	0.75	0.29
JALCOMULCO	-7.35	-4.69	2.01	-7.35	0.91	0.17
TEOCELO	-10.08	-8.65	-5.04	-10.08	-5.64	-6.03
JILOTEPEC	-12.82	-11.50	-7.29	-13.85	-7.65	-8.14
COSAUTLÁN DE CARVAJAL	-8.85	-7.48	-4.02	-8.85	-4.59	-4.97
EMILIANO ZAPATA	-12.36	-9.26	-1.45	-12.36	-2.74	-3.59
IXHUATLÁN DEL CAFE	2.57	4.10	7.94	2.57	7.31	6.89
ATOYAC	-1.83	-0.60	2.66	-1.83	2.00	1.43
COMAPA	-5.91	-3.22	3.55	-5.91	2.43	1.69
TENAMPA	-6.88	-5.15	-0.81	-6.88	-1.53	-2.00
HUATUSCO	-4.01	-2.53	1.19	-4.01	0.58	0.17
VEGA DE ALATORRE	-13.66	-12.02	-9.61	-15.75	-6.19	-10.24
MISANTLA	-20.08	-18.57	-16.35	-22.01	-13.21	-16.94
ACATLÁN	3.10	4.63	9.48	1.92	9.07	8.51
TEZONAPA	-13.98	-13.03	-10.53	-13.98	-11.04	-11.47

Para el caso de esta variable, si se observan diferencias entre los valores de cambio esperados en cada uno de los 3 modelos. El modelo que mayores cambios presenta es el GFDL CM3 y para las 2 trayectorias de concentración (650 y 1370 ppm de CO₂), cambios reflejados como disminución en la precipitación; mientras que el modelo que menores pérdidas muestra es el MPI ESM LR para la trayectoria de concentración de 650 ppm de CO₂, y el HADGEM2 para la trayectoria de concentración de 1370 ppm de CO₂.

Los municipios con mayor disminución en la precipitación son Martínez de la Torre, Misantla, Jilotepec y Tezonapa, donde el más afectado (Martínez de la Torre) observa pérdidas mayores al 30%; los únicos municipios en los que se puede encontrar incrementos son: Jalacingo (incrementos pequeños) y Las Minas (en general podríamos decir incrementos mayores al 10%). Finalmente y a diferencia de la variable temperatura media en este caso, es el municipio de Atoyac el que no parece sufrir cambios; según los modelos, los cambios van desde una disminución de $\approx 2\%$ hasta un incremento de $\approx 3\%$.

Cuadro 8. Cambio en la variable de Radiación neta (ΔR_n , %) para los municipios seleccionados utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas: 4.5 (650 ppm de CO₂) y 8.5 (1370 ppm de CO₂)

MUNICIPIO	RCP 4.5			RCP 8.5		
	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR
ATZALAN	2.26	2.07	1.93	2.21	2.24	2.21
JALACINGO	1.73	1.58	1.45	1.68	1.71	1.69
LAS MINAS	2.51	2.15	1.90	2.41	2.45	2.40
MARTÍNEZ DE LA TORRE	5.41	5.11	4.87	0.70	5.45	5.38
NAOLINCO	-0.02	-0.19	-0.31	-0.09	-0.02	-0.08
COATEPEC	1.05	0.86	0.75	0.94	1.01	1.01
JALCOMULCO	1.20	0.98	0.83	1.08	1.17	1.15
TEOCELO	0.47	0.21	0.06	0.33	0.42	0.40
JILOTEPEC	3.51	3.14	2.93	3.37	3.48	3.38
COSAUTLÁN DE CARVAJAL	1.43	1.13	0.96	1.28	1.38	1.37
EMILIANO ZAPATA	1.46	1.11	0.89	1.27	1.40	1.38
IXHUATLÁN DEL CAFE	-0.14	-0.31	-0.43	-0.23	-0.16	-0.17
ATOYAC	-4.92	-5.17	-5.35	-5.03	-4.97	-4.86
COMAPA	2.80	2.48	2.28	2.63	2.74	2.74

TENAMPA	4.25	3.86	3.63	4.04	4.19	4.18
HUATUSCO	4.90	4.62	4.45	4.75	4.85	4.84
VEGA DE ALATORRE	7.53	7.18	6.92	7.30	7.50	7.47
MISANTLA	3.02	2.73	2.54	2.84	2.98	2.96
ACATLÁN	2.54	2.29	2.13	2.43	2.53	2.46
TEZONAPA	2.79	2.58	2.49	2.72	2.74	2.86

En los valores de Radiación neta se observan con incremento, de manera similar a los valores de temperatura; la razón es debida a que las diferencias entre la temperatura máxima y mínima del aire se relaciona con el grado de nubosidad en una localidad (Allen *et al.* 2006). En general los cambios son pequeños y tal como en el caso de la temperatura, el municipio de Atoyac es el que presenta disminución en su valor de Radiación neta, con pérdidas de entre el 8 y 9%.

6.3.2. Estimación del cambio en las variables climáticas para el periodo 2075-2099

A continuación se presentan los cuadros con los valores encontrados para los escenarios de cambio climático en el horizonte 2075-2099.

Cuadro 9. Cambio en la variable de la temperatura media (ΔT , %) para los municipios seleccionados utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas: 4.5 (650 ppm de CO₂) y 8.5 (1370 ppm de CO₂)

MUNICIPIO	RCP 4.5			RCP 8.5		
	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR
ATZALAN	22.29	22.49	17.47	33.22	34.30	28.59
JALACINGO	21.32	21.52	16.39	32.51	33.64	27.79
LAS MINAS	15.53	15.72	11.20	25.36	26.34	21.21
MARTÍNEZ DE LA TORRE	17.75	17.93	14.45	25.05	25.69	21.87
NAOLINCO	7.05	7.17	3.57	14.55	15.28	11.11
COATEPEC	14.19	14.22	10.27	22.93	24.04	19.15
JALCOMULCO	10.83	10.87	7.71	17.84	18.72	14.81
TEOCELO	9.73	9.78	6.01	18.07	19.11	14.47
JILOTEPEC	16.51	16.65	12.43	25.24	26.10	21.24
COSAUTLÁN DE CARVAJAL	12.78	12.82	8.91	21.46	22.53	17.70
EMILIANO ZAPATA	10.47	10.52	7.17	17.87	18.80	14.67
IXHUATLÁN DEL CAFE	7.66	7.69	3.86	16.15	17.23	12.47
ATOYAC	-1.24	-1.19	-4.16	5.73	7.05	3.19

COMAPA	13.98	14.00	10.66	21.41	22.35	18.20
TENAMPA	18.38	18.41	14.49	27.05	28.15	23.30
HUATUSCO	29.77	29.82	25.31	39.76	41.01	35.44
VEGA DE ALATORRE	19.69	19.72	16.28	26.53	27.02	23.22
MISANTLA	12.98	13.01	9.63	19.69	20.15	16.45
ACATLÁN	21.05	21.21	15.88	32.11	33.21	27.05
TEZONAPA	15.99	16.03	13.02	23.08	24.44	20.49

Se puede apreciar un incremento de manera generalizada en la temperatura, superando incluso valores del 40% (como es el caso de Huatusco); para este caso el decremento mayor de temperatura se espera en un 4% como máximo, observándose esto para el municipio de Atoyac.

Cuadro 10. Cambio en la variable de precipitación (ΔPr , %) utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO₂) y 8.5 (1370 ppm de CO₂)

MUNICIPIO	RCP 4.5			RCP 8.5		
	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR
ATZALAN	-2.99	-0.94	2.76	-5.61	1.73	3.32
JALACINGO	0.98	3.31	7.59	-2.12	6.40	8.25
LAS MINAS	10.39	13.14	17.96	7.04	16.62	18.70
MARTÍNEZ DE LA TORRE	-38.03	-35.76	-32.90	-41.00	-31.44	-33.35
NAOLINCO	-5.51	-5.03	-1.02	-10.19	2.14	-2.07
COATEPEC	-3.77	-2.74	-1.42	-6.17	-1.25	-2.05
JALCOMULCO	-6.34	-4.69	-2.58	-10.19	-2.30	-3.59
TEOCELO	-9.54	-8.65	-7.51	-11.61	-7.36	-8.05
JILOTEPEC	-12.64	-12.28	-9.76	-15.53	-7.77	-10.42
COSAUTLÁN DE CARVAJAL	-8.28	-7.48	-6.39	-10.32	-6.25	-6.91
EMILIANO ZAPATA	-11.18	-9.26	-6.80	-15.67	-6.48	-7.97
IXHUATLÁN DEL CAFE	3.15	4.10	5.31	0.94	5.47	4.73
ATOYAC	-1.50	-0.08	-0.37	-3.15	-1.26	-0.70
COMAPA	-4.80	-3.22	-1.09	-8.78	-0.81	-2.11
TENAMPA	-6.17	-5.15	-3.79	-8.72	-3.61	-4.44
HUATUSCO	-3.45	-2.53	-1.36	-5.59	-1.20	-1.92
VEGA DE ALATORRE	-13.98	-13.35	-11.45	-17.34	-6.19	-12.59
MISANTLA	-20.38	-19.79	-18.04	-23.47	-13.21	-19.09
ACATLÁN	3.17	3.73	6.64	-0.02	8.93	5.88
TEZONAPA	-13.65	-12.63	-12.85	-14.99	-13.54	-13.11

Se observa una tendencia de decremento en la precipitación, siendo solo 4 de los 22 municipios, los que no reportan decrementos e incluso incrementos con valores realmente pequeños. El municipio donde se estiman mayores pérdidas es el de Martínez de la Torre; con pérdidas mayores al 30% de su precipitación.

