
IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA FLORACIÓN Y DESARROLLO DEL FRUTO DEL CAFÉ EN VERACRUZ, MÉXICO

LOURDES VILLERS, NANCY ARIZPE, ROGER ORELLANA, CECILIA CONDE y JOSEFINA HERNÁNDEZ

RESUMEN

La región de Huatusco, Veracruz, es un área de alta producción de café en México. La temperatura y la precipitación son elementos climáticos a los que es sensible el café. Estos parámetros están relacionados con la altitud, orientación de ladera y pendiente en los sistemas agroecológicos de sombra. Con la finalidad de tener un mejor conocimiento de los posibles impactos del cambio climático sobre la floración y desarrollo del fruto para las especies *Coffea arabica* y *C. canephora*, se realizó un escenario base, relacionando los períodos en los que estas fases reproductivas del café se desarrollan con la climatología de la región a través de diagramas ombrotérmicos. Al diagrama ombrotérmico base, se le aplicaron los incrementos de temperatura y razones de cambio en precipitación de las salidas de

dos modelos de cambio climático con el fin de medir para cada modelo los posibles impactos en las fases reproductivas señaladas. Según los dos escenarios de cambio climático aplicados, se pueden provocar diferencias importantes en la climatología regional y, por tanto, fuertes impactos, alterando el inicio de la floración que está relacionado con el promedio de lluvia mensual y la amplitud de la sequía preestival que se presenta durante los meses de invierno. Asimismo, el cambio climático impactaría sobre las variaciones en la disponibilidad de agua durante el crecimiento del fruto, relacionadas principalmente a modificaciones en el superávit hídrico y el incremento de la sequía intraestival que se presenta durante la estación lluviosa.

El cambio climático se refiere a las variaciones estadísticamente significativas en el estado promedio del clima o su variabilidad, siendo persistentes durante períodos largos, típicamente décadas o más. El conocimiento de la influencia antropogénica en el calentamiento del clima ha mejorado en los últimos años. Actualmente se reconoce con un nivel de confianza muy alto (90%) que el calentamiento observado es debido al aumento de

concentraciones de gases de efecto invernadero asociadas a actividades humanas (IPCC-WGI, 2007)

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como lo evidencian un número significativo de cambios observados y sus respuestas que están siendo investigados tanto para los sistemas naturales como para los manejados. Estas evidencias abarcan impactos en los ciclos estacionales y de vida (fenológicos) de las especies, lo que incluye desde

la retención o caída de las hojas hasta cambios en la floración y la maduración de frutos, entre otros (Rosenzweig *et al.*, 2007).

La fenología es el estudio de la secuencia temporal de las distintas fases por las que atraviesa un organismo a lo largo de su ciclo de vida. Las especies perennes tienen también ciclos anuales regidos por la estacionalidad o factores climáticos (radiación solar e insolación, temperatura y humedad), factores

PALABRAS CLAVE / Café / Cambio Climático / Diagramas Ombrotérmicos / Floración / Fructificación /

Recibido: 22/04/2008. Modificado: 09/01/2009. Aceptado: 13/05/2009.

Lourdes Villers. Doctora en Geografía, Universidad de París I-Sorbona, Francia. Investigadora, Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México. Dirección: Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, C.P. 04510. México D.F, México. e-mail: villers@servidor.unam.mx

Nancy Arizpe. Bióloga, Facultad de Ciencias, UNAM, México. Estudiante, CCA, UNAM, México. e-mail: nancyar_1999@yahoo.com

Roger Orellana. Doctor en Ciencias Biológicas (Ecología), Universidad de Sevilla, España. Investigador, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., México. e-mail: orellana@cicy.mx

Cecilia Conde. Doctora en Ciencias de la Tierra, UNAM. Investigadora, CCA, UNAM, México. e-mail: conde@servidor.unam.mx

Josefina Hernández. Geógrafa, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México. Técnico, Instituto de Geografía, UNAM, México. e-mail: hlozano@servidor.unam.mx

astronómicos (fotoperiodos) y factores biológicos como pueden ser las interacciones entre plantas y animales (Lieth, 1974; Montenegro y Ginocchio, 1999; Schwartz, 2003). En diferentes estudios, dependiendo del grado de profundidad, se ha subdividido el ciclo completo de desarrollo de las plantas comestibles entre 6 y 10 fases fenológicas donde se reconoce la importancia de las etapas vegetativas, de floración, de la formación del fruto y la fase de maduración (Camargo y Camargo, 2001; Meier, 2001).

Los contrastes climáticos durante un ciclo anual, expresados en las estaciones, desempeñan un papel importante para el desarrollo fenológico de las plantas, siendo los eventos meteorológicos tales como lluvia, temperatura y radiación solar los reguladores principales en la floración y desarrollo del fruto. Asimismo, las prácticas de manejo agrícola y la cosecha de las plantas cultivadas están estrechamente asociados con el comportamiento del clima y tiempo atmosférico. De esta manera encontramos que la temperatura y precipitación, así como otros factores tales como el manejo del cultivo, pueden afectar o beneficiar la planta del café (Fournier y Di Stefano, 2004).

Los impactos climáticos son definidos como las consecuencias del cambio o variabilidad climáticas en los sistemas naturales, transformados y/o humanos; por lo tanto, las fases fenológicas de especies silvestres o domesticadas pueden ser afectadas por estos impactos.

Las gráficas o diagramas ombrotérmicos relacionan la temperatura media mensual con la precipitación de un sitio dado en períodos anuales. Estos diagramas han sido utilizados para explicar relaciones bioclimáticas y en particular, para señalar algunas relaciones entre la vegetación y el clima de diversas regiones del mundo (Box, 1995; Charan, 1992; Allue, 1990).

