

VULNERABILIDAD DE LA PRODUCCIÓN DEL CAFÉ (*Coffea arabica* L.) AL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

Vulnerability of Coffee Production (*Coffea arabica* L.) to Global Climate Change

María del Rayo Rivera Silva^{1‡}, Iourii Nikolskii Gavrillov¹, Marcial Castillo Álvarez²,
Víctor Manuel Ordaz Chaparro¹, Gabriel Díaz Padilla³ y Rafael Alberto Guajardo Panes³

RESUMEN

La variabilidad del clima es el principal factor responsable de las oscilaciones anuales de la producción de café. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la vulnerabilidad de la producción del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en la zona centro del estado de Veracruz, como una de las zonas productoras más importantes, atribuible a los escenarios climáticos existentes a mediados del siglo XXI, utilizando un modelo de desarrollo del cultivo en función de las características biológicas del café y las condiciones climáticas. Este tipo de modelo se aplica actualmente en varios países del mundo (pero no en México) y tiene preferencia en comparación con los modelos de regresión o modelos empíricos utilizados ampliamente en años pasados, debido a que considera detalladamente las particularidades fisiológicas del cultivo. El cálculo de los rendimientos de café con el modelo para las condiciones climáticas a inicios del siglo XXI y su comparación con los datos reportados por la SAGARPA señalan que los rendimientos calculados son confiables ya que el coeficiente de correlación entre los rendimientos calculados y observados fue igual a 0.81. La estimación de la vulnerabilidad del cultivo de café al cambio climático señala que a mediados del siglo XXI existe el riesgo de la pérdida media de la producción de café (*Coffea arabica* L.) de 7 a 10% debido principalmente a la disminución de la precipitación. El factor del cambio de la temperatura del aire tiene menor importancia.

Tal conclusión contradice a los resultados de los trabajos anteriores, basados en modelos de regresión o modelos empíricos de acuerdo con los cuales la vulnerabilidad de café al cambio climático está relacionada principalmente al cambio de temperatura y en menor grado con los cambios de la precipitación.

Palabras clave: *café, rendimiento, modelo teórico, escenarios climáticos.*

SUMMARY

Variability of climatic conditions is the main factor responsible for the annual oscillations of coffee production. Therefore, the present study was conducted to assess vulnerability of coffee (*Coffea arabica* L.) production to existing climate scenarios for the middle of XXI century in central Veracruz State, one of the most important coffee producing regions, using a model of crop development in terms of biological and climatic characteristics. This type of model is currently applied in several countries (but not in Mexico) and is preferred over the regression model or empirical models widely used in past years, because it considers the physiological particularities of the plant. The calculation of coffee yields with the model for the climatic conditions of the beginning of XXI century and its comparison with the data reported by the SAGARPA shows that the calculated yields are reliable since the correlation coefficient between calculated and observed data was 0.81. Assessment of vulnerability of coffee to climate change shows that there is a risk of a 7 to 10% loss in coffee production at the middle of XXI century principally due to decreased precipitation. The factor of change in air temperature is less important. This conclusion contradicts the results of previous studies based on the regression models or empirical models according to which vulnerability of coffee bean productivity to climate change is mainly related to temperature change and to a lesser degree to precipitation change.

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México.

[‡] Autor responsable (maria.rs1902@gmail.com)

² Centro Regional Universitario del Sureste. Carretera Teapa-Vicente Guerrero Km 7. 86800 Teapa, Tabasco, México.

³ INIFAP. Carretera Xalapa-Veracruz Km 3.5, Col. Ánimas. 91190 Xalapa, Veracruz, México.

Index words: *coffee, yield, theoretical model, climate scenarios.*

INTRODUCCIÓN

El concepto de vulnerabilidad ha sido una poderosa herramienta analítica para describir estados de susceptibilidad a daños, la marginalidad de sistemas tanto físicos como sociales y para guiar el análisis normativo de acciones para mejorar el bienestar a través de la reducción del riesgo (Adger, 2006). La vulnerabilidad se centra en la investigación del cambio climático, así como lo relacionado con los desastres naturales y gestión de desastres, ecología, salud pública, pobreza y desarrollo social (Füssel, 2007). La vulnerabilidad regional revela los efectos diferenciales del clima sobre la sociedad, por ello es imperativo el estudio de las causas y la distribución de los impactos del cambio climático en los sistemas agroproductivos a partir de considerar la compleja interacción de los factores ambientales, sociales, económicos y políticos involucrados en cada región o área geográfica (Torres *et al.*, 2011).

La producción de café en México es una de las actividades más rentables, con mayor valor comercial para la industria. El café se cultiva en una superficie total de 760 000 ha distribuida en 12 estados de la República Mexicana (López *et al.*, 2007).

