

# USO DE MÉTODOS DE MONTE CARLO PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y RIESGO EN CONDICIONES ACTUALES Y BAJO CAMBIO CLIMÁTICO

Carlos GAY, Francisco ESTRADA, Cecilia CONDE, Jose Luis BRAVO.  
Grupo de Cambio climático y Radiación  
Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria,  
Del. Coyoacán, C.P. 04510 México D.F., México.

## RESUMEN

La evaluación de los impactos potenciales de cambio climático en sectores productivos se ha limitado a estimaciones puntuales que no permiten incluir la variabilidad e incertidumbre inherentes a las variables climáticas y socioeconómicas. Esto permite una apreciación muy limitada del riesgo que enfrentaría la actividad bajo condiciones de cambio climático ya proporcionan únicamente una estimación del impacto promedio. En este trabajo se ilustra el uso de métodos de Monte Carlo para aproximar la distribución de probabilidades de la producción de café y de las ganancias netas del productor promedio bajo condiciones actuales y de cambio climático tomando en cuenta la variabilidad observada de las series de clima y la incertidumbre en las variables económicas. Los resultados muestran que, de acuerdo con los escenarios construidos para el 2050, la producción de café no sólo disminuiría en hasta un 22 y un 55% sino que su variabilidad aumentaría hasta un 266%. Para el productor promedio la actividad dejaría de ser rentable y pérdidas potenciales esperadas casi seis veces mayores que en la actualidad.

Palabras clave: Métodos de Monte Carlo, cambio y variabilidad climáticos, impactos en agricultura.

## ABSTRACT

The assessment of the potential impacts of climate change in productive activities has been limited to particular estimations that do not consider the inherent variability and uncertainty of climatic and socioeconomic variables. This approach can only provide a limited evaluation of risk under climate change conditions since it accounts only for changes in mean conditions and therefore it evaluates the mean p impact. This paper shows the use of Monte Carlo methods as a means for approximating the probability density function of coffee production and the income of the average producer under different climate change scenarios which include climate variability and uncertainty in economic variables. Results show that for year 2050 coffee production could diminish between a 22 and a 55% and production variability could increase as much as 266%. For the average producer this activity will become not profitable and potential expected losses could become almost six times larger than in present conditions.

Key words: Monte Carlo method, Climatic change, climatic variability, agricultural impacts.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los métodos de Monte Carlo son una importante herramienta para la evaluación de riesgo frecuentemente utilizada en finanzas, en la valuación de proyectos y para la evaluación de riesgo a la salud humana y de ecosistemas frente a diferentes contaminantes. Estos métodos permiten encontrar soluciones probabilísticas para modelos en los que, debido a la incertidumbre y a la variabilidad de los elementos que lo conforman, una solución determinística pierde sentido ya que es sólo una posible realización de un proceso que contiene componentes aleatorios.

Para la evaluación de los impactos potenciales de cambio climático en diversos sistemas, actividades o sectores es fundamental incluir los factores de incertidumbre y la variabilidad misma del clima ya que de otra manera se estarían ignorando dos de las principales características del problema. Sin embargo, la mayor parte de los trabajos publicados sobre evaluación integrada de los impactos de cambio climático en el sector agrícola, por ejemplo, han omitido tanto la incertidumbre asociada como el efecto de la variabilidad de los factores climáticos y socioeconómicos (KAUFMANN y SNELL 1997, CHANG, 2002, entre otros), aunque algunos trabajos han intentado incluir esta última (GAY *et al.*, 2006 y 2004, CONDE *et al.*, 2005). La simulación de Monte Carlo, como herramienta para evaluar riesgo, no ha sido utilizada en la estimación de los impactos potenciales de cambio climático en sectores o actividades de interés y este trabajo provee un ejemplo de su aplicación.