En estas gráficas se señala en el eje de las abscisas los meses del año y sobre el eje de las ordenadas dos ejes (y_1 , y_2); a la izquierda la temperatura anual y a la derecha la precipitación. La fórmula original de Bagnouls y Gaussen (1953), $p = 2t$, donde p es la precipitación total y t es la temperatura media, corresponde solamente para los climas mediterráneos con régimen invernal de lluvias. Para México, García

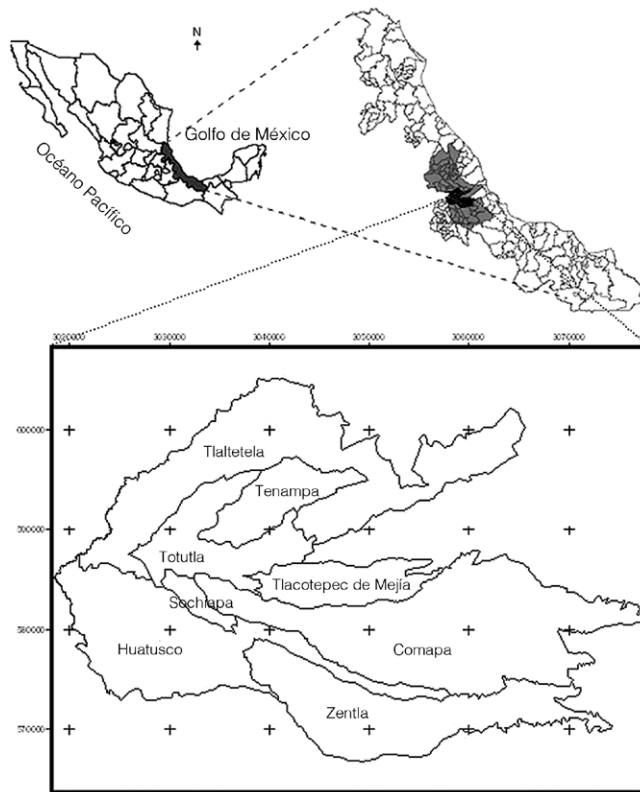


Figura 1. Localización de la región de Huatusco y de los ocho municipios estudiados en Veracruz, México.

et al. (1983), modificaron la escala de las ordenadas de las gráficas de acuerdo a los regímenes de lluvia del país, de manera que $p = 2t + 28$ para régimen de lluvias de verano, $p = 2t + 21$ para régimen de lluvias de verano pero alto porcentaje de lluvia invernal ($>10,5$ respecto al anual), y $p = 2t + 14$ para régimen de lluvias intermedio o uniformemente repartidas.

El presente trabajo tiene como objetivo principal precisar los impactos potenciales del cambio climático sobre la floración y el desarrollo del fruto de la planta del café bajo sombra en la región de Huatusco, Veracruz, México.

Área de estudio

En el estado de Veracruz, localizado sobre la vertiente del Golfo de México, 67 227 caficultores cultivan 152 458ha y aportan ~30% de la producción cafetalera de México. En la zona central de este estado se concentra el 90,2% de los productores y el 92,7% del total de la superficie cafetalera en la entidad. (Escamilla *et al.*, 1994).

La región de Huatusco, ubicada en la zona centro de Veracruz (Figura 1), está conformada por ocho municipios (Comapa, Huatusco, Sochiapa,

Tenampa, Tlacotepec de Mejía, Tlaltetela, Totutla y Zentla) que cubren una superficie de 1302km² y la altitud de la región fluctúa de 470 a 1520msnm (Díaz *et al.*, 1994). La temperatura media registrada en el área es de 20°C y la precipitación es de 1900-2100mm, valores que concuerdan con estudios realizados por González (1978) donde señala que los requerimientos para el buen crecimiento de la planta de café son de 16 a 25°C de temperatura media y de 1800 a 2000 mm de precipitación total anual. Como referencia, el clima de la zona, de acuerdo con el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por García (1973) corresponde a: (A)Caf(m)w”h”(i)g que se refiere a un clima “Semicálido del grupo de los templados, con verano cálido, con lluvias uniformemente repartidas y abundantes en verano, con sequía intraestival, poca oscilación térmica y máximo de temperatura antes del solsticio de verano”.

En la región de estudio se cultivan dos especies de café, *Coffea arabica* L. con 13 variedades y *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner, con una sola variedad. Las variedades que se encuentran con mayor frecuencia de la especie *C. arabica* son la *typica*, *caturrea* y *garnica*. Para la especie *C. canephora*, la variedad *robusta* es la que se cultiva principalmente en altitudes bajas y medias, ya que tolera el sol directo y soporta temperaturas más altas (Arizpe, 2005).

Como sombra del café se encuentran con mayor frecuencia el vainillo (*Inga jinicuil*) y frutales como el plátano, cultivado básicamente en altitudes bajas, y en menor proporción naranja, mandarina y mango. Se encuentran además árboles maderables como el cedro blanco (*Cupressus* sp.), principalmente en las comunidades ubicadas en altitudes mayores y que son utilizados tanto para sombra como para madera. En la zona también se encuentran cultivos de maíz (*Zea mays*) y frijol (*Phaseolus vulgaris*), utilizados en la dieta alimenticia, el ixpepe (*Trema micrantha*) y el aguacate (*Persea americana*).

Metodología

Escenario base

La construcción del escenario base, o estado actual, consiste

en la representación en forma de diagrama ombrotérmico de las variables climáticas, y debajo del diagrama ombrotérmico se trazó de manera resumida el régimen estacional de las fenofases del periodo base o estándar de las especies de café cultivadas en la región de Huatusco, *Coffea arabica* y *C. canephora*, con el fin de relacionar cada etapa fenológica de la planta con las condiciones de humedad y temperatura que se establecen en el diagrama. Esta correspondencia permite disponer un marco de referencia o línea base sobre el cual se evalúan los impactos de las modificaciones de las variables climáticas de precipitación y temperatura que señalan los escenarios de cambio climático sobre las fenofases del café.

Diagramas ombrotérmicos

Para la realización del escenario climático base de la zona de estudio, se obtuvo información de la estación meteorológica Huatusco (19°9'N, 96°57'O a 1344msnm) ubicada en la zona de interés. Se construyó una base de datos con los promedios mensuales de precipitación y temperatura para un período de 30 años. El período analizado fue de 1961 a 1990 debido a que es considerado como la referencia estándar internacional por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2001). Con esta información se elaboró el diagrama ombrotérmico utilizando la fórmula $p=2t+14$ propuesta por García *et al.* (1983), ya que en esta área existe un régimen de lluvias uniformemente repartidas.

La intersección de las curvas de temperatura y precipitación del diagrama ombrotérmico forma un conjunto de polígonos que definen distintas condiciones de eficiencia de la humedad respecto a la temperatura. En cada caso se nombró y calculó el área del polígono correspondiente a cada condición de humedad: déficit hídrico, condición húmeda y superavit (Orellana *et al.*, 2002; Arizpe, 2005).