El cambio climático que se espera en el transcurso del siglo XXI puede afectar la productividad de diferentes cultivos agrícolas, incluyendo el café. Camargo (2010), menciona que la variación anual de la producción de café está relacionada principalmente con la variación climática, debido a que los factores climáticos afectan el desarrollo de las fases fenológicas del cultivo. Por ejemplo, el proceso de la fotosíntesis se limita cuando se produce el estrés hídrico, debido al cierre de estomas y a la reducción de actividades fisiológicas de la planta. Otro factor climático que puede reducir la productividad son las temperaturas extremas del aire, menores a 4 °C ocasionan el amarillamiento de las hojas y muerte de tejidos y brotes, mientras que temperaturas mayores a 30 °C reducen la fotosíntesis y provocan abortación de flores (Pérez y Geissert, 2006), lo que resulta finalmente en una pérdida de la cosecha. Villers *et al.* (2009) evaluaron el impacto del cambio climático sobre la floración y desarrollo del fruto de la planta de café (*Coffea arabica* L.) en la región de Huatusco, Veracruz, como resultado se obtuvo que el cambio de temperatura del aire puede alterar el inicio de la floración

y el cambio de las variaciones en la disponibilidad de agua durante el crecimiento del fruto, afectando significativamente el rendimiento de café. Gay *et al.* (2004) aplicaron un modelo empírico econométrico para explorar la relación entre la producción de café en función de las variables climáticas y económicas en el estado de Veracruz y estimar el impacto potencial del cambio climático sobre este cultivo. Como resultado, concluyeron que a mitad del siglo XXI se espera una reducción de entre 22 y 27% de la productividad de café debido al incremento de la temperatura y la reducción de la precipitación. Schroth *et al.* (2009) utilizaron el programa Maxent basado en el modelado del hábitat de las especies, el cual toma en cuenta como entrada un conjunto de variables ambientales y ubicaciones georeferenciadas, este programa es considerado muy preciso para la predicción de cambios adecuados en las variedades de especies de crecimiento. Los resultados obtenidos predicen una fuerte disminución en el hábitat para el cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en la Sierra Madre de Chiapas para el año 2050.

De acuerdo con un estudio realizado en Nicaragua, El Salvador, Guatemala y México, el efecto de los cambios en el clima podría ser severo; para el año 2050 las fincas cafetaleras de estos países pueden perder entre el 20 y 81% de su producción actual (ASIC, 2012). Estudios en Brasil muestran que para los años 2020, 2050 y 2070 el cultivo de café (*Coffea arabica* L.) sufrirá una importante redistribución geográfica, perdiendo hasta un 33% de la superficie actual (Hagggar y Schepp, 2012). Los estudios sobre el impacto del cambio climático en la producción de café en Kenia para el año 2050 revelan que las zonas con altitudes alrededor de 1200 m sufrirán disminución en la producción de café, debido a la disminución de la precipitación del mes más seco y el incremento de la temperatura mínima del mes más frío (Hagggar y Schepp, 2011).

Para estimar el impacto potencial del cambio climático sobre la producción de café se utilizan diferentes modelos matemáticos basados en:

- 1) La relación de ecuaciones de regresión entre algunos factores climáticos y desarrollo del cultivo o su rendimiento. Estos modelos se conocen como modelos de regresión (Lin *et al.*, 2008; Paavola, 2008; FONTAGRO, 2010; ASIC, 2012; Hagggar and Schepp, 2011 y 2012; Laderach *et al.*, 2011).
- 2) Las relaciones empíricas sobre la dependencia de la productividad de café en función de los factores climáticos, económicos y aún los factores colaterales

como tipo de plagas y enfermedades dependientes del cambio de las condiciones climáticas (Gay *et al.*, 2004; Jaramillo *et al.*, 2011). Estos modelos también se basan en el tratamiento estadístico previo de los datos empíricos acumulados en el pasado. Tales modelos se llaman empíricos.

3) Simulación teórica de desarrollo del cultivo en función de sus características biológicas y las características climáticas de la región de estudio. Estos tipos de modelos se llaman modelos teóricos y tienen preferencia en comparación con los modelos de regresión o modelos empíricos, debido a que consideran detalladamente las particularidades fisiológicas del cultivo y su respuesta al cambio climático. Los modelos teóricos se están aplicando actualmente en varios países del mundo (FAO, 2008; Davis *et al.*, 2012; Bunn *et al.*, 2013).

El modelo teórico propuesto por la FAO-IIASA (2000) es uno de los más usados actualmente en el mundo. Con este modelo estimaron la vulnerabilidad de café al cambio climático, incluyendo la especie *Coffea arabica* L., en los países de África y Asia principalmente (FAO, 2008; Davis *et al.*, 2012; Bunn *et al.*, 2013). En México este modelo fue aplicado para otros cultivos: maíz, trigo y frijol y no ha sido aplicado para el cultivo de café. La estimación del impacto del cambio climático sobre la productividad de café en México se ha hecho solamente con los modelos de regresión (Lin *et al.*, 2008; ASIC, 2012; Laderach *et al.*, 2011;) o empíricos (Gay *et al.*, 2004; Jaramillo *et al.*, 2011).