En trabajos previos de los autores (GAY *et al.*, 2006 y 2004) se estimaron distintas predicciones puntuales de tipo *what-if* para distintos años usando diferentes modelos, valores y supuestos para las variables independientes. Los resultados muestran que tomando en cuenta únicamente los cambios en los valores medios de las variables climáticas, para el año 2020 se podría esperar una disminución en la producción de café en el estado de aproximadamente un 24% y de hasta un 34% al incluir la variabilidad climática. Para el 2050 las estimaciones muestran una caída de hasta el 70%, utilizando salidas de dos modelos de circulación general (ECHAM, Hadley), dos sensibilidades y el escenario de emisiones A2 (IPCC, 2001).

El objetivo de este trabajo es mostrar la aplicación de métodos de simulación de Monte Carlo para incluir tanto la incertidumbre como la variabilidad utilizando como un caso de estudio el modelo para producción de café desarrollado por GAY *et al.*, (2006), los escenarios de cambio climático producidos por algunos modelos de circulación general y bajo distintos escenarios de emisiones, y también utilizando predicciones de las variables económicas relevantes. Los resultados proveen escenarios probabilísticos de los efectos de cambio climático sobre la producción de café en el estado y sobre el ingreso asociado para el productor promedio.

## 2. MODELO PARA EL IMPACTO POTENCIAL DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ EN VERACRUZ, MÉXICO.

En GAY *et al.*, (2006) se propone un modelo estadísticamente adecuado para la producción de café en Veracruz. Después de evaluar la contribución al poder explicativo del modelo de diversas variables socioeconómicas y climáticas, se encontró que el mejor es el siguiente:

$$P_{\text{Café}} = -35965262 + 2296270(T_{\text{vera}}) - 46298.67(T_{\text{vera}})^2 + 658.01(P_{\text{prim}}) + 813976.30(T_{\text{inv}}) - 20318.27(T_{\text{inv}})^2 - 3549.71(\text{SMINVER})$$

donde  $T_{\text{vera}}$  y  $T_{\text{inv}}$  son la temperatura de verano y de invierno respectivamente,  $P_{\text{prim}}$  es la precipitación de primavera, y SMINVER es el salario mínimo real en el estado. Para el modelo se encontró que una forma funcional cuadrática para las variables de temperatura era la más adecuada, mientras que un término lineal para la precipitación resulta apropiado para modelar la relación con la producción para los niveles observados de precipitación.

Es importante tener en cuenta que las temperaturas medias observadas para ambas estaciones del año se encuentran ligeramente por encima de los valores óptimos calculados. Esto implica que cualquier aumento en dichas temperaturas provocaría una disminución en la producción de café en el estado. Graficando en tres dimensiones (Figura 1) la temperatura de verano, la de invierno y la producción (en porcentaje) en el tercer eje, obtenemos visualmente cuál sería la producción esperada (manteniendo todo lo demás constante) para cualquier combinación de las temperaturas mencionadas.

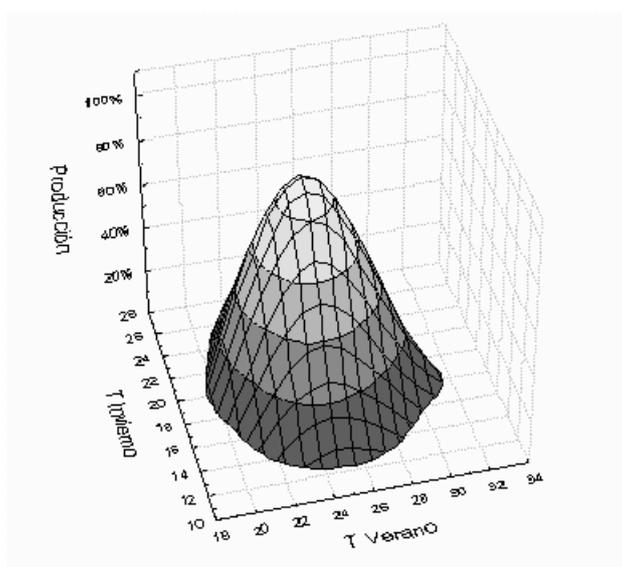


Figura 1. Efecto de cambios graduales de la temperatura de invierno sobre la producción potencial de café en Veracruz.