Déficit hídrico. Se refiere al área de la gráfica que representa un aporte de lluvia insuficiente para mantener húmedo el suelo. Este valor se obtiene como déficit hídrico = $(\sum(\text{precipitación}) + \sum(\text{temperatura } n))$, considerando la suma de la precipitación de los meses secos (noviembre a abril) y la temperatura $n = (\text{temperatura} \times 100) / t$, que para el caso del escenario base es $t = 14$ (según la fórmula definida por el régimen de lluvias) + el valor de la temperatura promedio.

Condición húmeda. Área que representa el aporte de lluvia entre 60 y 100mm,

lo cual mantiene el suelo cercano a la humedad permanente y libre de estrés a las plantas. Regularmente se refiere al área del diagrama del período de lluvia que está por debajo del superávit y por encima del déficit hídrico. Este valor se calcula como $\sum(\text{precipitación} - \text{temperatura } n)$. Se consideran los meses donde la precipitación es entre 60 y 100mm. En caso de que en un mes la precipitación supere los 100mm, este valor es considerado como máximo para realizar el cálculo.

Superávit. Es la cantidad de lluvia recibida por encima de los 100mm en el período lluvioso, y que rebasa la capacidad de campo del suelo. Este valor se calcula como $\sum(\text{precipitación}) - 100$. En los meses en donde la precipitación es mayor a 100mm, se resta ésta cantidad ya que este valor corresponde al área del polígono de condición húmeda. Asimismo se evaluaron las condiciones de sequía aplicando las fórmulas expuestas por Mosiño y García (1966) para la sequía relativa, aquí denominada sequía intraestival, y se ajustó la fórmula para evaluar la sequía preestival.

Sequía intraestival. Es la disminución en la cantidad de lluvia durante el período estival. Corresponde al área según los meses que se presenta en el diagrama como reducción de lluvia durante el verano. Se calcula (Mosiño y García, 1966) como sequía intraestival (%) = $\text{área del polígono calculada} / \text{cantidad de lluvia total de mayo a octubre}$.

Sequía preestival. Área que representa el período más pronunciado de deficiencia de agua durante el invierno. Es el rango que puede llevar a las plantas al estrés hídrico. Se estima como sequía preestival (%) = $\text{área del polígono calculada} / \text{cantidad de lluvia total de noviembre a abril}$.

Fases fenológicas estudiadas

Se agruparon en cuatro las etapas fenológicas o fenofases estudiadas según la definición de Camargo y Camargo (2001) en 1) crecimiento foliar, que agrupa yemas, hojas, senescente; 2) floración, que agrupa botón, abierta, marchita; 3) crecimiento del fruto, que agrupa inmaduro, maduro, marchito; y 4) maduración y corte. Los meses cuando se presenta cada etapa en la región de Huatusco fueron establecidos a partir de entrevistas realizadas a productores en 26 comunidades de los seis municipios que conforman la región. Igualmente se consideraron los reportes de las observaciones de las mismas etapas realizadas en el Centro Re-

gional Universitario Oriente (CRUO), Universidad Autónoma Chapingo, que desde 1987 desarrolla actividades académicas y de vinculación regional sobre tecnología agrícola en la zona cafetalera de Coatepec-Huatusco (Díaz *et al.*, 1994).

En Arizpe (2005) se encuentra información desglosada de las entrevistas, que incluye datos sobre el productor, las especies y variedades cultivadas, lista de los árboles de sombra que se emplean, calendarización de cada etapa fenológica, y algunas observaciones sobre el tipo de agroecosistema cafetalero, así como condiciones físicas del terreno y altitud en el que se encontraba el cultivo.

Escenarios de Cambio Climático

Para evaluar los efectos que se tendrían en el clima global de continuar con el aumento antropogénico de gases de efecto invernadero, se utilizaron los llamados Modelos de Circulación General (MCG). En este estudio se aplicaron los resultados de las simulaciones de dos de esos MCG, que fueron empleados en el estudio de México (Gay, 2000), el *Geophysical Fluids Dynamics Laboratory* (GFDL-R30) y el *Canadian Climate Center Model* (CCCM). Las salidas de estos modelos simulan los incrementos en la temperatura y las razones de cambio en la precipitación, en el momento en que se duplicara el CO₂ de la atmósfera. Estos modelos han sido empleados para evaluar a nivel nacional los posibles impactos del cambio climático en diversos sectores y en estudios recientes se han utilizado con el fin de verificar la consistencia de los resultados anteriores y crear escenarios para los años 2020 y 2050 (Gay *et al.*, 2007; Trejo *et al.*, 2007).

En general, el modelo GFDL-R30 (Manabe *et al.*, 1991) tiene una resolución espacial de 2,22° de latitud por 3,75° de longitud, lo que define una malla con 96×80 puntos. Tiene, además, nueve niveles verticales y arroja un incremento global en la temperatura promedio de 4°C. El modelo CCCM (Boer *et al.*, 1992) tiene una resolución de 3,75° latitud por 3,75° longitud, con 10 niveles en la vertical y un total de 96×48 puntos de malla, y proyecta un incremento global promedio de 3,5°C en la temperatura. En cuanto a precipitación, estos modelos muestran signos diferentes; el CCCM proyecta en general decrementos, mientras que el GFDL proyecta aumentos en la precipitación anual. En el presente estudio se selec-

TABLA I
VALORES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DE HUATUSCO. ESCENARIO BASE. RESULTADOS EN ÁREA Y PORCENTAJE DE LOS POLÍGONOS SEGÚN LAS DISTINTAS CONDICIONES DE HUMEDAD

Mes	Temp	Pcp	Temp n	Pcp-Temp n
E	16,5	51	48,2	2,8
F	17,2	51	50,3	0,7
M	19,7	48	57,6	-9,6
A	21,9	79	64,0	15,0
M	22,8	135	66,7	68,3
J	22,3	397	65,2	331,8
J	21,6	373	63,2	309,8
A	21,8	289	63,7	225,3
S	21,7	362	63,5	298,5
O	20,4	161	59,6	101,4
N	19,0	79	55,6	23,4
D	17,4	48	50,9	-2,9
Anual	20,2	2073		

b. Distintas condiciones de humedad

Condición	Área/Polígono	% del Área
Superávit	1117,0	52,9
Condición húmeda	256,5	12,2
Déficit hídrico	737,9	34,9
Suma	2111,4	100,0

Condición	% de sequía	Meses
Sequía intraestival	5,65	Jul y Agos
Sequía preestival	33,15	Dic a Mar

cionaron estos modelos con el fin de precisar los incrementos de temperatura y abarcar la incertidumbre en los posibles cambios en la precipitación regional ante aumentos en las concentraciones de los gases de efecto invernadero.