Por eso el objetivo del presente trabajo fue evaluar la vulnerabilidad de la producción del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en la zona centro del estado de Veracruz a mediados del siglo XXI, utilizando el modelo teórico de la FAO-IIASA (2000) sobre el desarrollo del cultivo de café en función de sus características biológicas y las condiciones climáticas esperadas a mitad del siglo XXI.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se llevó a cabo en la zona centro del estado de Veracruz conformada por las regiones cafetaleras de Atzalan, Misantla, Coatepec, Huatusco, Córdoba y Tezonapa. En esta zona se concentra el 90% de los productores y el 93% del total de la superficie cafetalera de la entidad; conformando así, la principal zona compacta productora de café en el país (López *et al.*, 2007). Las regiones cafetaleras estuvieron conformadas por 47 sitios de referencia, ubicados entre

las latitudes de 18° 36' a 20° 4' y altitudes que van desde los 600 a 1500 m. Para cada sitio de referencia existen datos meteorológicos registrados en las estaciones ubicadas dentro de cada uno de los sitios. En esta región existen condiciones climáticas diferentes: lluvioso tropical, seco y templado seco. Precipitación promedio anual de 1717.3 mm, temperatura media anual de 20.2 °C. La radiación global promedio anual fue estimada con el modelo de Hargreaves propuesto por Allen *et al.* (2006) con un valor promedio de 5285.6 MJ m² año⁻¹.

Para la realización de este trabajo se utilizaron los escenarios climáticos A2, A1B, B1 que describen las relaciones entre las principales fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas que determinan las emisiones futuras de los gases de efecto invernadero y el escenario COMMITTED (COM), el cual corresponde al escenario idealizado en que todos los países cumplen con las cuotas de gases de efecto invernadero bajo el protocolo de Kyoto; todos estos escenarios desarrollados para las regiones cafetaleras del estado de Veracruz en diferentes concentraciones de CO₂ en la atmósfera esperadas para el año 2050 (de 473 a 536 ppm en comparación con la concentración actual de 390 ppm) (INE, 2010). Los escenarios climáticos utilizados fueron datos anuales de promedios mensuales de temperatura y precipitación a mitad del siglo XXI (2050).

Los rendimientos del cultivo de café se calcularon para principios y mediados del siglo XXI, utilizando la ecuación propuesta por la FAO-IIASA (2000):

$$Y_{\text{cal}}^j = Y_{\text{máx}}^j * \text{ISNH}^j \quad (1)$$

donde: Y_{cal}^j es la productividad agrícola del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) (en kg ha⁻¹ año⁻¹ de café cereza) en los sitios de referencia para las condiciones climáticas promedio anuales típicas, los períodos marcados con el superíndice j; j = 2000 corresponden a inicios del siglo XXI y j = 2050 a los escenarios climáticos estimados a mediados del siglo XXI; $Y_{\text{máx}}^j$ es el rendimiento potencial máximo del mismo cultivo (en kg ha⁻¹ año⁻¹) que depende de los valores mensuales de temperatura del aire y de radiación fotosintéticamente activa, así como las características fisiológicas del cultivo; ISNH^j es el índice de satisfacción de las necesidades hídricas (adimensional, varía de 0 a 1). Este índice caracteriza la disponibilidad de agua en el suelo para el cultivo durante su crecimiento, y depende

de la relación entre los valores mensuales de precipitación y la evapotranspiración potencial.

Los cálculos de la productividad de café promedio anual a inicios del siglo XXI ($j = 2000$) se realizaron para verificar la correlación entre los rendimientos calculados con los rendimientos observados. Para calcular los rendimientos Y^{2000} se utilizaron valores promedios de temperatura y precipitación del periodo 1980-2010 (SMN, 2012). Para pronosticar los rendimientos Y^{2050} del año 2050 se utilizaron los escenarios de cambio climático mencionados anteriormente.

Los cálculos del rendimiento máximo potencial se basan en principios ecofisiológicos en particular y consideran la cantidad total de biomasa neta (Bn) producida por un cultivo y un índice de cosecha (IC), que es la fracción de Bn correspondiente al producto agrícola:

$$Y_{\text{máx}}^j = Bn * IC \quad (2)$$

donde: $Y_{\text{máx}}^j$ Bn se expresan en (en $\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ de café cereza); $j = 2000$ o 2050 ; IC es adimensional y varía de 0 a 1.