### 3. ESCENARIOS PROBABILÍSTICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ EN VERACRUZ E INGRESO PARA EL PRODUCTOR PROMEDIO EN EL AÑO 2050.

#### 3.1 Variabilidad intrínseca de las variables

Para estimar la variabilidad intrínseca de las variables que se desea simular es necesario distinguir el tipo de proceso y elaborar un modelo de series de tiempo estadísticamente adecuado, que considere su estructura dinámica (autocorrelación), sus componentes determinísticos y estocásticos y la distribución de probabilidades correspondiente. Es decir, se trata de inferir el *proceso generador de datos* de las variables de interés.

Para este propósito se estimaron modelos de series de tiempo para cada una de las variables independientes del modelo de producción de café. Los resultados se presentan a continuación. El mejor modelo para la temperatura de verano es un proceso estacionario alrededor de una constante y autorregresivo de orden 1 (AR(1))<sup>1</sup>. La temperatura de invierno esta formada por un proceso de tendencia estacionario, mientras que la precipitación de primavera es un proceso estacionario alrededor de una constante. En ambos casos no se encontraron componentes autorregresivos, de medias móviles o de varianza condicional autorregresiva. El mejor modelo que se encontró para la variable de salarios mínimos reales es un proceso de raíz unitaria con cambio estructural en 1976 y con observaciones atípicas en los años 1983 y 1988 que están asociados con crisis económicas. Para todos los modelos no se puede rechazar la hipótesis nula de que el componente estocástico de los modelos se distribuye de manera normal, lo que implica que la variabilidad alrededor del componente determinístico puede representarse con una distribución normal con media cero y desviación estándar específica para cada variable. Las pruebas de diagnóstico<sup>2</sup> indican que los modelos anteriores son estadísticamente adecuados (SPANOS y MCGUIRK, 2002) por lo que se pueden considerar como una buena aproximación al proceso generador de datos.

### 3.2 Simulaciones de la producción de café y del ingreso del productor promedio en Veracruz para el año 2050.

Para los escenarios de cambio climático para el año 2050 se consideraron los modelos ECHAM y Hadley con las familias de escenarios de emisiones A2 y B2 del Informe Especial de Escenarios de Emisiones del IPCC<sup>3</sup>. De acuerdo con dicho informe la familia de escenarios A2 “describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. El índice de natalidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.” La familia de escenarios B2 “describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas A1 y B1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.” La Tabla 1 muestra los escenarios de cambio climático para la región de interés, utilizando los escenarios y modelos mencionados anteriormente.

Familia:	ECHAM		HADLEY	
	B2	A2	B2	A2
T. Verano	+1.5	+1.1	+1.9	+1.4
T. Invierno	+1.3	+1.0	+1.55	+1.2
Pcp. Primavera	+1.9%	+1.4%	-6.9%	-4.76%

Tabla 1. CAMBIOS EN LAS VARIABLES CLIMÁTICAS PARA EL AÑO 2050

<sup>1</sup> Se incluyó en la regresión una variable *dummy* en el año 1984 debido a la presencia de una observación atípica en ese año.

<sup>2</sup> Por razones de espacio los resultados de estas pruebas no se muestran en este trabajo.

<sup>3</sup> <http://www.grida.no/climate/ipcc/spmpdf/sres-s.pdf>

Para la generación de escenarios probabilísticas de producción actual y futura se definieron las variables climáticas y la incertidumbre en el valor del salario mínimo de la siguiente manera:

- $T_{vera} \sim N(24.96 + \Delta T_{vera}, 0.54)$ <sup>4</sup>
- $T_{inv} \sim N(20.75 + \Delta T_{inv}, 0.68)$
- $P_{prim} \sim N(81.35 + \% \Delta P_{prim}(P_{prim}), 28.93)$
- $SMINVER \sim U(40, 50)$ <sup>5</sup>

donde  $\Delta T_i$  = cambio en la temperatura promedio para  $i = vera, inv$  de acuerdo con los diferentes modelos y escenarios de emisiones;  $\% \Delta P_{prim}$  = cambio porcentual en la precipitación de primavera de acuerdo con los diferentes modelos y escenarios de emisiones.