Con los valores de temperatura y razones de cambio en la precipitación que arrojaron los modelos empleados se construyeron nuevos diagramas ombrotérmicos según cada modelo y se evaluaron las diferencias mensuales y anuales de temperatura y precipitación, así como las diferencias entre el escenario base y los modelos para cada condición de humedad, y su impacto sobre los períodos en los que se presentan las etapas fenológicas del café.

Resultados y Discusión

Escenario Base

En la Tabla Ia se presentan los valores mensuales de las variables de precipitación y temperatura de la estación meteorológica Huatusco, así como los cálculos de la temperatura n y precipitación-temperatura n, necesarios para la construcción de las condiciones de humedad del escenario base.

En Ib se dan los resultados de los cálculos de las distintas condiciones de humedad representadas en el diagrama ombrotérmico de la Figura 2.

Para el escenario base (período de 30 años de datos) y sus respectivas condiciones ombrotérmicas estándares se reporta una temperatura media anual de 20,2°C y una precipitación total anual de 2073mm (Tabla Ia). Respecto a las condiciones de humedad (Tabla Ia y b), los meses que presentan superávit son de mayo a octubre y cubren el 52,9% del total de las tres condiciones de humedad consideradas en este apartado, que

TABLA II
VALORES PARA EL MODELO GFDL-R30 Y RESULTADOS PARA LAS DISTINTAS CONDICIONES DE HUMEDAD

a. Temperatura y precipitación mensual

Mes	Temp	Pcp	Temp n	Pcp-Temp n
E	18,8	81	36,9	44,1
F	20,2	43	39,7	3,3
M	22,6	61	44,4	16,6
A	24,7	81	48,5	32,5
M	25,0	144	49,1	94,9
J	25,0	556	49,1	506,9
J	24,3	418	47,7	370,3
A	24,5	390	48,1	341,9
S	24,5	488	48,1	439,9
O	23,1	175	45,4	129,6
N	21,6	91	42,4	48,6
D	20,5	56	40,3	15,7
Anual	22,9	2584		

b. Distintas condiciones de humedad

Condición	Área/Polígono	% del Área
Superávit	1571,0	58,6
Condición húmeda	410,0	15,3
Déficit hídrico	700,6	26,1
Suma	2681,6	100,0

Condición	% de sequía	Meses
Sequía intraestival	10,87	Jul y Agos
Sequía preestival	14,04	Feb y Mar

son superávit, condición húmeda y déficit hídrico.

Con respecto a los porcentajes de sequía intraestival, ésta representa el 5,65% del período lluvioso y se presenta en los meses de julio y agosto. En relación a la sequía preestival, presente durante los meses secos de invierno, representa el 33,15% del período, a lo largo de cuatro meses, de diciembre a marzo (Tabla Ib y Figura 2).

En la parte inferior del diagrama ombrotérmico del escenario base (Figura 2) se muestran las etapas fenológicas de las dos especies de café que se cultivan en la región de Huatusco, con el fin de asociar mes a mes las diferentes condiciones de temperatura y precipitación con la etapa de desarrollo de la planta que le corresponde. El promedio mensual de precipitación durante los meses de la sequía preestival es de 49,5mm; dicha sequía es necesaria para el inicio de la floración, que se presenta en marzo. Según reportes (Nolasco, 1985; Castillo *et al.*, 1997; Conde *et al.*, 1997) un estrés hídrico corto provoca que la floración se presente. En el caso de los reportes de las parcelas pertenecientes al CRUO, la floración inicia en febrero y se prolonga hasta junio; en cambio, los productores de la región señalan un período más corto de floración

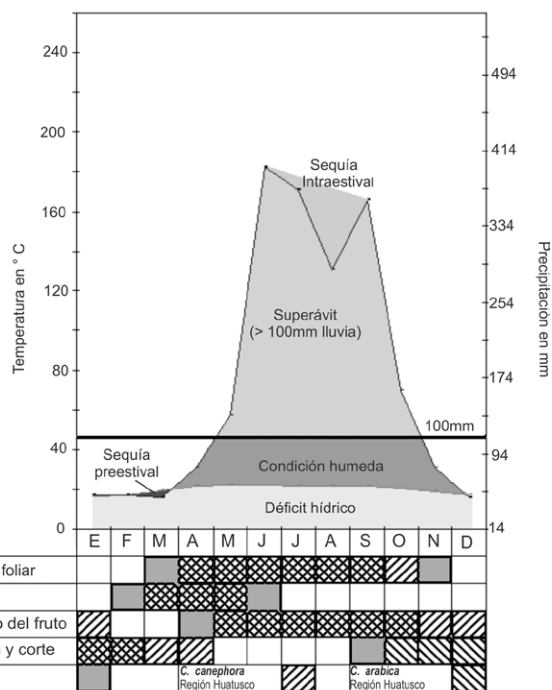


Figura 2. Escenario Base. Gráfica ombrotérmica, donde se señalan la temperatura y precipitación promedio mensual y las distintas condiciones de humedad. En la parte inferior, meses en los cuales se presentan las etapas fenológicas estudiadas del café.

TABLA III
VALORES PARA EL MODELO CCCM Y
RESULTADOS PARA LAS DISTINTAS
CONDICIONES DE HUMEDAD

a. Temperatura y precipitación mensual				
Mes	Temp	Pcp	Temp n	Pcp-Temp n
E	18,0	25	35,9	-10,9
F	18,9	42	37,6	4,4
M	21,4	41	42,6	-1,6
A	24,2	109	48,2	60,8
M	25,0	144	49,8	94,2
J	24,0	286	47,8	238,2
J	23,5	261	46,8	214,2
A	24,0	289	47,8	241,2
S	23,9	242	47,6	194,4
O	23,0	190	45,8	144,2
N	21,2	82	42,2	39,8
D	19,1	41	38,0	3,0
Anual	22,2	1752		

b. Distintas condiciones de humedad		
Condición	Área/Polígono	% del Área
Superávit	821,0	44,3
Condición húmeda	405,9	21,9
Déficit hídrico	625,7	33,8
Suma	1852,6	100,0

Condición	% de sequía	Meses
Sequía intraestival	11,12	Julio
Sequía preestival	68,53	Dic a Mar

dentro de sus parcelas, de marzo a mayo. El desarrollo del fruto se alcanza cuando se supera el déficit hídrico y la condición húmeda. Tal y como se aprecia en el diagrama éste se inicia en mayo tanto para *C. arabica* como para *C. canephora*. En el caso del CRUO, el desarrollo de fruto se inicia en abril y termina en agosto, pero los productores señalan que en sus parcelas el crecimiento del fruto para *C. arabica* finaliza en octubre y para *C. canephora* puede prolongarse hasta enero.