Cuadro 11. Cambio en la variable de Radiación neta (ΔR_n , %) utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO_2) y 8.5 (1370 ppm de CO_2)

MUNICIPIO	RCP 4.5			RCP 8.5		
	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR
ATZALAN	4.73	4.87	3.64	7.70	8.06	6.39
JALACINGO	3.83	3.96	2.91	6.37	6.68	5.25
LAS MINAS	6.97	7.19	5.00	12.35	12.98	10.00
MARTÍNEZ DE LA TORRE	9.90	10.13	7.87	15.04	15.57	12.72
NAOLINCO	2.10	2.21	1.11	4.62	4.91	3.43
COATEPEC	3.00	3.06	2.12	5.31	5.63	4.27
JALCOMULCO	3.61	3.69	2.54	6.42	6.81	5.17
TEOCELO	3.23	3.33	1.99	6.46	6.91	5.02
JILOTEPEC	7.81	7.99	5.77	12.81	13.38	10.44
COSAUTLÁN DE CARVAJAL	4.52	4.61	3.13	8.18	8.67	6.54
EMILIANO ZAPATA	5.09	5.22	3.47	9.36	9.94	7.46
IXHUATLÁN DEL CAFE	1.83	1.91	0.95	4.16	4.48	3.10
ATOYAC	-1.24	-1.13	-2.74	2.82	3.63	1.27
COMAPA	6.16	6.26	4.66	10.11	10.65	8.36
TENAMPA	8.32	8.44	6.50	13.14	13.80	11.00
HUATUSCO	7.92	8.01	6.56	11.47	11.97	9.89
VEGA DE ALATORRE	12.20	12.32	9.89	17.48	17.96	14.86
MISANTLA	6.65	6.72	4.83	10.76	11.11	8.72
ACATLÁN	5.59	5.73	4.15	9.25	9.68	7.51
TEZONAPA	5.47	5.50	4.39	8.50	9.08	7.38

Al incrementarse la temperatura y disminuir la precipitaciones, se correlaciona de manera directa con un aumento en la radiación, lo cual se ve reflejado en los resultados con un incremento en la misma. Como ejemplo se puede observar el municipio de Atoyac, donde los cambios existen pequeños decrementos en la temperatura media y la precipitación; y consecuentemente en la radiación el comportamiento es similar.

6.4. Estimación de la vulnerabilidad de la productividad de café ante escenarios de cambio climático

Las condiciones en que se desarrolla la agricultura en México, tanto de temporal como de riego, determinan su vulnerabilidad ante eventos climáticos extremos. Sobre todo en la agricultura de temporal, pues únicamente la presencia de disminuciones en la precipitación puede ocasionar reducciones en la producción.

En este apartado se abordan los resultados obtenidos para cada una de los municipios, los cambios que se esperan para cada uno de los componentes que integran el modelo para estimar la productividad del café; esto con el fin de conocer cuál de ellos es el que tiene una mayor importancia por la variación que implica; considerando como una variación significativa a aquella que represente un cambio mayor al 10%.

6.4.1. Estimación del cambio en el rendimiento potencial ($\Delta Y_{\text{máx}}$, %).

Cuadro 12. Cambio en el rendimiento potencial ($\Delta Y_{\text{máx}}$, %) para el periodo 2015-2039, utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO₂) y 8.5 (1370 ppm de CO₂)

MUNICIPIO	RCP 4.5			RCP 8.5		
	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR
ATZALAN	1.15	1.22	0.91	1.19	1.14	1.27
JALACINGO	1.34	1.17	1.06	1.23	1.31	1.16
LAS MINAS	0.51	0.59	0.33	0.52	0.49	0.63
MARTÍNEZ DE LA TORRE	-5.53	-5.26	-4.99	-5.53	-5.67	-5.53
NAOLINCO	0.14	0.51	0.76	0.26	0.09	0.27
COATEPEC	-2.32	-1.92	-1.64	-2.12	-2.34	-2.19
JALCOMULCO	-2.18	-1.76	-1.45	-1.99	-2.21	-2.05
TEOCELO	-0.78	-0.39	-0.10	-0.59	-0.80	-0.66
JILOTEPEC	-3.55	-3.21	-2.97	-3.45	-3.60	-3.44
COSAUTLÁN DE CARVAJAL	-2.10	-1.70	-1.43	-1.91	-2.13	-1.98
EMILIANO ZAPATA	-1.69	-1.27	-0.98	-1.50	-1.72	-1.57
IXHUATLÁN DEL CAFE	0.18	0.58	0.86	0.37	0.16	0.30
ATOYAC	6.40	6.73	7.02	6.49	6.32	6.31
COMAPA	-3.86	-3.44	-3.15	-3.66	-3.88	-3.73
TENAMPA	-4.56	-4.16	-3.89	-4.36	-4.58	-4.44
HUATUSCO	-1.83	-1.43	-1.15	-11.79	-1.85	-1.71
VEGA DE ALATORRE	-7.39	-7.12	-6.83	-7.24	-7.46	-7.36

MISANTLA	-3.46	-3.18	-2.88	-3.30	-3.53	-3.43
ACATLÁN	3.61	3.51	3.44	3.59	3.73	3.59
TEZONAPA	-5.12	-4.78	-4.52	-5.01	-5.19	-5.18

Cuadro 13. Cambio en el rendimiento potencial ($\Delta Y_{\text{máx}}$, %) para el periodo 2075-2099, utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO₂) y 8.5 (1370 ppm de CO₂)

MUNICIPIO	RCP 4.5			RCP 8.5		
	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR
ATZALAN	1.07	0.81	1.59	-3.14	-3.63	-1.32
JALACINGO	2.25	2.27	1.88	-1.15	-1.65	0.67
LAS MINAS	-2.43	-2.69	-0.83	-6.58	-7.06	-4.80
MARTÍNEZ DE LA TORRE	-9.65	-9.91	-7.99	-13.75	-15.28	-11.95
NAOLINCO	-3.90	-4.14	-2.18	-8.04	-8.51	-6.15
COATEPEC	-6.19	-6.41	-4.61	-10.21	-10.75	-8.45
JALCOMULCO	-6.32	-6.57	-4.66	-10.56	-11.13	-8.73
TEOCELO	-4.73	-4.97	-3.13	-8.84	-9.38	-7.05
JILOTEPEC	-7.35	-7.58	-5.72	-11.26	-11.70	-9.47
COSAUTLÁN DE CARVAJAL	-5.97	-6.20	-4.40	-10.01	-10.55	-8.25
EMILIANO ZAPATA	-5.79	-6.04	-4.13	-10.00	-10.56	-8.17
IXHUATLÁN DEL CAFE	-3.73	-3.97	-2.14	-7.82	-8.37	-6.04
ATOYAC	1.84	1.58	3.50	-2.60	-3.45	-0.94
COMAPA	-7.89	-8.13	-6.26	-12.03	-12.58	-10.24
TENAMPA	-8.41	-8.63	-6.84	-12.39	-12.94	-10.66
HUATUSCO	-11.01	-5.94	-4.13	-9.75	-10.30	-7.99
VEGA DE ALATORRE	-11.33	-11.49	-9.56	-18.15	-18.91	-14.49
MISANTLA	-7.53	-7.70	-5.69	-12.26	-13.10	-9.63
ACATLÁN	4.58	4.63	4.24	2.95	2.47	4.87
TEZONAPA	-9.34	-9.59	-7.81	-14.40	-16.36	-11.92

Para el periodo 2015-2039 no se encuentra variación significativa en los resultados obtenidos para el rendimiento potencial ($Y_{\text{máx}}$), en ninguna de las trayectorias de concentración de CO₂ (650 y 1370 ppm). El valor máximo de disminución en el rendimiento potencial es de $\approx 7\%$ y corresponde al municipio de Vega de Alatorre, en tanto que el valor máximo de incremento en el rendimiento

potencial es de $\approx 6\%$ y corresponde al municipio de Atoyac; Los demás municipios observan incrementos y decrementos de alrededor del 3 al 5%.

En el análisis de resultados para el periodo 2075-2099, el modelo GFDL CM3 reporta una variación significativa para el rendimiento potencial ($Y_{\text{máx}}$), en 2 de los 20 municipios con una trayectoria de concentración de 650 ppm de CO_2 , los municipios referidos son Vega de Alatorre y Huatusco con una disminución de su rendimiento potencial de alrededor del 11% para ambos. Al usar una trayectoria de concentración de 1370 ppm CO_2 la variación se extiende hasta 11 de los 20 municipios (más del 50% de los municipios estudiados), otros municipios con variaciones de entre el 6 y el 9% y solo 4 municipios con variaciones pequeñas, de entre los cuales solo uno observa un incremento en el rendimiento potencial de $\approx 3\%$: Acatlán.

