

El valor económico de la predicción del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) en el sector azucarero colombiano

Alexander Bonilla *
Ramón Rosales **
Jorge Maldonado ***

Resumen

Este artículo desarrolla un modelo estocástico de excedente económico y estima el valor económico del mejoramiento de la predicción del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS), suministrada por un sistema de alerta temprana, en el sector azucarero colombiano. Los resultados muestran una reducción promedio agregada de los rendimientos agrícolas de la caña de azúcar del 6,5% y 4,3% a causa del evento El Niño y La Niña, respectivamente, en relación con la fase normal. La predicción perfecta de ENOS genera un incremento anual en los beneficios de la sociedad de US\$ 9,59 millones, en condiciones corrientes, y US\$ 10,77 millones cuando la frecuencia de ENOS es afectada por las proyecciones de gases invernadero. Los beneficios económicos por la predicción perfecta del evento ENOS equivalente al 1% del PIB del sector azucarero en el 2000.

Clasificación JEL: D6, D8, Q0.

* Candidato a doctorado en Economía Agrícola, Ambiental y del Desarrollo de Ohio State University.

** Ph.D. en Economía Agrícola. Profesor Asociado de la Universidad de los Andes.

*** Estudiante de doctorado en Economía Agrícola y Recursos Naturales de la Universidad de Ohio.

Palabras clave: caña de azúcar, excedente económico, fenómeno ENOS, valor económico de la información, sistemas de alerta temprana.

Abstract

The present article develops a stochastic model of the economic excedent, and estimates the economic value of the improvement in predicting the occurrence of the ENOS through a system of Early Alert for the Colombian sugar sector.

The results show an average aggregated reduction of the agricultural yields of sugar in 6,5% and 4,3 % as a result of the occurrence of the event "El Niño" and "La Niña" respectively, in relation to the normal phase.

It was found that a perfect prediction of ENOS generates an annual increment of society's benefit of approximately US\$ 9,59 million under normal circumstances, and of US\$10,77 million when the frequency of ENOS is affected by the projections of global warming gases.

The economic benefits for the perfect prediction of the ENOS event are of 1% of the GNP of the sugar sector for the year 2000.

Introducción

El fenómeno El Niño Oscilación Del Sur (ENOS), definido como el calentamiento anormal del océano Pacífico ecuatorial y baja presión atmosférica en el Pacífico sur, frente a las costas del norte de Perú, Ecuador y sur de Colombia, es responsable de una gran parte de los cambios en el clima local año tras año en muchas regiones del mundo. En Colombia, los episodios de El Niño han generado variaciones de $\pm 60\%$ en la precipitación y aumentos en la temperatura media mensual del aire hasta de 20°C (IDEAM, 2002). Debido a la importancia del clima en la agricultura, la presencia de condiciones climáticas adversas ocasionadas por el fenómeno ENOS tiende a manifestarse en la reducción de la producción agrícola.

La caña de azúcar es uno de los cultivos más afectados por el fenómeno ENOS en Colombia (MINISTERIO DE AGRICULTURA, 2002). En general, los cambios en el rendimiento agrícola de la caña de azúcar provocan alteraciones en las decisiones de siembra, uso de insumos y factores productivos, los cuales afectan las ganancias y finalmente el bienestar de productores y consumidores. Sin embargo, pronósticos oportunos y de mayor exactitud sobre los episodios ENOS proveídos por un sistema de alerta temprana (SAT)¹ pueden permitirles a agricultores el ajuste de las decisiones de uso de la tierra cultivable, y reducir así algunos de los impactos negativos del fenómeno climático. Trabajos internacionales han mostrado que el mejoramiento de la predicción del fenómeno ENOS puede incrementar el bienestar de consumidores y/o productores. Hasta el momento, estudios de esta naturaleza no se habían desarrollado en el sector del azúcar.

El objetivo de este trabajo es estimar el valor económico del mejoramiento de la predicción del fenómeno El Niño Oscilación del Sur proveída por un sistema de alerta temprana en el sector azucarero colombiano². Para ello, se desarrolla un modelo general estocástico de excedente económico del azúcar que describe el comportamiento del mercado interno y externo del sector, y el impacto de ENOS sobre productores y consumidores. Se obtiene el valor de la información climática para predicción perfecta y una exactitud del pronóstico del 40% y 70% de acuerdo con la teoría de decisión bayesiana. El estudio incluye la estimación de funciones que reflejan las características agronómicas de la producción de caña y económicas de la

¹ El objetivo general de la propuesta de un sistema de alerta temprana ante el fenómeno ENOS es establecer un sistema de información a nivel nacional para que, aprovechando las capacidades técnicas, institucionales y financieras del país, se tomen decisiones encaminadas a atenuar los impactos potencialmente adversos de ENOS, así como capitalizar sus impactos potencialmente benéficos. El proyecto del SAT-ENOS generaría información climática sobre diagnósticos de riesgo inminente, a partir de predicciones de El Niño o La Niña (BID y OMM, 2002). Recientemente se llevo a cabo el “Estudio de factibilidad de la predicción y mitigación de los impactos socioeconómicos del fenómeno El Niño Oscilación del Sur en América Latina y el Caribe (BID y OMM, 2002)”, relacionado con el establecimiento y evaluación de la factibilidad técnica, económica e institucional de sistemas de alerta temprana para el fenómeno El Niño que recurrentemente afecta la región.