Usualmente, el corte se inicia en octubre para *C. arabica* y termina en febrero, y para el caso de *C. canephora* inicia en enero y termina en abril. El superávit de lluvia presente de mayo a octubre asegura el crecimiento del fruto en el caso de *C. arabica*, y si la condición húmeda se prolonga hasta noviembre, las condiciones mínimas para el crecimiento del fruto de *C. canephora* var. *robusta* están aseguradas. La presencia de la sequía intraestival y el descenso marcado de la precipitación en plena temporada lluviosa marca el inicio de la maduración del fruto y posteriormente da inicio a la temporada de corte o cosecha del café, usualmente en octubre para *C. arabica* y en enero para *C. canephora*. En el escenario base, la sequía intraestival no es tan marcada ya que corresponde al 5.65% del área del polígono del Superávit.

Escenarios de Cambio Climático

En la Tabla IIa se presentan los valores mensuales de las variables indicadas para el caso de la aplicación del modelo GFDL-R30 y en IIb se muestran los resultados de los cálculos de las distintas condiciones de humedad y los porcentajes de la sequía intraestival y la sequía preestival según este modelo. Uno de los resultados más significativos de la aplicación del modelo GFDL-R30 es que existe un cambio en el régimen de lluvias y en lugar de ser intermedio o uniformemente repartidas como se señaló para el escenario base, con este modelo pasará a ser un régimen de lluvias de verano, por lo que se aplicó la fórmula $p = 2t + 28$ propuesta por García *et al.* (1983). De esta manera el tipo climático cambió a Am w” (i) g, que corresponde a un clima cálido húmedo con lluvias en verano con influencia de monzón, con sequía intraestival, poca oscilación térmica y máximo de la temperatura antes del solsticio de verano.

En general la temperatura promedio anual de la región Huastusco, Veracruz aumentaría de 20,2°C a 22,9°C y la precipitación total anual se incrementaría de 2073mm a 2584mm. El incremento promedio anual de la temperatura sería de 2,7°C y en la precipitación sería de ~511mm con respecto al escenario base.

En el diagrama ombrotérmico de la Figura 3 se encuentra la representación gráfica resultante de este modelo. Se puede observar una sequía preestival menos prolongada, representando el 14% del período seco en los meses de febrero y marzo (Tabla IIa y b) en lugar de presentarse de diciembre a marzo según el escenario base, lo cual reduciría probablemente el inicio de la etapa de floración y la etapa de maduración del fruto. El impacto sobre la maduración del fruto será para las dos especies que se cultivan, pero principalmente para *C. canephora*, ya que la madu-

ración y corte se prolongan normalmente hasta abril, como se indica en la parte inferior del diagrama. Estas condiciones climáticas apuntan a un descenso en la producción de café en la región, ya que se encuentran fuera del intervalo considerado óptimo (González, 1978). En estudios previos (Gay *et al.*, 2006) se mostró que efectivamente la producción de café decrecerá en la región si los cambios en la temperatura y precipitación alcanzan los valores anuales propuestos por el modelo GFDL.

Asimismo, un incremento en el superávit de lluvia representado en el diagrama y en la Tabla IIb con el 59,1% del área total de las condiciones de humedad consideradas probablemente incrementaría algunas enfermedades como el mal de hilachas (*Corticium koleroğa*) que se presenta por exceso de humedad. El porcentaje de canícula o sequía intraestival se incrementaría casi al doble, a 10,87% durante julio y agosto, lo que podría repercutir en el crecimiento y maduración del fruto.

En la Tabla IIIa se presentan los valores mensuales de las variables indicadas para el caso de la aplicación del modelo CCCM, y en IIIb se muestran las distintas condiciones de humedad y de sequía. Al aplicar este modelo, al igual que en el anterior, el régimen de lluvias cambia de uniforme-

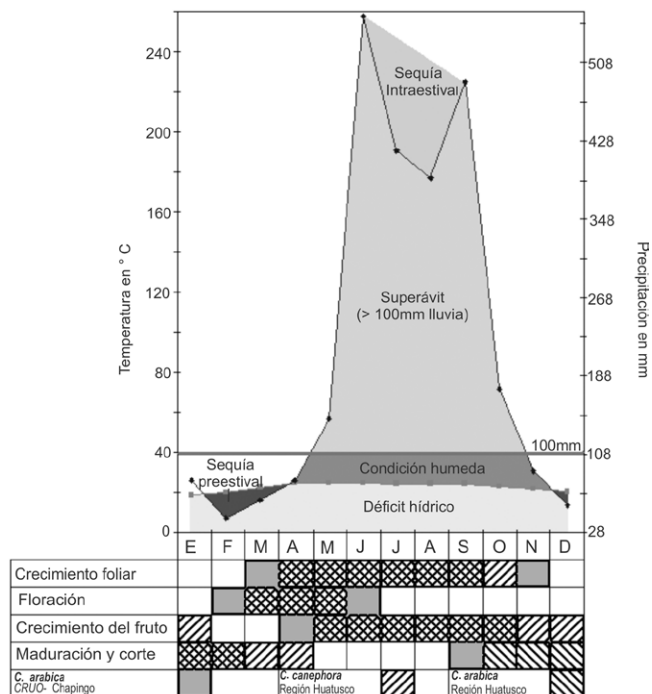


Figura 3. Modelo GFDL-R30. Gráfica ombrotérmica modificada en los valores de temperatura y precipitación así como las distintas condiciones de humedad según las salidas del modelo. En la parte inferior, meses en los cuales se presentan las etapas fenológicas del café del escenario base para evaluar impactos.