Con un generador de números (pseudo) aleatorios se construyeron 10,000 realizaciones para cada variable independiente y se calculó la producción esperada de café correspondiente. Las figuras 2a, 2b y 2c muestran los histogramas de frecuencias<sup>6</sup> obtenidos para las condiciones de clima actuales ( $\Delta T_i=0$ ,  $\% \Delta P=0$ ), y para cambio climático usando el modelo ECHAM (A2) y Hadley (B2) respectivamente. Como se muestra en la Tabla 2, tanto la mediana como la media de producción para el año 2050 disminuirá entre un 22% y un 55% dependiendo del modelo, mientras que la variabilidad (considerando la desviación estándar y el rango intercuartílico (IQR)) de la producción se incrementará entre un 123% y un 266%. También es importante notar en las gráficas anteriores, el cambio en el sesgo y curtosis de la distribución de la producción. En los escenarios correspondientes a las condiciones actuales y el modelo ECHAM la distribución está sesgada a la izquierda, es decir la mayor parte de la masa de probabilidades se acumula en valores altos de producción dejando una probabilidad reducida de ocurrencia de valores de producción pequeños. También es importante notar que bajo estos escenarios, ninguna realización del proceso lleva a un nivel de producción cero. En el caso del escenario correspondiente al modelo Hadley, la distribución es relativamente simétrica al rededor de una media 55% menor que la producción actual y aproximadamente un 5% de las veces la producción se hace cero.

	Media	Mediana	Desviación estándar	IQR
Actual	526,475	531,978	37,837	45,436
ECHAM A2	406,949	417,301	84,214	110,806
Hadley B2	237,774	247,469	116,369	166,414

Tabla 2. ESTADÍSTICAS DE LAS SIMULACIONES PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ EN VERACRUZ PARA LAS CONDICIONES ACTUALES Y PARA EL AÑO 2050 (SIN DECIMALES).

<sup>4</sup> A lo largo del presente trabajo se referirá a la distribución normal como  $N(\mu, \sigma)$  y a la distribución uniforme como  $U(L, U)$  donde L es el límite inferior y U el superior.

<sup>5</sup> El rango de variación del salario mínimo real en Veracruz para estas simulaciones se mantuvo fijo para poder hacer comparaciones en la producción entre los distintos escenarios de clima.

<sup>6</sup> Debido a la gran cantidad de simulaciones realizadas, los histogramas de frecuencias pueden interpretarse como una aproximación a las funciones de densidad de probabilidad de las variables de interés.

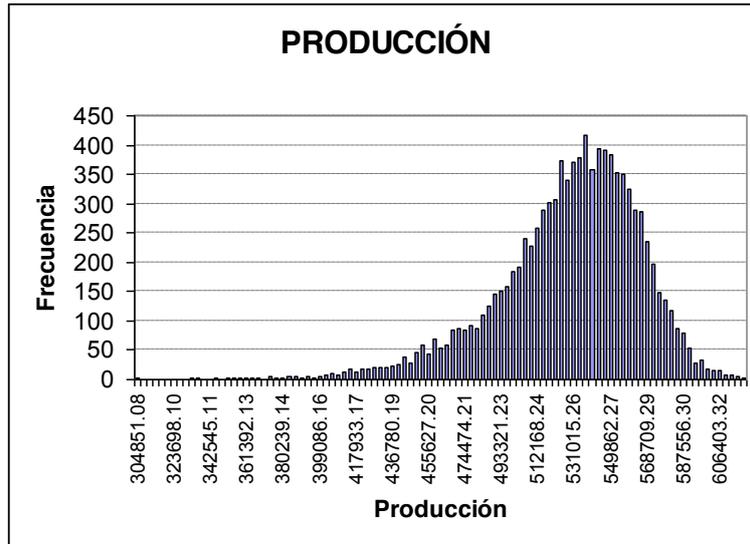


Figura 2a. Distribución de la producción de café con condiciones actuales en las variables climáticas y un salario mínimo distribuido uniformemente entre 40 y 45 pesos