6.4.2. Estimación del cambio en el Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas ($\Delta\text{ISNH},\%$)

Cuadro 14. Cambio en el Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas ($\Delta\text{ISNH},\%$) para el periodo 2015-2039, utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO_2) y 8.5 (1370 ppm de CO_2)

MUNICIPIO	RCP 4.5			RCP 8.5		
	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR
ATZALAN	-7.89	-10.53	-3.95	-10.53	-9.21	-6.58
JALACINGO	22.67	21.33	25.33	21.33	21.33	24.00
LAS MINAS	-10.84	-13.25	-7.23	-13.25	-12.05	-9.64
MARTÍNEZ DE LA TORRE	-9.52	-11.90	-1.19	-13.10	-11.90	-4.76
NAOLINCO	-11.59	-1.45	-1.45	-14.49	-1.45	-5.80
COATEPEC	-1.37	-5.48	0.00	-4.11	-4.11	-1.37
JALCOMULCO	-11.59	-2.90	0.00	-13.04	0.00	-5.80
TEOCELO	-5.06	-7.59	-2.53	-6.33	-6.33	-5.06
JILOTEPEC	-3.61	-6.02	-1.20	-6.02	-4.82	-3.61
COSAUTLÁN DE CARVAJAL	-6.17	-9.88	-4.94	-8.64	-8.64	-6.17
EMILIANO ZAPATA	-19.72	-11.27	-8.45	-21.13	-8.45	-12.68
IXHUATLÁN DEL CAFE	1.39	-2.78	2.78	-1.39	-1.39	1.39
ATOYAC	-7.06	-9.41	-4.71	-8.24	-8.24	-7.06
COMAPA	-5.19	-7.79	-6.49	-6.49	-7.79	-2.60
TENAMPA	-4.05	-8.11	-2.70	-6.76	-6.76	-4.05
HUATUSCO	-5.06	-7.59	-3.80	-7.59	-7.59	-5.06

VEGA DE ALATORRE	2.47	-3.70	-1.23	1.23	-8.64	4.94
MISANTLA	1.35	-2.70	9.46	1.35	-1.35	1.35
ACATLÁN	0.00	-7.79	-1.30	-2.60	-6.49	-3.90
TEZONAPA	-6.49	-9.09	-5.19	-7.79	-7.79	-6.49

Cuadro 15. Cambio en el Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas (Δ INSH, %) para el periodo 2075-2099, utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO₂) y 8.5 (1370 ppm de CO₂)

MUNICIPIO	RCP 4.5			RCP 8.5		
	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR
ATZALAN	-13.16	-14.47	-7.89	-13.16	-11.84	-7.89
JALACINGO	20.00	17.33	22.67	26.67	20.00	24.00
LAS MINAS	-10.84	-16.87	-10.84	-9.64	-14.46	-10.84
MARTÍNEZ DE LA TORRE	-14.29	-21.43	-7.14	-21.43	-7.14	-8.33
NAOLINCO	-14.49	-14.49	-10.14	-21.74	-5.80	-13.04
COATEPEC	-6.85	-9.59	-4.11	-2.74	-8.22	-4.11
JALCOMULCO	-14.49	-14.49	-11.59	-21.74	-13.04	-13.04
TEOCELO	-8.86	-12.66	-7.59	-10.13	-11.39	-7.59
JILOTEPEC	-8.43	-15.66	-6.02	-2.41	-13.25	-6.02
COSAUTLÁN DE CARVAJAL	-11.11	-13.58	-8.64	-12.35	-13.58	-8.64
EMILIANO ZAPATA	-21.13	-21.13	-18.31	-28.17	-18.31	-19.72
IXHUATLÁN DEL CAFE	-4.17	-6.94	-1.39	0.00	-6.94	-1.39
ATOYAC	-10.59	-14.12	-10.59	-11.76	-15.29	-10.59
COMAPA	-7.79	-7.79	-5.19	-20.78	-10.39	-6.49
TENAMPA	-9.46	-12.16	-6.76	-5.41	-12.16	-6.76
HUATUSCO	-10.13	-12.66	-7.59	-10.13	-12.66	-7.59
VEGA DE ALATORRE	-1.23	-13.58	2.47	-8.64	-2.47	0.00
MISANTLA	0.00	-14.86	2.70	-6.76	8.11	1.35
ACATLÁN	-5.19	-14.29	-6.49	-2.60	-10.39	-2.60
TEZONAPA	-10.39	-12.99	-9.09	-10.39	-14.29	-9.09

Para el caso del Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas en el periodo 2015-2039 la mayor variación encontrada fue obtenida con el modelo GFDL CM3, se observa variación significativa en 5 de los 20 municipios estudiados con una trayectoria de concentración de 650 ppm de CO₂, mientras que para una trayectoria de 1370 ppm de CO₂ la variación se nota en 7 de las 20 estaciones. El modelo en general reporta disminución en el ISNH para casi todos los municipios,

sin embargo es notorio un municipio en el cual se observa un incremento de $\approx 20\%$; que es el caso del municipio de Jalacingo.

En el modelo HADGEM2 encontramos una variación en 5 de las 20 estaciones estudiadas con una trayectoria de concentración de 650 ppm de CO₂; mientras que una trayectoria de 1370 ppm de CO₂ se encuentra una variación en 3 de las 20 estaciones; este modelo muestra que para un aumento en la concentración de CO₂, contrario observar mayores pérdidas en el valor de INSH, estos mejoran de cierta manera, teniendo cambios negativos menores con respecto a las condiciones actuales.

Sin duda el modelo que menores cambios en el valor del INSH presenta, es el MPI ESM LR donde encontramos una variación en 1 de las 20 estaciones estudiadas con una trayectoria de concentración de 650 ppm de CO₂; en tanto que una trayectoria de 1370 ppm de CO₂ muestra una variación en 2 de las 20 estaciones.

La tendencia encontrada para el caso del periodo 2075-2099 es diferente a la correspondiente al 2015-2039, el modelo GFDL CM3 exhibe cambios significativos para más del 50% de los municipios, 11 para una trayectoria de concentración de 650 ppm de CO₂; y 12 para una trayectoria de 1370 ppm de CO₂; ahora el modelo que pronostica los mayores cambios para el INSH es el HADGEM2, advirtiendo cambios en 17 de los 20 municipios para la trayectoria de concentración de 650 ppm de CO₂; y 14 para una trayectoria de 1370 ppm de CO₂. El modelo que señala menores cambios es el MPI ESM LR con cambios en 7 de los 20 municipios para las 2 trayectorias de concentración.

Los rangos de variación a nivel general para ambas trayectorias de concentración van desde disminuciones de $\approx 28\%$ en el INSH, hasta incrementos del orden también de 20%; valores que corresponden a los municipios de Emiliano Zapata y Jalacingo respectivamente.

6.4.3. Estimación del cambio en el índice de integral de Fertilidad (ΔF_a , %)

Cuadro 16. Cambio en el índice integral de Fertilidad (ΔF_a , %) para el periodo 2015-2039, utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO₂) y 8.5 (1370 ppm de CO₂)

MUNICIPIO	RCP 4.5			RCP 8.5		
	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR
ATZALAN	1.15	1.22	0.91	1.19	1.14	1.27
JALACINGO	1.34	1.17	1.06	1.23	1.31	1.16
LAS MINAS	0.51	0.59	0.33	0.52	0.49	0.63
MARTÍNEZ DE LA TORRE	-5.53	-5.26	-4.99	-5.53	-5.67	-5.53
NAOLINCO	0.14	0.51	0.76	0.26	0.09	0.27
COATEPEC	-2.32	-1.92	-1.64	-2.12	-2.34	-2.19
JALCOMULCO	-2.18	-1.76	-1.45	-1.99	-2.21	-2.05
TEOCELO	-0.78	-0.39	-0.10	-0.59	-0.80	-0.66
JILOTEPEC	-3.55	-3.21	-2.97	-3.45	-3.60	-3.44
COSAUTLÁN DE CARVAJAL	-2.10	-1.70	-1.43	-1.91	-2.13	-1.98
EMILIANO ZAPATA	-1.69	-1.27	-0.98	-1.50	-1.72	-1.57
IXHUATLÁN DEL CAFE	0.18	0.58	0.86	0.37	0.16	0.30
ATOYAC	6.40	6.73	7.02	6.49	6.32	6.31
COMAPA	-3.86	-3.44	-3.15	-3.66	-3.88	-3.73
TENAMPA	-4.56	-4.16	-3.89	-4.36	-4.58	-4.44
HUATUSCO	-1.83	-1.43	-1.15	-11.79	-1.85	-1.71
VEGA DE ALATORRE	-7.39	-7.12	-6.83	-7.24	-7.46	-7.36
MISANTLA	-3.46	-3.18	-2.88	-3.30	-3.53	-3.43
ACATLÁN	3.61	3.51	3.44	3.59	3.73	3.59
TEZONAPA	-5.12	-4.78	-4.52	-5.01	-5.19	-5.18

Cuadro 17. Cambio en el índice integral de Fertilidad (ΔF_a , %) para el periodo 2075-2099, utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO₂) y 8.5 (1370 ppm de CO₂)