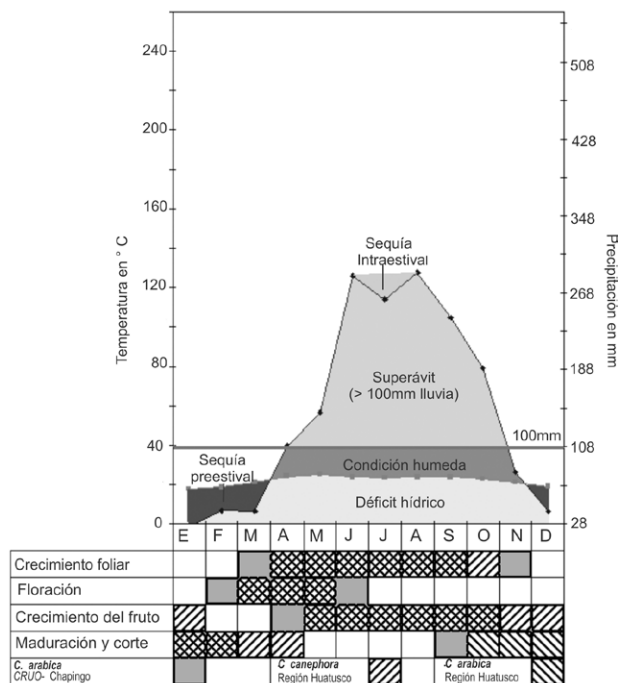


Figura 4. Modelo CCCM. Gráfica ombrotérmica modificada en los valores de temperatura y precipitación así como las distintas condiciones de humedad según las salidas del modelo. En la parte inferior, meses en los cuales se presentan las etapas fenológicas del café del escenario base para evaluar impactos.

mente repartidas del escenario base a lluvias de verano, por lo que se aplicó la fórmula $p = 2t + 28$ (García *et al.*, 1983). El tipo climático cambió a: A(C) w2(w'')(i')g: semicálido, pero más cálido que en el escenario base, el más húmedo de los subhúmedos con lluvias en verano y sequía intraestival, poca oscilación térmica y máximo de temperatura antes del solsticio de verano. La representación gráfica con esta modificación se encuentra en la Figura 4.

La temperatura promedio anual de la región Huastusco se incrementaría según el modelo CCCM de 20,2°C del escenario base a 22,2°C. Asimismo, se presentaría un decremento importante de la precipitación de 2073mm anuales a 1752mm. En la Tabla IIIb y el diagrama ombrotérmico correspondiente (Figura 4) se muestra que la sequía preestival se presenta más intensa con respecto al modelo GFDL-R30 y al escenario base, ocupando el 68,53% del período seco. Como consecuencia de ello se prevé que existirían grandes repercusiones negativas durante la floración y en la maduración del fruto principalmente para *C. canephora*, cuya etapa de maduración es posterior a *C. arabica*. Bajo este mismo escenario se presentaría un superávit con una representación del 44,7%, muy inferior a lo que se considera como porcentaje en el escenario base (~53%). Por otro lado se

anticiparía el período de lluvias mayores a los 100mm al mes de abril, con lo cual habría una dehiscencia de la floración que repercutiría en una baja producción de frutos. El porcentaje de la presencia de la canícula o sequía intraestival durante el período de lluvias sería muy superior al escenario base y a lo que se muestra en el modelo GFDL-R30. Julio sería el mes cuando este evento se presentaría (Figura 4). En general, en el gráfico se aprecia que la estacionalidad de las lluvias se hace muy marcada, teniendo como repercusión el desarrollo anual de la planta y por lo tanto en su producción de fruto.

Comparación de modelos

Los valores de temperatura resultantes de los dos modelos están por encima de lo que en promedio se señala para la región de Huastusco en el escenario base (+2,7°C para el GFDL y +2,0°C para el CCCM). Un aspecto a resaltar son las variaciones de la precipitación (+511mm para el GFDL y -321mm para el CCCM). Estas diferencias originan que a cada escenario (base, GFDL y CCCM) le corresponda un tipo climático distinto, pasando de un semicálido templado con lluvias uniformemente repartidas del escenario base, a un cálido húmedo con lluvias en verano según el escenario GFDL o a un semicálido, siendo el más cálido de ellos el del escenario CCCM.

Los datos arrojados por el escenario base y por los modelos aplicados señalan que el superávit que se refiere a la amplitud y cantidad de lluvia recibida por encima de los 100mm y su relación durante el período del crecimiento del fruto, es distinto según los modelos. En el caso del modelo GFDL, está por encima del porcentaje base (+5,7%) y en el caso del modelo CCCM está por debajo (-8,6%). Como se ha señalado con anterioridad, es durante este período que se desarrolla el fruto, por lo que una disminución como lo marca el modelo CCCM puede impactar de manera negativa en esta fase.

La sequía preestival en el escenario base abarca el 33,15% del período seco, mientras que para el mo-

delo GFDL-R30 el porcentaje es mucho menor (14,04%) pero para el modelo CCCM el porcentaje que abarca del período seco es mayor, ya que es cercano al 69%. En este caso los modelos señalan situaciones contrastantes. Mientras en el modelo GFDL la sequía no es tan marcada, lo cual podría inhibir el desencadenamiento del inicio de la floración, según el modelo CCCM es justo lo contrario, se presentaría una sequía muy severa en la que habría marchites en la floración. Las alteraciones durante este período afectarían igualmente las etapas de maduración y corte del fruto.

La sequía intraestival varía de 5,6% en el escenario base a 10,9% en el modelo GFDL-R30 y 11,1% con el CCCM. En este último caso es cerca del doble de lo que se presenta normalmente en el escenario base, por lo cual esta merma aunada al decremento en la fase de superávit para el caso del modelo CCCM representaría afectaciones muy severas en el desarrollo del fruto.

Conclusiones

Algunas evaluaciones de los posibles impactos del cambio climático en las diferentes fases de crecimiento de un cultivo específico han sido realizadas utilizando desde muy complejos modelos de simulación agrícola, que modelan el crecimiento del cultivo día a día (para el caso del maíz, ver Conde *et al.*, 1997) hasta estudios que se basan únicamente en los requerimientos hídricos y térmicos estacionales (Conde *et al.*, 2007). En este trabajo se propone un método sencillo para realizar la evaluación de los posibles impactos del cambio climático, utilizando diagramas ombrotérmicos que permiten relacionar las variables básicas de temperatura y precipitación mensuales con los requerimientos para estas mismas variables en las etapas de floración y fructificación del café principalmente, por lo que este método puede emplearse para el estudio en otros cultivos. Los cálculos de las distintas condiciones de humedad, como lo son superávit, condición húmeda, déficit hídrico, sequía intraestival y sequía preestival, pudieron ser comparados a partir de la creación de un escenario base, con dos modelos generales de circulación dirigidos al cambio climático como son el CCCM y el GFDL-R30.