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

$$Bn = \frac{0.36 b_{\text{gm}} L}{\left(\frac{1}{n}\right) + 0.25 C_t} \quad (3)$$

dónde: b_{gm} es la tasa máxima de producción de biomasa bruta de un cultivo de referencia con el índice de área foliar (IAF) igual a 5 (en $\text{kg ha}^{-1} \text{día}^{-1}$); b_{gm} depende principalmente de la concentración de CO_2 en la atmósfera y de la radiación fotosintéticamente activa; n es la duración del ciclo normal del cultivo de café (*Coffea arabica* L.). Según los datos de FAO-IIASA (2000) $n = 270$ días. La metodología de la FAO-IIASA asume que la radiación fotosintéticamente activa es aproximadamente la mitad de la radiación global; C_t es la fracción de la tasa de producción de biomasa bruta que se pierde en el proceso de respiración de mantenimiento (energía utilizada para renovación de

los componentes celulares), la cual depende de tipo de cultivo y de la temperatura media del aire ($\text{kg ha}^{-1} \text{día}^{-1}$); L es la fracción de la tasa máxima de crecimiento del cultivo, por cobertura incompleta del terreno cuando el IAF es menos de 5 (adimensional).

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

$$b_{\text{gm}} = N (0.8 + 0.01 P_m) b_o + (1 - N) (0.5 + 0.025 P_m) b_c \quad (4)$$

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

$$b_{\text{gm}} = N(0.5 + 0.025 P_m) b_o + (1 - N) 0.05 P_m b_c \quad (5)$$

donde: b_o o b_c : tasas brutas de producción de materia seca para un cultivo de referencia hipotético ($\text{kg CH}_2\text{O por ha}^{-1} \text{h}^{-1}$) en días completamente nublados y días completamente despejados, respectivamente, con dosel cubriendo completamente el terreno y una tasa máxima de producción de biomasa de $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$; y N : parámetro adimensional dependiente de la radiación fotosintéticamente activa teórica o potencial diaria con el cielo totalmente despejado A_c ($\text{MJ m}^{-2} \text{día}^{-1}$) y de la radiación global de onda corta R_g ($\text{MJ m}^{-2} \text{día}^{-1}$), calculado con la Ecuación (6):

$$N = \frac{A_c - 0.5 R_g}{0.8 A_c} \quad (6)$$

La estimación se realizó utilizando la información bibliográfica sobre IC, IAF, ruta fotosintética de FAO-IIASA (2000). P_m , b_o , b_c fueron obtenidos de la publicación De Wit (1966), así como datos regionales sobre inicio y duración del ciclo del cultivo de café en México. Para calcular se consideró que según las publicaciones de Cure y Acock (1986) y Anthony y Ziska (2000) el IC prácticamente no depende del cambio climático. Además fue supuesto que ni el IAF, ni la duración del ciclo del cultivo (n) cambian significativamente durante el periodo de 2000 a 2050, es decir que la fenología del cultivo de café no debería afectarse notablemente en función de los escenarios del cambio climático.

Los valores del índice hídrico ISNH se han calculado con la ecuación basada en el balance de agua en la zona radical propuesta por Frére y Popov (1986):

$$ISNH_i^j = ISNH_{i-1}^j \left(\frac{DEF_i^j}{\sum_{i=1}^m NH^j} \right) \quad (7)$$

dónde: $ISNH_i^j$ es el índice de satisfacción de las necesidades hídricas del mes i en el año j ; $ISNH_{i-1}^j$ es el valor del índice en el mes anterior en el mismo año; DEF_i^j es el valor absoluto de la deficiencia de humedad en el mes i del año j ; $\sum_{i=1}^m NH^j$ es la suma de las necesidades hídricas de todo el ciclo del cultivo en el año j con la duración igual a la suma de meses i igual a m , en el periodo del 15 de febrero al 15 de noviembre, en el cual la planta tiene su producción de biomasa (FAO-IIASA, 2000).

Cabe mencionar que los valores de $ISNH$ y DEF consideran la evapotranspiración potencial. Cuando el cafetal se encuentra bajo sombra es necesario considerar el efecto de reducción de la evapotranspiración. Para verificar el efecto de la sombra se realizaron los cálculos preliminares de la evapotranspiración utilizando los datos bibliográficos sobre distribución de la radiación neta dentro o debajo de la copa de los árboles (Chang, 2001), así como las observaciones experimentales sobre el cambio del microclima y de la productividad de café en el caso de la sombra (Siles, Harmand y Vaast, 2010). Considerando que el objetivo principal de los cálculos es estimar el cambio relativo del rendimiento a mitad del siglo XXI (Y^{2050}) como una fracción del rendimiento al inicio de este siglo (Y^{2000}), fue necesario estimar los valores relativos de $ISNH$ y DEF : $ISNH^{2050}/ISNH^{2000}$ y DEF^{2050}/DEF^{2000} . Por esta razón se concluyó que se puede ignorar el efecto de la sombra si asumimos que la arquitectura de la vegetación no va cambiar significativamente en el tiempo.