MUNICIPIO	RCP 4.5			RCP 8.5		
	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR
ATZALAN	3.17	3.17	-1.59	4.76	0.00	0.00
JALACINGO	0.00	0.00	-4.17	0.00	-2.78	-4.17
LAS MINAS	-6.45	-6.45	-9.68	-4.84	-8.06	-9.68
MARTÍNEZ DE LA TORRE	22.22	22.22	22.22	22.22	22.22	23.81
NAOLINCO	-6.67	-5.00	3.33	-8.33	1.67	1.67
COATEPEC	1.32	0.00	-1.32	1.32	0.00	0.00

JALCOMULCO	-6.90	-3.45	3.45	-6.90	0.00	0.00
TEOCELO	7.81	6.25	3.13	7.81	4.69	4.69
JILOTEPEC	13.11	11.48	8.20	13.11	8.20	8.20
COSAUTLÁN DE CARVAJAL	8.47	6.78	5.08	8.47	5.08	5.08
EMILIANO ZAPATA	-13.64	-10.61	-3.03	-13.64	-4.55	-6.06
IXHUATLÁN DEL CAFE	-1.37	-1.37	-4.11	-1.37	-4.11	-4.11
ATOYAC	-1.64	-3.28	-4.92	-3.28	-4.92	-4.92
COMAPA	-8.45	-5.63	0.00	-8.45	-1.41	-1.41
TENAMPA	7.81	6.25	3.13	7.81	3.13	3.13
HUATUSCO	4.76	3.17	1.59	4.76	1.59	1.59
VEGA DE ALATORRE	8.33	6.94	6.94	8.33	5.56	6.94
MISANTLA	5.48	6.85	6.85	5.48	5.48	6.85
ACATLÁN	-1.49	-1.49	-4.48	0.00	-4.48	-2.99
TEZONAPA	13.11	11.48	9.84	13.11	9.84	11.48

Finalmente tenemos el componente de fertilidad, donde el periodo 2015-2039 exhibe una variación significativa en 4 de los 20 municipios para los modelos GFDL CM3 y HADGEM2 para una trayectoria de concentración de 650 ppm de CO₂; mientras que para la trayectoria de 1370 ppm de CO₂ solo el modelo GFDL CM3 continua mostrando la variación para 4 municipios, el modelo HADGEM2 expone una variación significativa solamente en 1 de los 20 municipios. El modelo que menor variación reporta es el MPI ESM LR, donde la trayectoria de concentración de 650 ppm de CO₂ sucede en 1 de los 20 municipios y la trayectoria de 1370 ppm de CO₂ muestra una variación en 2 de los 20 municipios.

En el periodo 2075-2099 solo encontramos una variación mayor para el caso del modelo GFDL CM3, donde una concentración de 650 ppm de CO₂ se refleja con una variación en 5 municipios pero que con un aumento en la concentración a 1370 ppm de CO₂ se manifiesta con una variación de 11 municipios.

Los modelos HADGEM2 y MPI ESM LR muestran variaciones que no son tan diferentes, en el caso de una trayectoria de concentración de 650 ppm de CO₂ los municipios con cambios son 5 y 4 respectivamente; cuando la concentración de CO₂ pasa a 1370 ppm, estos cambios se reflejan en 6 y 5 municipios, respectivamente.

Es conveniente hacer notar que para el caso de la fertilidad aunque existen municipios con cambios mayores al 10%, no todos son negativos, de hecho a nivel general el índice de fertilidad se torna positivo con los escenarios de cambio climático.

- 6) Estimación del cambio en los rendimientos de la producción de café para las condiciones de los escenarios de cambio climático.

6.5. Valoración integral de la estimación de cambio en la productividad de café

Como vimos en las secciones anteriores cada componente del modelo para la estimación de la productividad del café presenta cambios que lógicamente influirán en los resultados esperados de cambio en dicha productividad de café.

En los siguientes cuadros se presentan las variaciones esperadas para la productividad, de manera global.

Cuadro 18. Cambio en la productividad de café (ΔY_{calc} , %) para el periodo 2015-2039, utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO₂) y 8.5 (1370 ppm de CO₂).

MUNICIPIO	RCP 4.5			RCP 8.5		
	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR
ATZALAN	-3.88	-5.15	-6.56	-8.18	-4.61	-5.39
JALACINGO	41.82	40.14	40.05	36.35	38.49	37.15
LAS MINAS	-16.09	-16.93	-18.28	-18.67	-15.84	-17.79
MARTÍNEZ DE LA TORRE	0.94	-3.04	-1.43	-1.87	10.87	7.63
NAOLINCO	-28.81	-32.30	-18.93	-13.60	-11.60	-17.27
COATEPEC	21.79	18.66	15.68	16.85	21.12	20.37
JALCOMULCO	-35.62	-36.55	-26.35	-21.80	-18.48	-26.22
TEOCELO	6.55	5.33	2.61	2.06	5.35	3.58
JILOTEPEC	5.52	3.00	1.76	-0.38	4.08	1.05
COSAUTLÁN DE CARVAJAL	-1.24	-3.66	-6.24	-6.87	-2.40	-4.21
EMILIANO ZAPATA	-39.78	-40.72	-30.81	-24.12	-22.33	-28.66
IXHUATLÁN DEL CAFE	15.74	12.79	11.42	9.42	14.84	12.66
ATOYAC	-9.63	-12.18	-13.11	-13.81	-9.90	-12.71
COMAPA	-11.51	-12.55	-10.90	-7.34	-3.97	-1.97

TENAMPA	-6.46	-8.91	-11.34	-13.07	-8.63	-10.42
HUATUSCO	1.38	-11.33	-2.42	-4.33	0.31	-1.57
VEGA DE ALATORRE	7.78	6.65	0.28	-6.44	3.16	8.99
MISANTLA	2.62	2.79	0.09	-0.19	12.94	3.99
ACATLÁN	1.44	0.28	-6.55	-7.92	-3.07	-4.01
TEZONAPA	-4.46	-5.67	-8.14	-8.58	-5.35	-5.91

Cuadro 19. Cambio en la productividad de café (ΔY_{calc} , %) para el periodo 2075-2099, utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO₂) y 8.5 (1370 ppm de CO₂).

MUNICIPIO	RCP 4.5			RCP 8.5		
	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR
ATZALAN	-8.05	-7.87	-11.04	-11.00	-6.43	-7.67
JALACINGO	39.99	46.83	36.90	34.65	38.62	38.47
LAS MINAS	-15.73	-12.77	-22.94	-22.99	-18.63	-20.52
MARTÍNEZ DE LA TORRE	-9.74	-24.13	-16.41	-7.10	2.21	-4.68
NAOLINCO	-35.11	-47.30	-35.27	-28.22	-26.80	-34.38
COATEPEC	10.47	11.84	6.97	3.55	14.13	10.97
JALCOMULCO	-41.47	-51.75	-40.53	-42.47	-34.92	-40.91
TEOCELO	-0.36	-3.29	-4.75	-7.86	1.25	-1.44
JILOTEPEC	-2.31	4.01	-10.24	-11.79	-0.88	-2.03
COSAUTLÁN DE CARVAJAL	-8.74	-11.22	-11.48	-14.29	-6.10	-8.47
EMILIANO ZAPATA	-45.29	-55.86	-43.45	-45.23	-38.14	-44.73
IXHUATLÁN DEL CAFE	5.12	7.96	3.24	-1.49	9.96	7.05
ATOYAC	-15.39	-16.22	-20.27	-21.52	-15.42	-16.36
COMAPA	-18.82	-39.63	-17.76	-25.12	-7.09	-19.77
TENAMPA	-14.07	-10.45	-16.84	-18.49	-11.27	-13.67
HUATUSCO	-11.68	-6.42	-10.63	-12.19	-3.63	-6.11
VEGA DE ALATORRE	-1.82	-17.25	-14.25	-10.18	5.25	-4.13
MISANTLA	-3.02	-16.42	-17.58	-1.46	1.59	-3.93
ACATLÁN	0.01	5.62	-9.53	-8.74	-4.56	3.03
TEZONAPA	-11.25	-13.80	-15.28	-20.56	-9.75	-12.52

El análisis de los Cuadros 18 y 19 muestra que en general existe similitud en las predicciones de cambio en el rendimiento para los 3 modelos de la circulación atmosférica que fueron utilizados.

Con excepción de los municipios de Jalacingo, Coatepec e Ixhuatlán del café, todos los demás presentan pérdidas en la productividad. Los municipios en los

que se esperan mayores cambios en relación a una disminución en la producción son Jalcomulco, Emiliano Zapata y Naolinco, el primero con una pérdida que según escenarios va desde un 18 hasta un 36%, para el periodo 2015-2039 y pasando a pérdidas mayores para el horizonte 2075-2099 donde los valores van del 34 hasta el 50% de la productividad; en el segundo las pérdidas son del orden de 22 al 40% para el periodo 2015-2039 y de 38 al 56% para el periodo 2075-2099; y finalmente en el caso del tercer municipio, sus valores oscilan entre 11 y 32% para el periodo 2015-2039 pasando a un rango del 26 al 48%.