El trabajo en campo fue fundamental, ya que aunado a la recopilación de datos del medio físico, se realizaron cuestionarios y entrevistas a productores de 26 comunidades en ocho municipios veracruzanos que sirvieron

para establecer los periodos en los cuales se presenta cada fase del desarrollo de la planta, así como una descripción del agroecosistema cafetalero. Los productores en esta región se han percatado sobre la disminución de la floración de la planta; si antes había dos o tres floraciones al año, ahora solo se presenta una debido a que las lluvias se atrasan o se adelantan, y cada vez el tiempo de lluvias es más corto. Sin embargo, aún no han instaurado medidas para paliar esta situación.

Ante las condiciones de cambio climático propuestas por las salidas de los modelos de circulación general (CCCM y GFDL-R30) empleadas en este trabajo, se observa que el inicio de la floración del café puede verse afectado, ya que la sequía preestival en lugar de presentarse en cuatro meses y no ser tan intensa como se indica en el escenario base (49,5mm de lluvia durante el periodo), se concentraría principalmente en dos meses (febrero y marzo) si el cambio climático se da en términos de lo proyectado por el modelo GFDL-R30 con un incremento de lluvia (52mm) en relación al escenario base. Esta condición puede provocar que el disparo del inicio de la floración sea en un número reducido de flores, probablemente de la mitad, ya que esta fenofase se reduciría de cuatro meses a dos meses.

En contraste, en el modelo CCCM la sequía preestival se presentaría durante los cuatro meses señalados en el escenario base pero con una intensidad mayor, ya que únicamente llovería 45mm, las condiciones hídricas bajas pueden afectar el disparo de la floración; el estrés hídrico al que estarían sujetas las plantas sería infranqueable y muy probablemente no se producirían flores.

Para la maduración del fruto ambos escenarios de cambio climático apuntan a serios riesgos en la producción de café, ya que para el GFDL se presenta un superávit por encima del valor normal, mientras que, en contraste, para el CCCM se observa una disminución del superávit. En este último modelo los riesgos a la producción del café son mayores, ya que esta condición debería llegar a los mínimos del escenario base para tener un buen crecimiento del fruto. Asimismo, un exceso en las condiciones de humedad, como en el que se señala para el modelo GFDL-R30, podría generar la aparición de enfermedades como el "mal de hilachas".

Observando posibles impactos para estas etapas fenológicas, puede discutirse con los productores de la

región algunas medidas de mitigación que hayan aplicado en el pasado o que propongan ante posibles condiciones de cambio climático futuro. Estas medidas pueden incluir el cambio en el manejo del cultivo, el cambio de variedades empleadas, el concentrar el cultivo del café en las zonas de producción con clima más propicio, el diversificar los ingresos del productor mediante otros productos agrícolas propios de los cafetales (madera, frutales, miel, flores), etc. En cualquier caso, ninguna de estas medidas será viable sin la participación directa de los productores en la toma de decisiones y en la implementación de las mismas.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación y sus resultados se realizaron dentro del proyecto AIACC-LA29: Evaluación Integrada de la Vulnerabilidad Social y Adaptación a la Variabilidad y Cambio Climáticos de los Agricultores de México y Argentina, con el apoyo del Global System for Analysis, Research and Training (START), Third World Academy of Sciences (TWAS) y del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

REFERENCIAS

Allue AJL (1990) *Atlas Fitoclimático de España. Taxonomías*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España. 221 pp.

Arizpe RNG (2005) *Impactos de la Variabilidad y el Cambio Climáticos en los Agroecosistemas Cafetaleros en Huatusco, Veracruz*. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México. 80 pp.

Bagnouls F, Gaussen H (1953) *Saison Sèche et Indice Xéothermique*. Documents pour les cartes des productions vegetales. Serv. Gén. II, 1, art. VIII, Toulouse 1953: 47 pp. + 1 mapa.

Boer GJ, McFarlane N, Lazare M (1992) Greenhouse gas - Induce climatic change simulated with the CCC second generation GCM. *J. Climate* 5: 1045-1077.

Box EO (1995) Climatic relations of the forests of East and South-East Asia. En Box EO, Peet RK, Masuzawa T, Yamada I, Fujiwara K, Maycock PF (Eds.) *Vegetation Science in Forestry: Global Perspective Based on Forest Ecosystems of East and Southeast Asia*. Handbook of Vegetation Science. Vol. 12/1. Kluwer. Dordrecht, Holanda. pp.23-55.

Camargo AP, Camargo MBP (2001) Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. *Bragantia* 60: 65-68.

Castillo G, Contreras A, Zamarripa A, Méndez I, Vázquez M, Holguín F, Fernández A (1997) *Tecnología para la Producción del Café en México*. Folleto Técnico N° 8. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Veracruz, México. 90 pp.

Charan AK (1992) *Plant Geography*. Rawat. Jaipur, India. pp. 25-42.

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

Conde C, Vinocur M, Gay C, Seiler R, Estrada F (2007) Climatic threat spaces in Mexico and Argentina. En Leary N, Conde C, Kulkarni J, Nyong, Pulhin J (Eds.) *Climate Change and Vulnerability*. Earthscan. Londres, RU. pp. 279-306.

Díaz CS, Pérez PJ, Robledo MD, Castro FR, Bulbarena GG, Pérez PE, Trujillo OL, Licona VA, Escamilla PE, Paz GA, Rodríguez PB, Martínez PD, Guadarrama ZC, Santoyo CH (1994) *Programa para el desarrollo rural sostenible en la región cafetalera de Huatusco, Ver.* Universidad Autónoma de Chapingo. México. 88 pp.

Escamilla E, Licona A, Díaz S, Santoyo H, Sosa R, Rodríguez L (1994) *Los Sistemas de Producción de Café en el Centro de Veracruz México, un Análisis Tecnológico*. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 82 pp.

Fournier LA, Di Stefano JF (2004) Variaciones climáticas entre 1988 y 2001, y sus posibles efectos sobre la fenología de varias especies leñosas y el manejo de un cafetal con sombra en Ciudad Colón de Mora, Costa Rica. *Agron. Costaric.* 28: 101-120.

García E (1973) *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Universidad Nacional Autónoma de México. 246 pp.

García E, Hernández ME, Cardoso MD (1983) Las gráficas ombrotérmicas y los regímenes pluviométricos de la República Mexicana. En Orellana LR, Vidal ZR (Eds.) *2005 Enriqueta García Antología*. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. / Instituto de Geografía, UNAM, México. pp 349-358.