Finalmente se estimaron los cambios relativos de los rendimientos del cultivo de café a mediados del siglo XXI ($Y_{\downarrow(cal)}^{\uparrow 2050}$) en comparación con la productividad actual ($Y_{\downarrow(cal)}^{\uparrow 2000}$):

$$\frac{Y_{cal}^{2050} - Y_{cal}^{2000}}{Y_{cal}^{2000}} = \frac{Y_{cal}^{2050}}{Y_{cal}^{2000}} - 1 = \frac{Y_{m\acute{a}x}^{2050}}{Y_{m\acute{a}x}^{2000}} \frac{ISNH^{2050}}{ISNH^{2000}} - 1 \quad (8)$$

Los rendimientos calculados con la fórmula (1) corresponden al caso de altos insumos, ignorando riesgo de pérdida de cosecha por plagas y enfermedades o por los casos extremos del clima de tipo de heladas

o huracanes. Sin embargo, considerando que el objetivo del trabajo es evaluar el cambio relativo de los rendimientos con la fórmula (8), se supone que se puede aceptar el enfoque aplicado en el presente trabajo en el caso donde el nivel de los insumos no va a cambiar significativamente a mitad del siglo XXI en comparación con su inicio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para verificar la confiabilidad de los cálculos de rendimiento, se consideraron los rendimientos medios reales de café Y_{real}^{2000} (en $kg\ ha^{-1}a\tilde{no}^{-1}$ de granos crudos de café) producidos en un periodo de siete años (2003-2010) en los municipios que conforman la zona centro del estado de Veracruz (SIAP, 2011), comparados con los rendimientos Y_{calc}^{2000} calculados considerando información meteorológica actual sobre temperatura y precipitación (Figura 1).

Los valores de los rendimientos en la Figura 1 son adimensionales, presentados como fracción de los rendimientos máximos observados ($Y_{real}^{m\acute{a}x,2000}$) o calculados ($Y_{calc}^{m\acute{a}x,2000}$). El valor $Y_{real}^{m\acute{a}x,2000} = 2146.5\ kg\ ha^{-1}a\tilde{no}^{-1}$ de café cereza, fue obtenido como el rendimiento promedio anual observado en el período del 2003 al 2010 entre los sitios de referencia analizados en el estado de Veracruz. El valor $Y_{calc}^{m\acute{a}x,2000} = 2135.6\ kg\ ha^{-1}a\tilde{no}^{-1}$, es el rendimiento máximo entre los rendimientos calculados para cada uno de los sitios de referencia con los datos meteorológicos disponibles promedio anuales a principios del siglo XXI.

El tratamiento estadístico de la relación entre y y en la Figura 1 se realizó con el programa CurvExpert (Hyams, 1997) lo que permitió obtener la siguiente ecuación lineal:

$$\frac{Y_{real}}{Y_{real}^{m\acute{a}x,2000}} = 0.2478 + 0.7368 \frac{Y_{calc}}{Y_{real}^{m\acute{a}x,2000}} \quad (9)$$

Se obtuvo un coeficiente de correlación 0.819 ($P = 0.000$) y error estándar de estimación $S_{xy} = 0.0361$; al realizar el análisis de regresión se obtuvo que el porcentaje de la variabilidad total del rendimiento máximo calculado y el rendimiento real máximo es explicada por el modelo en un 67% ($r^2 = 0.67$). Empleando un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$) al compararlo con el valor $P = 3.6 \times 10^{-12}$ de la regresión nos permite concluir que el modelo tiene una relación lineal simple entre