En el caso de los municipios donde se esperan cambios benéficos en relación a la productividad, en orden de la magnitud de sus cambios son: Ixhuatlán del café, con cambios de entre el 9 al 16% para el periodo 2015-2039, y del 3 al 10% para el periodo 2075-2099; Coatepec, cuyos cambios oscilan entre 15 al 22% para el periodo 2015-2039 y 3 al 12% para el periodo 2075-2099; y al final tenemos al municipio de Jalacingo, cuyos valores de incrementos en la productividad van del 36 al 40% para el periodo 2015-2039 y del 34 al 47%. Como podemos ver para el último municipio se genera cierta incertidumbre en cuanto a la productividad al solo expandirse los rangos de cambio esperado.

Si promediamos la variación pronosticada de la producción agrícola esperada para los municipios con base en los modelos y sus respectivas trayectorias de concentración, simulando las condiciones de la zona cafetalera encontramos lo siguiente:

Periodo 2015-2039

- **Modelo GFDL CM3:** Una disminución del 2.59% para una concentración de 650 ppm de CO₂ y del 4.97% para el caso de las concentración de 1370 ppm de CO₂.
- **Modelo HADGEM2-ES:** Una disminución que va del 4.46% para una concentración de 650 ppm de CO₂ al 4.62% para el caso de las concentración de 1370 ppm de CO₂.

- **Modelo MPI ESM LR:** Pérdidas de 0.25% para una concentración de 650 ppm de CO₂ y de 2.04% para el caso de las concentración de 1370 ppm de CO₂.

Periodo 2075-2099

- **Modelo GFDL CM3:** Una disminución del 9.36% para una concentración de 650 ppm de CO₂ y del 12.91% para el caso de las concentración de 1370 ppm de CO₂.
- **Modelo HADGEM2-ES:** Una disminución que va del 13.56% para una concentración de 650 ppm de CO₂ al 13.62% para el caso de las concentración de 1370 ppm de CO₂.
- **Modelo MPI ESM LR:** Pérdidas de 5.53% para una concentración de 650 ppm de CO₂ y de 9.09% para el caso de las concentración de 1370 ppm de CO₂.

Desde luego como se puede advertir, aunque se pronostica un incremento en algunos municipios, en general puede verse una disminución de la producción agrícola a consecuencia del cambio climático, teniendo para el periodo 2015-2039 como valor más crítico, una pérdida global del 4.97%; en tanto que para el periodo 2075-2099 este valor se eleva hasta un 13.62%.

Es importante señalar que éstos cambios estimados de la productividad de café (ΔY_{calc}) deben una gran parte al componente de fertilidad del suelo que se incluyó al modelo utilizado, a continuación de muestran los valores porcentual de variación que representaría no tomar en cuenta este componente, los datos mostrados son para el periodo 2075-2099 y dos trayectorias de concentración: 650 ppm de CO₂ y 1370 ppm de CO₂.

Cuadro 20. Valores porcentuales de error generados por la exclusión del componente de fertilidad en el modelo utilizado para el cálculo de la productividad de café (ΔY_{calc} , %) para el periodo 2075-2099, utilizando 3 escenarios de cambio climático: GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR; con 2 trayectorias de concentración representativas (RCP): 4.5 (650 ppm de CO₂) y 8.5 (1370 ppm de CO₂).

MUNICIPIO	RCP 4.5			RCP 8.5		
	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR	GFDL CM3	HADGEM2	MPI ESM LR
ATZALAN	8.3	9.7	10.0	8.6	6.8	8.5
JALACINGO	0.0	0.0	0.0	2.0	-1.7	-0.1
LAS MINAS	16.7	18.1	18.6	15.3	15.3	17.1
MARTINEZ DE LA TORRE	-5.6	-6.9	-11.4	3.3	-8.7	-10.1
NAOLINCO	23.6	23.6	17.1	32.5	18.1	19.9
COATEPEC	-6.9	-6.9	-8.6	-3.3	-8.7	-10.1
JALCOMULCO	26.4	25.0	20.0	33.8	23.7	22.8
TEOCELO	2.8	2.8	1.4	4.7	1.2	-0.1
JILOTEPEC	2.8	2.8	2.9	3.3	1.2	-0.1
COSAUTLÁN DE CARVAJAL	9.7	9.7	8.6	11.3	6.8	7.0
EMILIANO ZAPATA	23.6	20.8	15.7	32.5	20.9	19.9
IXHUATLAN DEL CAFE	0.0	-1.4	-2.9	2.0	-3.1	-4.4
ATOYAC	15.3	16.7	14.3	15.3	11.0	11.3
COMAPA	11.1	9.7	0.0	23.2	9.6	8.5
TENAMPA	2.8	2.8	1.4	3.3	-1.7	-0.1
HUATUSCO	6.9	8.3	5.7	7.3	4.0	4.2
VEGA DE ALATORRE	-6.9	-6.9	-11.4	-0.6	-10.1	-10.1
MISANTLA	-6.9	-6.9	-10.0	0.7	-8.7	-10.1
ACATLAN	5.6	5.6	5.7	6.0	5.4	2.8
TEZONAPA	2.8	4.2	1.4	4.7	-0.3	-0.1

El análisis del cuadro anterior nos indica que el papel que tiene la fertilidad agrícola dentro del modelo, si bien en 2 municipios no parece tener impacto el no considerar o no la fertilidad, porque la variación es demasiado pequeña (como en el caso del municipio de Jalacingo, Ixhuatlán del Café y Tenampa) para todos los municipios restantes se observa claramente que el hecho de no incluir la fertilidad provoca errores de cálculo que van desde el 10% hasta valores por encima del 30%.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Se ha desarrollado la metodología basada en la simulación del crecimiento del cultivo de café similar a la propuesta por la IIASA/FAO (2012), con el objetivo de predecir el impacto del cambio climático global sobre la producción, considerando no solamente el efecto directo del cambio climático sobre el cultivo sino el efecto indirecto de la alteración de la fertilidad de los suelos sobre la productividad agrícola.

Se obtuvieron las relaciones cuantitativas entre los valores modales para las propiedades de los suelos de temporal como MO, P, K y pH, y el índice hidrotérmico local (IHT) para las condiciones climáticas promedio anuales al inicio del siglo XXI. Con ello se determinó que no influye o bien el escurrimiento es escaso para las zonas cafetaleras, esto se refuerza lo reportado por Pérez *et al.* (2005), y lo encontrado por Contreras *et al.* (2002) y Castillo *et al.* (2007); puesto que los muestreos realizados en los pozos situados en las zonas cafetaleras exhiben una tendencia que coincide con la encontrada en suelos con pendientes menores al 3%.

El análisis de vulnerabilidad de los componentes para la estimación de la productividad del cultivo del café: rendimiento potencial ($Y_{m\acute{a}x}$), índice de satisfacción de las necesidades hídricas (INSH), e índice integral de fertilidad (F), nos arroja que cada una ejerce influencia en el valor total de la producción estimada y sin prescindibles para determinar con un mayor grado de confiabilidad la variabilidad de la producción ante los escenarios de cambio climático.

Se encontró que la fertilidad juega un papel importante, pues desde el ajuste del modelo para comprobar su confiabilidad, la ausencia del componente de fertilidad originaba mayor dispersión en los datos y por lo tanto un menor ajuste. En el caso de la inclusión de la fertilidad, se obtuvo un ajuste del 93% con un error estándar de 0.08. por lo que podemos asegurar que la ignorancia del factor de cambio

potencial de la fertilidad de suelo debido al cambio climático lo que es típico para mayoría de las estimaciones de vulnerabilidad del cultivo de café al mismo cambio climático, puede causar errores en estas estimaciones con valores que pueden llegar a ser mayores a un 30%.

7.2. Recomendaciones

Una de las primeras recomendaciones es realizar estimaciones de la vulnerabilidad de otras variedades de cultivos de café; considerar los cambios en la fenología de los cultivos considerando los conceptos de grados días desarrollo e introducir el probable impacto de las principales plagas y malezas agrícolas utilizando el conocimiento de sus ciclos biológicos con los Grados Días Desarrollo del cultivo del café.

Para el caso que nos ocupa esta investigación, considerando los resultados que obtuvimos con esta metodología se generan las siguientes recomendaciones.

- Aunque a manera general, los cambios en la productividad van a disminuir, una de las medidas que se podría tomar para que la producción se mantenga en los niveles o bien se mejore, podría ser la redistribución de los cultivos de café; dando mayor atención a su cultivo en los municipios donde se espera menores efectos a consecuencia del cambio climático.
- En el análisis por componentes se detectó una importante disminución en el valor del índice de la satisfacción de las necesidades hídricas (INSH); por lo que otra de las acciones a tomar podría ser el establecimiento de obras de conservación que permitan la retención de una mayor humedad.
- Por otra parte otro de los componentes es la fertilidad y aunque en el momento se observa que existe un incremento en varios de los municipios, es posible que se ayude a disminuir las pérdidas en la productividad a través de la aplicación de abonos orgánicos, como los obtenidos por composteo.