² El sector azucarero aportó el 0,95% y 0,98% a la producción nacional durante 1997 y 1998, respectivamente. En el 2000, su participación fue del 1,04%. Durante este mismo año, el PIB del sector fue US\$ 861 millones (CECODES, 2003).

producción de azúcar. Por último, se incorpora una variación en la frecuencia del fenómeno ENOS relacionada con la tendencia futura del cambio climático del planeta y se evalúan sus implicaciones en el bienestar y el valor de la predicción. El enfoque metodológico desarrollado se fundamenta en economía del bienestar aplicada. El modelo se resuelve usando el lenguaje computacional Matlab³, según el esquema de programación matemática estocástica.

El documento está organizado en seis secciones. La primera presenta la revisión de literatura relacionada con la descripción del fenómeno ENOS, su impacto económico y el valor de la predicción para la pesca y la agricultura en Estados Unidos y México. La segunda muestra el marco teórico de decisión óptima según el enfoque bayesiano. La tercera describe la metodología y el modelo de excedente económico del sector azucarero. La cuarta relaciona las bases de datos, fuentes utilizadas y variables construidas. La quinta presenta los resultados de las estimaciones econométricas, del modelo de rendimientos agrícolas y el modelo de programación matemática estocástica. Finalmente, se registran las conclusiones.

I. Revisión de literatura

El término El Niño fue acuñado hace más de 100 años para describir el calentamiento ocasional de las aguas del océano Pacífico a lo largo de las costas de Ecuador y Perú (IRI, 2002). Este fenómeno, típicamente, ocurría en diciembre, por lo que le fue asignado el nombre de El Niño debido al nacimiento de Cristo. Hoy, sin embargo, el término se reserva para los más grandes y ocasionales eventos asociados con el calentamiento de las aguas del océano Pacífico central y oriental. El término La Niña se utiliza para designar las oscilaciones en la temperatura del océano Pacífico tropical en la dirección opuesta al El Niño (Zebiak, 1999).

³ Matlab es un ambiente técnico computacional integrado que combina computación numérica, gráficas avanzadas, visualización, y un lenguaje de programación de alto nivel (Math Works, 2001). Este programa contiene cientos de comandos para efectuar operaciones matemáticas, permite resolver ecuaciones, efectuar pruebas estadísticas, etcétera (Hunt *et al.*, 2001).

Estrechamente asociado con El Niño y La Niña existe otro fenómeno meteorológico llamado la Oscilación del Sur. Éste se refiere al intercambio en la presión atmosférica a nivel del mar entre las áreas del Pacífico occidental y sudeste. La combinación de la reducción o expansión de las aguas calurosas en el Pacífico oriental y los cambios fuertes de la Oscilación del Sur ahora suele llamarse El Niño Oscilación del Sur o ENOS⁴ (Zebiak, 1999).

El ENOS se ha relacionado con los cambios extremos en la precipitación y la temperatura en África, América, Australia, y porciones de Asia; también se asociado con las epidemias, variaciones en los rendimientos de las cosechas, las rupturas del ecosistema, los incendios forestales, el hambre, e incluso las fluctuaciones del mercado (Zebiak, 1999). Los impactos de El Niño de 1997-1998 en todo el planeta se han estimado en US\$ 33 mil millones (BID y OMM, 2002). En América Latina y el Caribe se cita que los costos directos de este episodio llegan a US\$ 8,5 mil millones (WMO, 2001). En Colombia⁵, la CAF (2002) reporta un impacto de US\$ 564 millones durante el mismo período. Gran parte de las investigaciones relacionadas con el mejoramiento del pronóstico y el impacto económico de ENOS se encuentran reunidas en los trabajos de Barrett (1998), Costello, Adams y Polasky (1998), Solow *et al.* (1998), Chen *et al.* (1999), Adams *et al.* (1999), McCarl *et al.* (2000) y Adams *et al.* (2001).