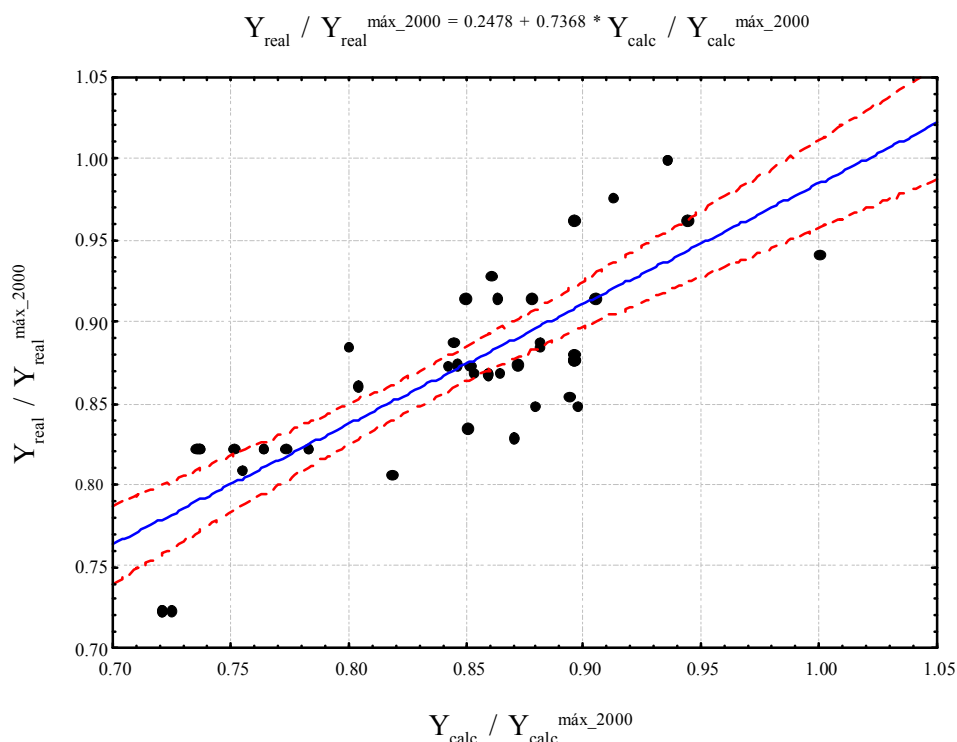


Figura 1. Comparación de los rendimientos del cultivo de café calculados ($Y_{\text{calc}}/Y_{\text{calc}}^{\text{máx}_2000}$) y reales ($Y_{\text{real}}/Y_{\text{real}}^{\text{máx}_2000}$) en municipios de la zona centro del estado de Veracruz. La recta se describió con la Ecuación (9).

los valores de rendimiento máximo calculado y los valores de rendimiento real máximo y que el 33% de las variaciones no puede ser explicada a través del modelo de regresión.

De acuerdo con los escenarios climáticos mencionados anteriormente a mitad del siglo XXI en los sitios de referencia de producción de café del estado de Veracruz tales como Atzalan, Coatepec, Córdoba, Huatusco, Misantla y Tezonapa se espera incremento de la radiación global de 0.3 a 1.1% y de la temperatura del aire de 3 a 8.8% con relación a las condiciones climáticas promedio anuales a inicios de este siglo (INE, 2010). El cambio de la precipitación varía con una disminución de 7.2% y un incremento hasta 1.4% en función del escenario y el sitio de referencia.

La mayor similitud en el cambio de la temperatura se presenta entre los escenarios A2, A1B y B1. El escenario COM da menor cambio de temperatura y mayor cambio de precipitación. Según los escenarios climáticos existe incertidumbre en el cambio de la precipitación, lo que no permite comprender con claridad que va a pasar finalmente con el estrés hídrico.

Los resultados de estimación de los cambios esperados en la productividad del cultivo de café ΔY_{calc} , productividad máxima potencial $\Delta Y_{\text{máx}}$ y el índice hídrico ΔISNH a mediados del siglo XXI se presentan en el Cuadro 1.

Como se puede observar, considerando cierta variabilidad en los resultados de predicción del cambio climático, en el año 2050 en la mayoría de los sitios geográficos de referencia se espera la disminución de la producción calculada (ΔY_{calc}) de 5 a 10% debido al incremento de las temperaturas y reducción de la precipitación. En algunos sitios de referencia ubicados dentro de las regiones cafetaleras de Atzalan, Misantla, Coatepec y Huatusco se espera reducción de la productividad hasta de un 20%. Considerando cierta incertidumbre en las predicciones climáticas y en la productividad dependiente de los factores climáticos, estos resultados son un poco distintos en comparación con los datos publicados en otras investigaciones en las que utilizan modelos de regresión. Según las estimaciones realizadas con los modelos de regresión, ASIC (2012) y Laderach *et al.* (2011) predicen disminución de

Cuadro 1. Estimación de cambios en la productividad del cultivo de café ΔY_{calc} , de su productividad máxima potencial $\Delta Y_{\text{máx}}$ y del índice hídrico ΔISNH a mediados del siglo XXI según los escenarios de cambio climático A2, A1B, B1 y COM.

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

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

la productividad de café (*Coffea arabica* L.) en Veracruz de 20 a 45% a nivel del año 2050 en comparación con el inicio del siglo XXI, mientras que Lin *et al.* (2008) estiman la disminución de 10 a 20%. Gay *et al.* (2004) con base en la aplicación de un modelo empírico predicen la disminución de la misma especie de café en Veracruz de 22 a 27% para el año 2050.