8. LITERATURA CITADA

- Allen G, R., L. Santos P., D. Raes, y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO. Riego y Drenaje 56. Roma, Italia. 298 p.
- Anthony E. H., L. H. Ziska. 2000. Crop breeding strategies for the 21st century. *Journal of Experimental Botany*. 51 (342): 1-8.
- Asociación Veracruzana de la Cadena Productiva del Café (Avercafé), A.C. 2009. Plan Rector para la Cafecultura en Veracruz, Xalapa, Veracruz
- Aydarov, I. P. 1985. Manejo de los regímenes hídrico, salino y de nutrientes en suelos bajo riego (en ruso). Ed. Agropromizdat, Moscú, URSS. 204 p.
- Bazzaz F. A., Sombroek W. G. 1996. Global Climate Change and Agricultural Production. Direct and Indirect Effects of Changing Hydrological, Pedological and Plant Physiological Processes. FAO. Roma, Italia. 345 p.
- Budyko, M. 1974. Climate and life. Publ. Academia Press, New York, 508 p.
- Caballero M., Lozano-García S., Vázquez-Selem L., Ortega B. 2010. Evidencias de cambio climático y ambiental en registros glaciales y en cuencas lacustres del centro de México durante el último máximo glacial. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 62 (3): 359-377.
- Cabas J., Weersink A., Olale E. 2010. Crop yield response to economic, site and climatic variables. *Climatic Change*. 101 (1): 599–616
- Castillo A., M. Nikolskii G., Ortiz S., Vaquera H., Cruz B. Mejía S. González H. 2007. Alteración de la fertilidad del suelo por el cambio climático y su efecto en la productividad agrícola. *Interciencia* 32 (6): 368-376.
- Cavazos, T., J. A. Salinas, B. Martínez, G. Colorado, P. de Grau, R. Prieto González, A. C. Conde Álvarez, A. Quintanar Isaías, J. S. Santana Sepúlveda, R. Romero Centeno, M. E. Maya Magaña, J. G. Rosario de La Cruz, Ma. del R. Ayala Enríquez, H. Carrillo Tlazazanatza, O. Santiesteban y M. E. Bravo, 2013: Actualización de escenarios de cambio climático para

méxico como parte de los productos de la quinta comunicación nacional. Informe Final del Proyecto al INECC, 150 p.

Centro Interamericano de Agricultura tropical. 2012. Predecir el impacto del cambio climático sobre las áreas de cultivo de cacao en Nicaragua. Managua, Nicaragua.

Cline W. R. 2007. Global Warming and Agriculture: Impact Estimates by Country. Center for Global Development and Peterson Institute for International Economics, Washington, D. C.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). 2010. Agricultura y cambio climático: instituciones, políticas e innovación. Memoria del seminario internacional realizado en Santiago, 10 y 11 de noviembre de 2010.

Conde C., Liverman D., Flores M., Ferrer R., Araujo R., Betancourt E., Villarreal G. and Gay C. 1997. Vulnerability of rainfed maize crops in Mexico to climate change. *Climate Research* 9 (1): 17–23.

Conde, C., R. M. Ferrer, y D. Liverman. 2000. Estudio de la vulnerabilidad de la agricultura de maíz de temporal mediante el modelo CERES–MAIZE. *In: Gay–García, C. (comp). México: una Visión Hacia el Siglo XXI. El Cambio Climático en México. México, D. F. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. pp: 93–110.*

Contreras B. J. A., Gavrilov N. I. Aceves N. L. Arteaga R. R. Escalona M. M., Fernández R. D. S. 2002. Lluvia, escurrimiento superficial y erosión del suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra. *Agrociencia* 36 (3): 267-277.

Contreras Hernández A. 2010. Los cafetales de Veracruz y su contribución a la sustentabilidad. *Estudios Agrarios* 16 (45):143-161.

Cruz Galindo A. 2005. Relación del índice hidrotérmico local y las propiedades del suelo virgen de la República Mexicana para tres intervalos de pendientes. Tesis de licenciatura, Chapingo, Méx., México, 191 p.

- Cure, J.D., B. Acock. 1986. Crop responses to carbon dioxide doubling: A literature survey. *Agricultural and Forest Meteorology* 38:127-145.
- De Wit, C. T. 1966. Photosynthesis of leaf canopies. *Agricultural Research Reports*. No. 663. 1-56.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute). 2010. ArcGis. An easy mapping and geographic analysis platform. (Computer program) Version 10. CA, USA.
- Escobar E. B. Jaramillo R. A. 1983. Balance de radiación solar en Coffea arabica L. *Cenicafé (Colombia)*. 34 (3): 98-106.
- FAO. 2013. CROPWAT 8.0 for windows (computer program). Natural Resources and Environment Department. Roma, Italia.
- FAO-IIASA. 2000. Global agroecological zones. Methodology and results of the Global Agro-Ecological Zones Model. CD-ROM. Versión: 1.0.
- Gay G. C., 1994. México ante el cambio climático. Memorias del primer taller estudio de país: México. 18-22 de Abril de 1994.
- 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.
- 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). Publ. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Gómez O., Ramos C., Alegría B., Rodríguez R. y Martínez M. L. 2010. Guía para la innovación de la caficultura: de lo convencional a lo orgánico. Publ. Fundación para el Desarrollo Socio Económico Y Restauración Ambiental. San Salvador, El Salvador 122 p.
- González E. M., Jurado E., González E. S., Aguirre C. O., Jiménez P. J., Navar J. 2003. Cambio climático mundial: Origen y consecuencias. *Ciencia UANL*. 6 (3): 377-385.

- Halpert, M. S., Ropelewski, C. F. 1992. Surface temperature patterns associated with the Southern Oscillation. *Journal of Climate*. 5, 577-593.
- 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.
- Hyams, D. 2010. A comprehensive curve fitting system for Windows (computer programme). Version 1.4. Microsoft Corp. San Francisco, CA, USA.
- IPCC. 2012 *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge University Pres. 582 pp.
- IIASA/FAO, 2012. *Global Agro-ecological Zones (GAEZ v3.0)*. IIASA, Publ. FAO, Rome, Italy.
- INIFAP. 2012. Muestreo de las propiedades del suelo en zonas cafetaleras de Veracruz. INIFAP Campo experimental Xalapa, Veracruz, México.
- Jacoby G. C., and D'Arrigo R. D. 1997. Tree rings, carbon dioxide, and climatic change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 94(16): 8350-8353.
- Jaramillo Robledo, A.; Santos, J.M. 1980. Balance de radiación solar en *Coffea arabica* L., variedades Catuaí y Bourbon amarillo. *Cenicafé (Colombia)*. 31(3): 86-104.
- Jaramillo R. A. y Gómez G. L. 1989. Microclima en cafetales a libre exposición solar y bajo sombrío. *Cenicafé (Colombia)*. 40(3): 65-79.
- Jaramillo. R. A. 2005. La redistribución de la radiación solar y la lluvia dentro de plantaciones de Café (*Coffea arabica* L.) *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 29 (112): 371-382.

- Jiménez C. A., Vargas T. V., Salinas C. W. E., Aguirre B. M. J., Rodríguez C. D. 2004. Aptitud agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.* 53(): 58-74.
- 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.
- Maddison, D., M. Manley y P. Kurukulasuriya (2007), "The impact of climate change on African agriculture. A Ricardian approach", Policy Research Working Paper, 4306, Banco Mundial.
- Magaña R. V. O. 2004. El cambio climático global: Comprender el problema. *En: Cambio climático: Una visión desde México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología.*
- Magaña R. V. O. 2010. Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones. Publ. Centro de ciencias de la atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mann M. E., R. S. Bradley, and M.K. Hughes. 1998. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature* 392(): 779-787.
- Mann, M.E., R. S. Bradley, and M. K. Hughes. 1999. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties, and limitations. *Geophysical Research Letters*, 26(6): 759-762.
- Mendelsohn, R., S. N. Seo. 2007. Changing farm types and irrigation as an adaptation to climate change in Latin American agriculture. Policy Research Series Working. Paper N° 4161, Banco Mundial.
- Moguel P., V.M. Toledo. 1996. El café en México, ecología, cultura indígena y sustentabilidad. *Ciencias.* 43(1) 40-52.
- Moguel P. y V.M. Toledo. 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of México. *Coservation Biology.* 13 (1): 11-21.

- Moreno S. A. R., Urbina S. J. 2008. Impactos sociales del cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología - Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. 1ª. Ed. 72 p.
- NIKOLSKII G. Y. 1987. Los aspectos teóricos y prácticos del cambio de las propiedades de los suelos bajo la influencia del riego y drenaje en la zona húmeda de la URSS. *Guidrotecniya y Melioratsiya*. 7 (): 20-24 (en ruso).
- Nikolskii G. I., Bakhlaeva O., Contreras, A. and Ordaz, V. 2001. Assessment of changes in soil properties as dependent on hydrothermic conditions of plowlands (by the example of Mexico). *Eurasian Soil Science*. 35 (10): 1031-1036.
- Nikol'skii, Yu. N., Bakhlaeva, O.S., Contreras-Benitez, A., Ordaz-Chaparro, V. 2002. Assessment of changes in soil properties as dependent on hydrothermic conditions of plowlands (by the example of Mexico). *Eurasian Soil Science*. 35(): 1031-1036.
- Nikol'skii, Yu. N., Castillo-Álvarez, M., Bakhlaeva, O.S., Román-Calleros, X.A. and Maslov, B.S. 2006. The influence of the possible global climate change on the properties of Mexican soils. *Eurasian Soil Science*. 39 (11): 1164-1169.
- Nikol'skii, Yu.N., Castillo-Alvarez M., Bakhlaeva, O.S., Gama-Castro, J., Landeros-Sanchez, C. 2010. Assessing the effect of possible global climate changes on the fertility of Mexican soils and the prediction of crop yields. *Eurasian Soil Science*, 43, 985-992.
- Parfenova N. I. y N. M. Reshetkina. 1995. Principios ecológicos del manejo del régimen hidrogeoquímico de las tierras regadas. Ed. *Gidrometeoizdat*, San Petersburgo, Rusia. 359 p. (en ruso)
- Pegov, C.A., P.M. Jomyakov. 1991. Modelación del desarrollo de los sistemas ecológicos. *Gidrometeoizdat*. San Petersburgo, Rusia. 223 pp.
- Pérez N. J., Valdés V. E., Hernández S. M. E., Ordaz C. V. 2005. Lluvia, escurrimiento superficial y erosión del suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra. *Agrociencia*. 39 (4): 409-418.