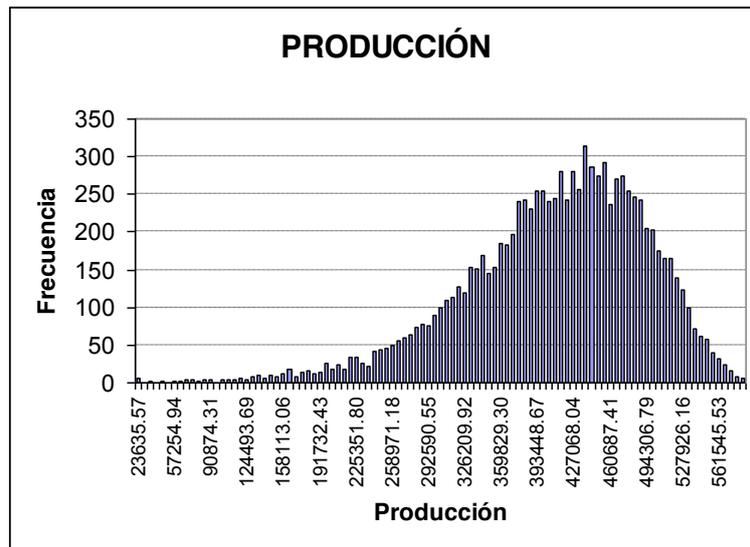


Figura 2b. Distribución de la producción de café bajo el escenario de cambio climático del ECHAM A2 en las variables climáticas y un salario mínimo distribuido uniformemente entre 40 y 45 pesos

Para simular el ingreso de un productor de café promedio en Veracruz para el año 2050 se calculó el ingreso que se recibiría por la producción total y se dividió por el número de productores en el estado. Para tomar en cuenta la incertidumbre en precios se simularon 10,000 precios posibles usando una distribución uniforme con límites inferior de \$2000 pesos y superior de \$3000. Con el fin de poder comparar el efecto del cambio en las variables de clima, en estas simulaciones se mantuvieron fijos tanto los rangos de variación de precios y de salario mínimo. Por otra parte, los costos promedio por hectárea se estiman en \$8,000 (EAKIN, 2003) y fueron simulados con una distribución uniforme con límite inferior de \$7,900 y límite superior de \$8,100. Se consideró un subsidio gubernamental fijo de \$750 pesos por hectárea. La Tabla 3 presenta algunas medidas de tendencia central, variabilidad y

USO DE MÉTODOS DE MONTE CARLO PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y RIESGO EN CONDICIONES ACTUALES Y BAJO CAMBIO CLIMÁTICO

valor en riesgo (VaR) así como el porcentaje de ocurrencia de pérdidas y de ganancias por debajo de un umbral arbitrario que ayudan a mostrar los impactos que los cambios en las variables climáticas tendrían sobre las ganancias netas del productor promedio.