Los escenarios A1B y COM causan mayor incremento en la temperatura del aire y disminución de la precipitación, resultando con mayor porcentaje en la disminución del rendimiento calculado (ΔY_{calc}). En estos escenarios se espera mayor disminución del índice de satisfacción de las necesidades hídricas (ΔISNH) debido al crecimiento de la tasa de evapotranspiración y decremento de la precipitación. Existe cierta congruencia entre el cambio esperado en los rendimientos máximos ($\Delta Y_{\text{máx}}$) y los rendimientos finales (ΔY_{calc}) lo que se explica principalmente por el impacto del incremento en la temperatura del aire sobre el proceso de fotosíntesis.

El análisis de los resultados señala que el factor principal climático que puede afectar la productividad del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) es la disminución esperada de la precipitación. El café se cultiva en lugares con una precipitación que varía desde los 750 mm anuales ($7.500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) hasta 3000 mm ($30.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). La aportación del cambio del índice de satisfacción de las necesidades hídricas (ΔISNH) al cambio de la productividad calculada (ΔY_{calc}) se estima a nivel de 65% en promedio, mientras que el papel del incremento de la temperatura se estima del orden de 35%. Esta observación coincide con los resultados del trabajo de Laderach *et al.* (2011) donde el papel de la disminución de la precipitación (principalmente durante invierno y primavera) en relación a la reducción de la productividad

de café se estima del orden de 75-90% y contradice a la opinión de Gay *et al.* (2004) quienes aplicaron un modelo empírico y concluyeron que la aportación principal a la reducción de la productividad de esta variedad de café, estimada a nivel de 75-90%, es el crecimiento esperado de la temperatura; mientras que el papel de disminución de la precipitación fluctúa de 10 a 25%, es decir que a nivel promedio anual en algunos sitios de referencia del estado Veracruz a mitad del siglo XXI se espera una reducción de la precipitación de 100 a 400 mm por año.

La aplicación del modelo teórico de desarrollo del cultivo de café en función de sus características biológicas, permitió precisar la estimación de vulnerabilidad de este cultivo a los escenarios existentes del cambio climático en el estado Veracruz y aclarar que el factor climático responsable por la alteración de los rendimientos es la precipitación.

CONCLUSIONES

- El modelo teórico de desarrollo del cultivo es viable para predecir la vulnerabilidad del rendimiento del cultivo de café (*Coffea arabica* L.), ya que los rendimientos calculados con dicho modelo a principios del siglo XXI, tienen un coeficiente de correlación de 81% comparados con los rendimientos registrados en el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Este modelo puede ser utilizado como herramienta para predecir la vulnerabilidad de la productividad de café ante los escenarios de cambio climático.
- Para el año 2050 en la zona centro del estado de Veracruz se estima una pérdida media de la producción de café (*Coffea arabica* L.) de 7 a 10% debido

principalmente a la disminución de la precipitación y con menor grado al incremento de la temperatura del aire. Al cambio de la tasa de precipitación le corresponde alrededor de 65% en la pérdida esperada de cosecha, mientras que el papel del incremento de la temperatura es del orden de 35%.