- Robles B. H. M. 2011. Los productores de café en México: Problemática y ejercicio de presupuesto. Mexican Rural Development Research Reports. Reporte 14. 62 p.
- Rodney M. J. J. N., Freddy H. J. R. 2002. Análisis de tendencia de series de tiempo oceanográficas y meteorológicas para determinar evidencias de cambio climático en la costa del Ecuador. Acta oceanográfica del Pacífico. 11 (1): 17-21
- Rosenzweig C., M. Parry. 1994. Potential impact of climate change on world food supply. Nature. 367 (): 133-138. 1994
- SARH. Manual de conservación del suelo y agua. Instructivo. 3ra edición, Publ. CP, Chapingo. 1991. 33 p.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2013. Estadísticas de producción de Café. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. Disponible en su página de internet en: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>
- Schroth, G., P. Laderach, J. Dempewolf, S. Philpott, J. Hagggar, H. Eakin, T. Castillejos, J. Garcia Moreno, L. Soto Pinto, R. Hernandez, A. Eitzinger, and J. Ramirez-Villegas. 2009. Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, Mexico. Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change. 14: 605-625.
- Tetumo G. J., Gavrilo N. I. Ortíz S. C. A., Tijerina C. L. Arteaga R. R. 2001. Evaluación del impacto del riego sobre algunas propiedades de suelos a través del índice hidrotérmico, Agrociencia 35(2): 137-147.
- Terrazas-Mendoza L., I. Nikolskii-Gavrilo, S. Herrera-Gómez, M. Castillo-Alvares, A. Exebio-García. 2010. Alteración de la fertilidad del suelo y vulnerabilidad de maíz y trigo bajo riego debido al cambio climático. Tecnología y Ciencias del Agua, 1 (1):87-102.
- Terrazas M. L. 2011. Alteración de la fertilidad del suelo por el cambio climático y su impacto en la productividad de frijol. Tesis de Maestría en ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx., México.

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* 34 (5): 322-329.

VOLOBUEV, V.R. 1974. Introducción a la energía de formación de suelos. (En ruso). Moscú: Nauka Publ. 127 p.

Zapata H. R. D. 2002. Química de los procesos pedogenéticos del suelo. Documento de trabajo no publicado. Escuela de Geociencias. Publ. Universidad Nacional de Colombia. 79 p.

9. ANEXOS

Anexo 1. Ubicación geográfica de los municipios que integran las regiones cafetaleras, seleccionados para el estudio.

REGIÓN CAFETALERA	MUNICIPIO	LATITUD	LONGITUD
Atzacan	Atzacan	19° 47'	-97° 15'
	Jalacingo	19° 48'	-97° 18'
	Las minas	19° 41'	-97° 9'
	Martínez de la Torre	20° 04'	-97° 3'
	Naolinco	19° 37'	-96° 49'
Coatepec	Coatepec	19° 28'	-96° 57'
	Jalcomulco	19° 18'	-96° 44'
	Teocelo	19° 23'	-96° 58'
	Jilotepec	19° 36'	-96° 54'
	Cosautlan de Carvajal	19° 19'	-96° 59'
Córdoba	Emiliano Zapata	19° 25'	-96° 42'
	Ixhuatlán del café	19° 03'	-96° 59'
	Atoyac	18° 55'	-96° 48'
Huatusco	Comapa	19° 10'	-96° 42'
	Tenampa	19° 15'	-96° 52'
	Huatusco	19° 09'	-96° 58'
Misantla	Vega de Alatorre	20° 01'	-96° 39'
	Misantla	19° 59'	-96° 54'
	Acatlán	19° 42'	-96° 50'
Tezonapa	Tezonapa	18° 36'	-96° 45'

Anexo 2. Días representativos y número de días por mes para estimar valores promedios mensuales de Radiación.

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

Anexo 3. Valores de Radiación neta, precipitación e IHT calculado para las estaciones seleccionadas y estaciones aledañas a la zona de estudio en condiciones de inicios de siglo XXI (Actual)

ESTACIÓN	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	PRECIP.	ALBEDO	RN	IHT
30008	Altotonga, altotonga	19.76	-97.23	1867.0	1456.82	0.15	113.21	1.30
30012	Atzalan, atzalan	19.79	-97.25	1697.0	1947.32	0.15	93.16	0.80
30074	Jalacingo, jalacingo	19.81	-97.31	1880.0	1678.52	0.15	98.33	0.98
30089	Las minas, las minas	19.69	-97.15	1415.0	1492.89	0.15	68.94	0.77
30102	Martinez de la torre dge	20.08	-97.06	89.0	1732.57	0.15	103.87	1.00
30213	Martinez de la torre	20.07	-97.05	63.0	1986.44	0.15	94.55	0.79
30003	Actopan, actopan	19.50	-96.61	250.0	851.62	0.15	119.04	2.33
30007	Almolonga, naolinco	19.59	-96.78	730.0	1046.63	0.15	120.77	1.92
30021	Carrizal, emiliano zapata	19.36	-96.66	242.0	892.02	0.15	126.42	2.36
30026	Coatepec, coatepec	19.46	-96.94	1188.0	1746.85	0.15	117.45	1.12
30068	Ídolos, actopan	19.41	-96.52	100.0	899.56	0.15	119.12	2.21
30076	Jalcomulco, jalcomulco	19.33	-96.76	335.0	1090.12	0.15	127.42	1.95
30085	La tembladera, xico	19.52	-97.12	3127.0	1473.29	0.15	86.17	0.97
30087	Las ánimas, jalapa	19.50	-96.89	1281.0	1372.77	0.15	100.19	1.22
30112	Mozombo, actopan	19.50	-96.47	70.0	761.88	0.15	161.37	3.53
30114	Naolinco de victoria	19.65	-96.87	1542.0	1606.77	0.15	80.03	0.83
30140	Rancho viejo, emiliano zapata	19.45	-96.78	914.0	1141.51	0.15	76.79	1.12
30141	Rinconada, emiliano zapata	19.35	-96.56	263.0	884.18	0.15	94.07	1.77
30157	Santa maría, tatetla	19.27	-96.71	282.0	950.61	0.15	111.56	1.96
30158	Santa rosa, actopan	19.47	-96.46	65.0	995.32	0.15	135.06	2.26
30175	Tembladeras, xico	19.51	-97.12	3102.0	1683.16	0.15	67.3	0.67
30179	Teocelo, teocelo	19.39	-96.97	1188.0	2026.2	0.15	100.11	0.82
30195	Emiliano zapata	19.48	-96.78	924.0	917.26	0.15	105.66	1.92
30209	Ixhuacán de los reyes	19.36	-97.12	1802.0	2828.14	0.15	95.45	0.56
30266	El diamante, actopan	19.45	-96.54	146.0	891.89	0.15	96.37	1.8
30267	La concepción, jilotepec	19.60	-96.90	1000.0	1663.32	0.15	76.22	0.76
30311	Cosautlán, cosautlán	19.33	-96.99	1274.0	2111.96	0.15	92.68	0.73
30336	Ixhuacán, ixhuacán	19.35	-97.11	1802.0	2851.34	0.15	94.15	0.55
30339	Cerro gordo, emiliano zapata	19.43	-96.70	580.0	935.6	0.15	97.98	1.75
30353	La mancha, actopan	19.60	-96.38	20.0	1207.65	0.15	83.55	1.15
30452	Briones, coatepec	19.51	-96.95	1349.0	1712.69	0.15	109.15	1.06
30032	Coscomatepec bravo (smn)	19.07	-97.05	1530.0	2216.07	0.15	96.32	0.72
30072	Ixhuatlán del café	19.05	-96.99	1350.0	1900.15	0.15	115.13	1.01
30115	Naranjal, fortín (cfe)	18.81	-96.96	697.0	2443.31	0.15	108.47	0.74
30155	Santa anita, atoyac	18.92	-96.81	826.0	2116.74	0.15	96.47	0.76
30047	El coyol, comapa (cfe)	19.17	-96.70	545.0	1078.74	0.15	104.47	1.61
30052	Elotepec, huatusco	19.19	-97.04	1030.0	2285.87	0.15	55.75	0.41
30066	Huatusco de chichúllar	19.15	-96.96	1284.0	2007.51	0.15	118.23	0.98