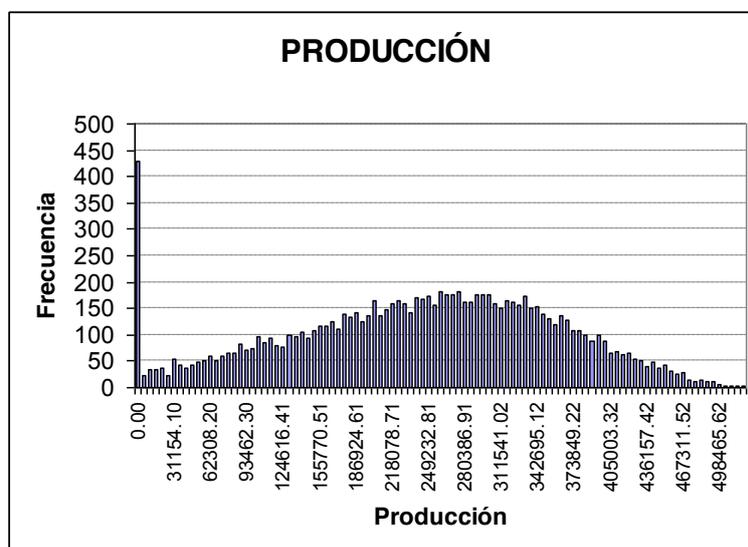


Figura 2c. Distribución de la producción de café bajo el escenario de cambio climático del Hadley B2 en las variables climáticas y un salario mínimo distribuido uniformemente entre 40 y 45 pesos

	Media	Mediana	Desviación estándar	VaR (99%)	Porcentaje de ocasiones con ganancias netas	Porcentaje de ocasiones con ganancias netas mayores a \$5,000
Actual	\$ 3,266	\$ 3,253	\$ 2,638	\$ -2,501	69.90 %	12.20 %
ECHAM A2	\$ -1,120	\$ -1,089	\$ 3,579	\$ -9,532	39.20 %	4.90 %
Hadley B2	\$ -7,653	\$ -7,463	\$ 4,514	\$ -16,482	3.00%	0.00 %

Tabla 3. ESTADÍSTICAS DE LAS SIMULACIONES PARA EL INGRESO DEL PRODUCTOR PROMEDIO PARA LAS CONDICIONES ACTUALES Y PARA EL AÑO 2050.

La tabla anterior muestra que, bajo cualquiera de los escenarios de cambio climático y manteniendo todo lo demás constante, tanto la media como la mediana del ingreso del productor promedio involucran pérdidas importantes (el ingreso disminuye entre 134% y 334%) y el porcentaje de ocasiones con ganancias pasa de un 69.9% en el presente a un 39.2% en el caso del modelo ECHAM y a tan sólo un 3% en el caso del Hadley. Adicionalmente, la probabilidad de que el productor promedio tenga ganancias por encima de un umbral arbitrario de \$5,000 pesos, se reduce en forma importante en el caso del escenario obtenido con el modelo ECHAM y se hace nula para el caso del modelo Hadley.

Al igual que en el caso de la producción, es importante destacar el efecto que los cambios en las variables climáticas tendrían sobre la variabilidad en el ingreso. La desviación estándar del ingreso del productor promedio aumentaría un 36% y un 71% bajo el modelo ECHAM y Hadley respectivamente. Estos incrementos en la desviación estándar indican que el ingreso será mucho menos constante y predecible y que el riesgo para los productores aumentará considerablemente. Una medida frecuentemente utilizada en la evaluación del riesgo financiero es el VaR (Value at Risk) que nos proporciona una estimación de la máxima pérdida esperada a un determinado nivel de confianza (en este caso a un 99%). En el caso de la producción de café, para el año 2050 y dependiendo del modelo, el valor en riesgo de la actividad se incrementa entre un 281% y un 559%. La producción de café para dicho año representa una inversión no rentable y con un riesgo mucho mayor que el presente. Las figuras 3a, 3b y 3c, muestran la distribución de probabilidades (frecuencias) bajo condiciones actuales y como cambiaría bajo los distintos escenarios de cambio climático.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ilustra la aplicación de métodos de Monte Carlo para proporcionar una medida de riesgo frente a los impactos potenciales de cambio climático sobre la producción de café y el ingreso del productor promedio. Dada la naturaleza estocástica de las variables climáticas y económicas, las predicciones que se puedan hacer sin incluir esta característica constituyen una simplificación que, si bien proporciona una estimación de la media de la variable de interés cuando todas las variables independientes del modelo se encuentran en su valor medio, consiste en una estimación puntual que no proporciona información sobre variabilidad y forma de la distribución de la variable de interés bajo los distintos escenarios. Esto representa una importante limitación para tratar de evaluar el riesgo ya que no se puede inferir qué tan representativa es la media, cuál es la probabilidad de tener valores por encima o por debajo de ella, cuál es la variabilidad alrededor de dicha media.