LITERATURA CITADA

- Adger, W. N. 2006. Vulnerability. *Global Environ. Change* 16: 268-281. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006.
- Allen, G. R., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje. Roma, Italia.
- Anthony, E. H. and L. H. Ziska. 2000. Crop breeding strategies for the 21st century. pp. 407-423. *In*: K. R. Reddy and H. F. Hodges (eds.). *Climate change and global crop productivity*. CABI. New York, NY, USA.
- ASIC (Association for Science and Information on Coffee). 2012. 24th International Conference on Coffee Science. November 11-16, 2012. Association for Science and Information on Coffee (ASIC). San José, Costa Rica.
- Bunn, C., O. Ovalle-Rivera, P. Laderach, A. Mosnier, M. Obersteiner, and D. Kirschke. 2013. The utility of an agroecological niche model of coffee production for future change scenarios. *Impacts World 2013*, International Conference on Climate Change Effects. May 27-30. Potsdam, Brandenburg, Germany.
- Camargo, M. B. P. 2010. The impact of climatic variability and climate change on *Arabica Coffee* crop in Brazil. *Bragantia* 69: 239-247.
- Chang, J. H. 2001. *Climate and agriculture: an ecological survey*. Transaction Publishing. Chicago, IL, USA.
- Cure, J. D. and B. Acock. 1986. Crop responses to carbon dioxide doubling: A literature survey. *Agric. Forest Meteorol.* 38: 127-145.
- Davis, A. P., T. W. Gole, S. Baena, and J. Moat. 2012. The impact of climate change on Indigenous Arabica coffee (*Coffea arabica*): Predicting future trends and identifying priorities. *PLoS ONE* 7: e47981. doi:10.1371/journal.pone.0047981. (Consulta: junio 15, 2012).
- De Wit, C. T. 1966. Photosynthesis of leaf canopies. *Agric. Res. Rep.* 663: 1-56.
- FAO (Fao and Agriculture Organization of the United States). 2008. Climate change adaptation and mitigation in the food and agriculture sector. Technical background document. (<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/meeting/013/ai782e.pdf>). Rome. Italy.
- FAO-IIASA (Fao and Agriculture Organization of the United States-International Institute for Applied Systems Analysis). 2000. Global Agroecological Zones. Methodology and results of the Global Agro-Ecological Zones Model. Food and Agriculture Organization (en línea) Versión: 1.0. <http://www.fao.org>. (Consulta: junio 15, 2012).
- FONTAGRO (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria). 2010. Sensibilidad y adaptación del café al cambio climático en Centroamérica (CAFADAPT). Publ. Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (FONTAGRO). San José, Costa Rica.
- Frère, M. y G. F. Popov. 1986. Pronóstico agrometeorológico del rendimiento de los cultivos. FAO. Roma, Italia.
- Füssel, H.-M. 2007. Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environ. Change* 17: 155-167.
- Gay, C., F. Estrada, C. Conde y H. Eakin. 2004. Impactos potenciales del cambio climático en la agricultura: escenarios de producción de café para el 2050 en Veracruz (México). pp. 651-660. *In*: J. C. García Codron, D. C. Liaño, F. P. de Arróyabe Hernández, G. C. Pedraja y R. D. Álvarez (eds.). *El Clima entre el mar y la montaña*. Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria. Santander. España.
- Haggar, J. and K. Schepp. 2011. Coffee and climate change desk study. Impacts of climate change in the pilot country Tanzania. Coffee production and climate change. Initiatives for adaptation. Publ. University of Greenwich. UK.
- Haggar, J. and K. Schepp. 2012. Coffee and climate change. Impacts and options for adaption in Brazil, Guatemala, Tanzania and Vietnam. NRI working paper series: Climate change, agriculture and natural resources, No. 4, Publ. University of Greenwich. UK.
- Hyams, D. 1997. A curve fitting system for windows (computer programme). Version 1.34. Microsoft Corp. San Francisco, CA, USA.
- INE (Instituto Nacional de Ecología). 2010. Manual de uso del Sistema de Información de Escenarios de Cambio Climático Regionalizados (SIECCR). <http://zimbra.ine.gob.mx/escenarios/>(Consulta: diciembre 12, 2011).
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). 2012. Estadísticas climáticas. Laboratorio de agromapas digitales (LADIGS). www.agromapas.inifap.gob.mx (Consulta: septiembre 20, 2012).
- Jaramillo, J., E. Muchugu, F. E. Vega, A. Davis, Ch. Borgemeister, and A. Chabi-Olaye. 2011. The influence and implications of climate change on coffee berry borer and coffee production in East Africa. *PLOS ONE*, 6(9): e24528. doi:10.1371/journal.pone.0024528.
- Laderach, P., M. Lundy, A. Jarvis, J. Ramirez, E. Perez Portilla, K. Schepp, and A. Eitzinger. 2011. Predicted impact of climate change on coffee-supply chains. pp. 703-723. *In*: W. L. Filo (ed.). *The economic, social and political elements of climate change*. Springer-Verlag. Berlig, Heidelberg, Germany.
- Lin, B. B., I. Perfecto, and J. Vandermeer. 2008. Synergies between agricultural intensification and climate change could create surprising vulnerabilities for crops. *BioScience* 58: 847-854.
- López, M. R., P. G. Díaz y R. J. Martínez. 2007. Potencial productivo y tipología de productores de café en la zona centro del estado de Veracruz. INIFAP. México, D. F.
- Paavola, J. 2008. Livelihoods, vulnerability and adaptation to climate change in Morogoro, Tanzania. *Environ. Sci. Pol.* 11: 642-654.
- Pérez P., E. y D. Geissert K. 2006. Zonificación agroecológica de sistemas agroforestales: el caso café (*Coffea arabica* L.) - Palma Camedor (*Chamaedorea elegans* Mart.). *Inerciencia* 31: 556-562.

- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2011. Proyecciones para el sector agropecuario en México. SAGARPA, México. <http://www.siap.gob.mx/> (Consulta: abril 5, 2012).
- Siles, P., J. M. Harmand, and P. Vaast. 2010. Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. *Agroforest. Syst.* 78: 269-286.
- Schroth, G., P. Laderach, J. Dempewolf, S. Philpott, J. Haggard, 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.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2012. Normales climatológicas. Publ. Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/> (Consulta: octubre 27, 2012).
- Torres L., P., J. G. Cruz C. y R. Acosta B. 2011. Vulnerabilidad agroambiental frente al cambio climático. *Agendas de adaptación y sistemas institucionales. Polít. Cult.* 36: 205-232.
- Villers, L., N. Arizpe, R. Orellana, C. Conde y J. Hernández. 2009. Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia* 34: 322-329.