30177	Tenampa, tenampa	19.25	-96.88	1015.0	1681.69	0.15	82.57	0.82
30187	Totutla, totutla	19.21	-96.96	1446.0	2066.03	0.15	68.48	0.55
30342	Centro regional, huatusco	19.15	-96.95	1186.0	1960.59	0.15	92.44	0.79
30108	Misantla, misantla	19.93	-96.86	310.0	2265.02	0.15	67.30	0.50
30191	Vega de alatorre	20.02	-96.65	25.0	1578.69	0.15	94.76	1.00
30337	Libertad, misantla	20.05	-96.97	59.0	1715.56	0.15	105.28	1.02
30338	Acatlán, acatlán	19.70	-96.84	1751.0	1442.24	0.15	75.75	0.88
30053	El palmar, zongolica	18.53	-96.78	103.0	2936.27	0.15	106.88	0.61
30197	Vista hermosa, zongolica	18.66	-96.71	263.0	2755.07	0.15	126.40	0.76
30055	El remolino (cfe)	20.39	-97.24	119.0	1342.8	0.15	91.82	1.14
30058	Espinal (cfe)	20.26	-97.42	62.0	1502.6	0.15	103.93	1.15
30079	Joloapan (cfe)	20.24	-97.28	47.0	1480.7	0.15	99.61	1.12
30106	Melchor ocampo (cfe)	20.35	-97.53	139.0	1482.8	0.15	92.13	1.04
30125	Papantla	20.45	-97.33	190.0	1222.6	0.15	95.24	1.30
30154	Santa ana (cfe)	20.26	-97.59	117.0	2143.5	0.15	96.52	0.75
30173	Tecuan-tepec (cfe)	20.14	-97.53	322.0	2312.8	0.15	98.56	0.71
30358	Hueytepec	20.33	-96.99	30.0	1958.2	0.15	113.67	0.97

Anexo 4. Propiedades físicas y químicas medidas en algunos pozos de las zonas cafetaleras en el estado de Veracruz (parte I)

Ident.	Lat (°)	Long (°)	Altitud (msnm)	IHT	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Mat. Org. (%)	Sat. de bases (%)	Cond. Electr. (Mmhos cm ⁻¹)
16001	19.99	-96.61	37	1.31	46.0	26.0	28.0	1.4	68.5	1.0
16004	19.95	-97.22	470	0.94	46.7	23.4	29.9	3.9	46.4	1.0
16008	19.94	-96.92	257	0.96	36.0	36.0	28.0	3.4	73.3	1.0
16011	19.91	-96.62	400	1.39	28.0	34.0	38.0	5.7	66.9	1.0
16013	19.89	-96.80	557	0.98	42.0	34.0	24.0	2.7	25.7	1.0
16015	19.86	-97.21	1333	0.9	31.4	11.3	57.3	6.1	55.4	1.0
16024	19.77	-97.28	2000	0.91	15.2	37.8	47.0	11.0	15.0	1.0
16027	19.70	-96.58	850	1.8	38.0	24.0	38.0	2.9	67.4	1.0
16038	19.57	-96.71	875	1.57	14.0	22.0	64.0	0.4	64.0	1.0
16049	19.52	-96.36	7	2.01	2.0	2.0	96.0	0.1	100.0	1.0
16051	19.50	-96.93	1300	1.09	43.4	20.0	36.6	2.8	23.3	1.0
16061	19.41	-96.66	409	2.08	40.0	24.0	36.0	6.1	75.2	1.0
16064	19.40	-96.94	950	1.04	28.0	24.0	48.0	1.1	74.5	1.0
16073	19.34	-96.85	767	1.36	24.0	22.0	54.0	1.7	57.6	1.0
16093	19.06	-97.06	1640	0.72	8.0	30.0	62.0	10.9	8.8	1.0
22003	18.94	-96.76	477	0.93	33.8	29.3	36.9	3.4	56.4	1.0
22035	18.58	-96.70	195	0.94	30.0	12.0	58.0	3.7	50.3	1.0

22038	18.55	-96.81	171	0.81	30.0	38.0	32.0	5.0	70.7	1.0
22039	18.55	-96.89	900	0.81	41.0	32.0	27.0	2.9	67.5	1.0
102082	20.15	-97.00	65	1.01	28.0	32.0	40.0	3.2	68.6	1.0
102083	20.15	-96.79	46	0.99	64.0	14.0	22.0	1.0	97.8	3.0
102085	20.13	-96.87	51	0.95	44.0	36.0	20.0	1.0	100.0	1.0

Anexo 5. Propiedades físicas y químicas medidas en algunos pozos de las zonas cafetaleras en el estado de Veracruz (parte II)

Ident.	Lat (°)	Long (°)	Altitud (msnm)	pH	CIC meq/100 g	Na ppm	K ppm	Ca ppm	Mg ppm	P ppm	Textura
16001	19.99	-96.61	37	5.7	27.0	0.8	0.3	9.4	8.0	1.7	Fina
16004	19.95	-97.22	470	5.4	20.7	0.1	0.3	6.3	2.9	3.0	Fina
16008	19.94	-96.92	257	6.6	27.0	0.3	0.3	16.9	2.3	1.0	Fina
16011	19.91	-96.62	400	5.6	33.5	0.1	0.7	13.1	8.5	2.0	Media
16013	19.89	-96.80	557	6.0	26.8	0.1	0.1	5.0	1.7	0.1	Fina
16015	19.86	-97.21	1333	5.4	43.0	0.1	0.3	19.0	4.4	2.5	Media
16024	19.77	-97.28	2000	5.8	42.8	0.1	0.3	5.0	1.0	0.5	Media
16027	19.70	-96.58	850	6.5	38.0	0.3	0.2	20.6	4.5	2.6	Fina
16038	19.57	-96.71	875	5.9	10.0	0.3	0.2	4.4	1.5	0.7	Media
16049	19.52	-96.36	7	6.6	4.5	0.1	0.2	8.1	1.1	6.8	Gruesa
16051	19.50	-96.93	1300	4.9	28.3	0.1	0.4	3.1	2.7	1.6	Fina
16061	19.41	-96.66	409	7.8	60.8	0.1	0.9	39.4	5.3	7.4	Fina
16064	19.40	-96.94	950	6.9	18.8	0.3	0.3	11.3	2.1	4.1	Media
16073	19.34	-96.85	767	5.3	11.8	0.1	0.1	3.1	3.5	1.1	Media
16093	19.06	-97.06	1640	4.9	30.8	0.1	0.1	2.2	0.3	24.9	Media
22003	18.94	-96.76	477	5.7	16.4	0.1	0.1	5.5	3.5	2.1	Media
22035	18.58	-96.70	195	5.2	19.5	0.1	0.2	6.3	3.2	4.6	Media
22038	18.55	-96.81	171	6.0	22.5	0.2	0.1	13.1	2.5	1.7	Media
22039	18.55	-96.89	900	6.0	18.2	0.2	0.1	9.4	2.6	2.8	Fina
102082	20.15	-97.00	65	5.8	14.0	0.1	0.3	5.0	4.2	1.3	Media
102083	20.15	-96.79	46	7.2	53.8	3.6	0.2	36.6	12.2	0.7	Fina
102085	20.13	-96.87	51	7.3	33.0	0.2	0.4	30.6	5.7	3.5	Fina

Anexo 6. Rendimientos reportados de producción del café por municipio para los años 2003-2011 en kg/ha.

MUNICIPIO	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Promedio
ATZALAN	840	2100	2180	2500	2410	2950	3100	3200	2960	2471.11
JALACINGO	2280	2200	2600	1450	2700	1810		2150	2500	2211.25
LAS MINAS	2140	2440	2500	1060	2600	1500		2150	2500	2111.25
MARTÍNEZ DE LA TORRE	720	1800	2320	2800	1950	2400	2820	2810	3500	2346.67
NAOLINCO	1600	2280	2650	2000	2650	2100	2050	2000	550	1986.67
COATEPEC	2850	2700	2650	2100	2000	2500	2300	2000	2120	2357.78
JALCOMULCO	2500	2800	2150	1930	2520	900	550	1000	1500	1761.11
TEOCELO	2870	2780	2620	1900	2620	2000	470	2200	2850	2256.67
JILOTEPEC	1500	2080	2600	2200	2300	2000	1900	2000	550	1903.33
COSAUTLÁN DE CARVAJAL	2800	2710	2600	2000	2880	2000	2200	2190	2100	2386.67
EMILIANO ZAPATA	2500	2830	2100	1900	1000	1800	2200	2000	1840	2018.89
IXHUATLÁN DEL CAFÉ	3450	1750	1500	2040	2000	1500	1500	3500	2900	2237.78
ATOYAC	2500	3000	1760	1770	1960	1930	1960	1960	2250	2121.11
COMAPA	2200	3500	2500	2730	1000	1500	2000	3000	2800	2358.89
TENAMPA	2600	2000	1400	2800	700	1000	2500	3000	2560	2062.22
HUATUSCO	2400	4000	2000	2700	800	1250	2000	3000	2700	2316.67
VEGA DE ALATORRE	1420	2280	2520	2500	2000	1540	1290	2500	2500	2061.11
MISANTLA	800	2350	2340	2680	2860	1510	3000	2620	2750	2323.33
ACATLÁN		2070	2650	1800	2400	1900		2000	600	1917.14
TEZONAPA	3000	2000	2000	1000	2000	1500	1500	1510	1900	1823.33