A través de la simulación de Monte Carlo es posible incluir una gran cantidad de realizaciones de los procesos generadores de datos de las variables independientes y así aproximar la distribución de probabilidades (frecuencias) de la variable de interés. Una vez que se logra lo anterior es posible responder las preguntas anteriores y proporcionar una medida de riesgo en términos probabilísticos para la actividad de interés.

Incluyendo la variabilidad intrínseca de las variables climáticas y la incertidumbre en los valores de las variables económicas, se muestra que la media de la producción para el año 2050 no sólo podría disminuir entre un 22% y un 55% sino que el riesgo de tener niveles de producción menores que la media aumentaría considerablemente ya que la variabilidad de la producción sería mucho mayor.

Para fines comparativos, en este trabajo se mantuvo fijo el rango de variación de precios entre \$2,000 y \$3,000 pesos. Los resultados muestran que bajo los distintos escenarios de cambio climático, las probabilidades de obtener ganancias se reducen de casi un 70% en la actualidad a prácticamente la mitad en el escenario más favorable y a tan sólo el 3% en el más pesimista. En ambos escenarios climáticos para el 2050, la media y la mediana de las ganancias netas resultan negativas, lo que llevaría a la salida de un número importante de productores y haría no rentable una de las actividades más importantes del estado.

USO DE MÉTODOS DE MONTE CARLO PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y RIESGO EN CONDICIONES ACTUALES Y BAJO CAMBIO CLIMÁTICO

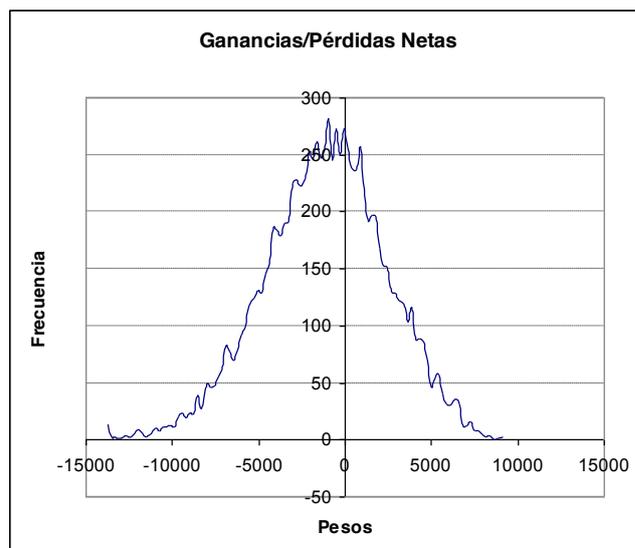
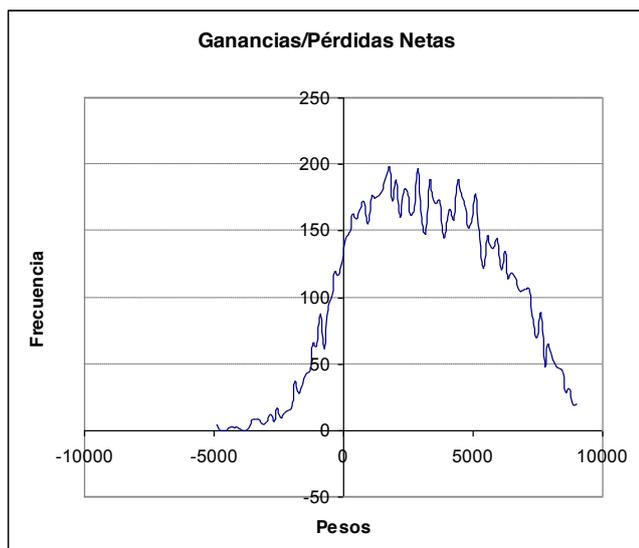


Fig. 3a. Distribución de frecuencias (probabilidades) del ingreso del productor promedio bajo condiciones climáticas actuales

Fig. 3b. Distribución de frecuencias (probabilidades) del ingreso del productor promedio bajo el escenario de cambio climático del modelo ECHAM.