Gay C (Comp.; 2000) *México: Una Visión hacia el Siglo XXI. El Cambio Climático en México. Resultados de los Estudios de Vulnerabilidad del País Coordinados por el Instituto Nacional de Ecología y el Apoyo del U.S. Country Studies Program*. SEMARNAP / UNAM / USCSP. México. 220 pp.

Gay C, Estrada F, Conde C, Eakin H, Villers L (2006) Potential impacts of climate change on agriculture: A case study of coffee production in Veracruz, México. *Clim. Change* 79: 259-288.

Gay C, Conde C, Villers L, Trejo I, Hernández J, Ferrer RM, Monterroso A, Sánchez O, Rosales G, Briones F (2007) *Tercera Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México. 41 pp.

González J (1978) *Datos Climáticos de Zonas Cafetaleras de la República Mexicana*. Departamento de Climatología. Campo Gárnica. México.

IPCC-WGI (2007) Summary for Policymakers. En Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (Eds.) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assess-*

- ment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, RU. 996 pp.
- Lieth H (1974) *Phenology and Seasonality Modeling*. Springer. Nueva York, EEUU. 444 pp.
- Manabe S, Stouffer RJ, Spelman MJ, Bryan K (1991) Transient response of a coupled ocean-atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO₂. Part I: annual-mean response. *J. Clim.* 4: 785-818.
- Meier U (2001) *Estadios de las Plantas Mono- y Dicotyledóneas*. Centro Federal de Investigaciones Biológicas para Agricultura y Silvicultura. Trad. González Medina, Guerra JA, Bleiholder H. Alemania 149 pp.
- Montenegro G, Ginocchio R (1999) La fenología y su expresión a través de crecimiento modular en las plantas leñosas perennes. En Orellana R, Escamilla JA, Larqué-Saavedra A (Eds.) *Ecofisiología Vegetal u Conservación de Recursos Genéticos*. Centro de Investigación Científica de Yucatán. México. pp 13-33.
- Mosiño AP, García E (1966) Evaluación de la sequía intraestival en la República Mexicana. En Orellana LR, Vidal ZR (Eds.) *2005 Enriqueta García Antología*. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. / Instituto de Geografía, UNAM, México. 59-74.
- Nolasco M (1985) *Café y Sociedad en México*. CECODES. México. 454 pp.
- OMM (2001) La Meteorología y la Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la desertización. *Bol. Org. Meteorol. Mund.* 50: 119-127.
- Orellana LR, Espadas C, González IJA (2002) Aplicaciones de los diagramas ombrotérmicos de Gausson modificados en la Península de Yucatán. En Sánchez CA (Ed.) *México en su Unidad y Diversidad Territorial*. Tomo I. INEGI. México. pp.60-68.
- Rosenzweig C, Casassa G, Karoly DJ, Imeson A, Liu C, Menzel A, Rawlins S, Root TL, Seguin B, Tryjanowski P (2007) Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. En Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (Eds.) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, UK. pp. 79-131.
- Schwartz MD (2003) Basic concepts and background. En Schwartz MD (Ed.) *Phenology: An Integrative Environmental Science*. Kluwer. Dordrecht, Holanda. Pp. 4-25.
- Trejo I, Hernández J, Villers L (2007) Afectación de las comunidades vegetales de México ante el cambio climático. En *XI Encuentro de Geógrafos de América Latina. Geopolítica, globalización y cambio ambiental: retos para el desarrollo Latinoamericano*. Bogotá, Colombia. 15 pp.

IMPACTS OF CLIMATIC CHANGE ON COFFEE FLOWERING AND FRUIT DEVELOPMENT IN VERACRUZ, MÉXICO

Lourdes Villers, Nancy Arizpe, Roger Orellana, Cecilia Conde and Josefina Hernández

SUMMARY

The region of Huatusco, in Veracruz, Mexico, is an area of high coffee production. Coffee trees are sensitive to temperature and precipitation variations. Those climatic elements are related to the altitude, aspect and slope in the agroecological shadow system. A baseline climatic scenario was introduced on ombrothermic diagrams to relate the periods in which the reproductive phases of the coffee tree develops with the climatology of the region. This method was developed in order to achieve a better knowledge of the possible impacts of climate change on the flowering and fruit development in the species Coffea arabica and C. Canephora. Increases of temperature and changes in precipitation were obtained using the outputs of

two general circulation models, and applied to the basic ombrothermic diagram, in order to measure the possible impacts on the stated reproductive phases. According to those two climate change scenarios, important differences in regional climatology can be projected, and therefore strong impacts were detected: changes of the beginning of flowering which is related to the mean rainfall, and the extent of the preestival drought during the winter months. Also, climatic change could impact the water availability during the fruit growing period, which is related the modifications in water surplus and to the increase of the intraestival drought during the rainy season of the year.

IMPACTOS DA MUDANÇA CLIMÁTICA NA FLORAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO FRUTO DO CAFÉ EM VERACRUZ, MÉXICO

Lourdes Villers, Nancy Arizpe, Roger Orellana, Cecilia Conde e Josefina Hernández

RESUMO

A região de Huatusco, Veracruz, é uma área de alta produção de café no México. A temperatura e a precipitação são elementos climáticos aos quais o cafeeiro é sensível. Estes parâmetros estão relacionados com a altitude, orientação de ladeira e a pendente nos sistemas agroecológicos de sombra. Com a finalidade de ter um melhor conhecimento dos possíveis impactos da mudança climática sobre a floração e desenvolvimento do fruto para as espécies Coffea arabica y C. canephora, se realizou um cenário base, relacionando os períodos em que estas fases reprodutivas do cafeeiro se desenvolvem com a climatologia da região através de diagramas ombrotérmicos. Ao diagrama ombrotérmico base, foram aplicados os incrementos de temperatura e padres de mudança em

precipitação das saídas de dois modelos de mudança climática com o fim de medir, para cada modelo, os possíveis impactos nas fases reprodutivas apontadas. Segundo os dois cenários de mudança climática aplicados, podem ser provocadas diferenças importantes na climatologia regional e, por tanto, fortes impactos, alterando o início da floração que está relacionado com a média de chuva mensal e a amplitude do veranico que se apresenta durante os meses de inverno. Da mesma forma, a mudança climática impactaria sobre as variações na disponibilidade de água durante o crescimento do fruto, relacionadas principalmente a modificações no superávit hídrico e o incremento de veranicos que se apresentam durante a estação chuvosa.