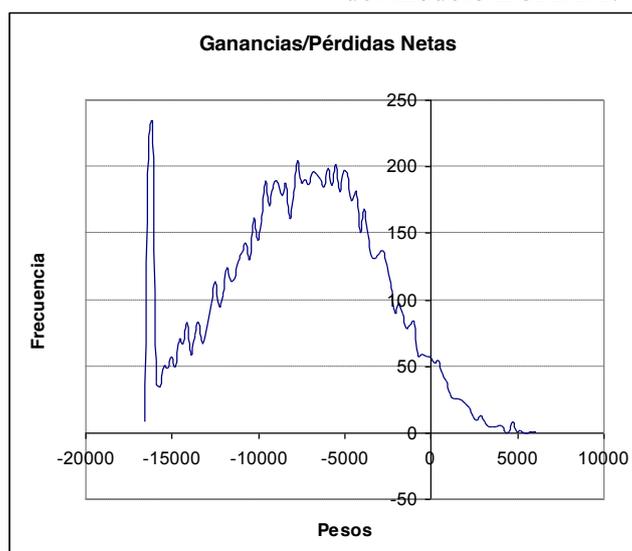


Fig. 3c. Distribución de frecuencias (probabilidades) del ingreso del productor promedio bajo el escenario de cambio climático del modelo Hadley.

El riesgo de la actividad aumentaría considerablemente, aún cuando los precios de café fueran más atractivos en el 2050 que lo que aquí se supone, ya que bajo los escenarios de cambio climático sería más difícil para los productores asegurar un nivel de producción con lo que se restaría competitividad, se haría difícil la planeación y se reducirían las posibles fuentes de inversión. El aumento en la variabilidad de las ganancias netas requeriría que los productores contaran con un respaldo económico para continuar en la actividad, ya sea por subsidios gubernamentales o por fuentes externas, que les permitiera soportar las pérdidas en los años en los que las realizaciones de las variables climáticas lleven a niveles bajos de producto.

## 5. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- CHANG, C. C., (2002). "The potential impact of climate change on Taiwan's agriculture." *Agric. Econ.* 27, pp. 51-64.
- CONDE, C., M. VINOCUR, C. GAY, R. SEILER, y F. ESTRADA. (2005). "Climatic Threat Spaces as a Tool to Assess Current and Future Climatic Risk in Mexico and Argentina. Two Case Studies." En: *AIACC Synthesis of Vulnerability to Climate Change in the Developing World* (en revisión).
- EAKIN, H. (2003). *Workshop Report. Integrated Assessment of Social Vulnerability and Adaptation to Climate Variability and Change Among Farmers in Mexico and Argentina*. Proyecto financiado por UNDP-GEF. 2002-2004.
- 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)." *El Clima, entre el Mar y la Montaña*. J.C. García, C. Diego, P. Fernández, C. Garmendía, D. Rasilla, (editores). Asociación Española de Climatología. Serie A, No. 4, pp. 651-660.
- GAY, C., F. ESTRADA, C. CONDE, H. EAKIN, y L. VILLERS, (2006). "Potential impacts of climate change on agriculture: A case of study of coffee production in Veracruz," Mexico. *Climatic Change* (en prensa)
- IPCC, WGI (Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group III). *Summary for Policymakers. Climate Change: 2001: The Scientific Basis*. A Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- KAUFMANN, R., y SNELL S. (1997). "A biophysical model of corn yield: Integrating climatic and social determinants." *American Journal of Agricultural Economics* 79, pp. 178-190
- SPANOS, A., y MCGUIRK, A., (2002). "Where do Statistical Models Come From? The Problem of Specification Uncertainty in Empirical Modeling." Virginia Tech working paper.