Respecto al valor de la información de pronóstico climático, Barrett (1998) efectúa una discusión referente al carácter imperfecto de la información para el fenómeno ENOS. El autor pone el énfasis en tres argumentos principales: (1) los pronósticos tienen valor solamente si ellos alteran la distribución de probabilidad subjetiva de las variables estocásticas que influyen la elección de los agentes que toman decisiones; (2) el valor potencial del mejoramiento del pronóstico climático es más grande en

⁴ Para obtener una descripción más detallada del fenómeno ENOS, véase IRI (2001), o consultar la página web: <http://iri.columbia.edu/climate/ENSO/currentinfo/note.html>.

⁵ Estudios del IDEAM y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia han encontrado una caída promedio de los rendimientos agrícolas de cultivos transitorios del 4,4% y de cultivos permanentes del 5,5% para la fase El Niño. Sus resultados están relacionados con el uso de datos históricos de rendimiento agrícola de los 17 principales cultivos del país, cuya fuente son las evaluaciones agropecuarias de las Urpas y Umatas del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Estos datos se obtienen mediante concertaciones rurales y no a través de mediciones *in situ*.

comunidades rurales pobres, debido no solamente a su mayor aversión al riesgo, sino a que las condiciones climáticas globales repercuten más fuertemente en las regiones tropicales y subtropicales; (3) deben efectuarse estimaciones empíricas de los beneficios en el bienestar social del mejoramiento de pronóstico climático interestacional.

Costello, Adams y Polasky (1998) enfatizan que una buena predicción del pronóstico climático permite mejorar las decisiones de manejo del salmón. Los autores desarrollan un modelo bioeconómico de la pesquería del salmón del coho en la costa oeste de Estados Unidos y derivan el valor de la información según la capacidad de mejoramiento del pronóstico de El Niño. Ellos encuentran que una predicción perfecta de El Niño genera una ganancia en el bienestar anual de aproximadamente US\$1 millón, mientras que las previsiones imperfectas reducen considerablemente las ganancias. Costello, Adams y Polasky (1998) usan el enfoque de programación dinámica para obtener la solución óptima dada la estructura de la información. Su modelo económico toma en cuenta los impactos en el bienestar, incluyendo cambios en el excedente del consumidor y en las cuasirentas del productor.

Solow *et al.* (1998) miden el valor económico a largo plazo de la predicción de ENOS por el incremento en el bienestar social con base en el uso del pronóstico en decisiones económicas. Su artículo estima, para la agricultura de Estados Unidos, el valor económico de la predicción de ENOS, en un modelo estático de programación estocástica denominado Agricultural Sector Model (ASM). El valor anual estimado de beneficios por la predicción perfecta de ENOS llega a US\$ 323 millones. Su trabajo incluye el análisis de datos meteorológicos, aspectos de la ciencia vegetal y de economía, según el marco de decisión bayesiano. El modelo Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC) les permite a los autores simular el efecto en los rendimientos de cada cultivo a través de los cambios en el estado del tiempo y las características del suelo.

De manera similar, Adams *et al.* (1999) desarrollan estimaciones de las consecuencias económicas del evento El Niño 1997-1998 y el evento La Niña 1998-1999 para la agricultura de Estados Unidos. Ambas fases de ENOS dan como resultado daños económicos: US\$ 1,5 a US\$ 1,7 billones de pérdidas para El Niño y US\$ 2,2 a US\$ 6,5 billones para La Niña. Su trabajo también desarrolla el análisis de bienestar de consumidores y

productores en el marco del modelo ASM. A diferencia de Solow *et al.* (1998), incluyen además de las simulaciones del modelo EPIC, datos históricos sobre los rendimientos agrícolas durante los eventos ENOS. Sus resultados muestran diferencias en los valores obtenidos según la metodología.

Por otro lado, el trabajo de McCarl *et al.* (2000) registra estimaciones anuales de los daños ocasionados por cambios en la frecuencia de los eventos ENOS de US\$300 a 400 millones para el sistema agrícola de Estados Unidos. No obstante, cuando se incorporan adicionalmente los cambios en la intensidad de ENOS, los daños aumentan a US\$1 billón. Estos autores capturan los cambios en los rendimientos agrícolas a través de distribuciones de probabilidad e incorporan los efectos sobre el comercio exterior ocasionados por los impactos en la agricultura estadounidense.

Uno de los trabajos más recientes en esta área y para América Latina es el de Adams *et al.* (2001). Su investigación obtiene estimaciones de los beneficios económicos de pronósticos mejorados de los eventos ENOS para la agricultura mexicana. Los autores desarrollan un modelo ASM para el sector agrícola mexicano de las regiones vulnerables a los eventos ENOS, aplicando un marco de decisión estocástica para diferentes niveles de exactitud de la predicción de tales eventos. El valor de los beneficios del SAT para el ENOS obtenido por Adams *et al.* (2001) oscila entre US\$19 millones y US\$52 millones, dependiendo de la tasa de adopción que se asuma por el sistema. Estos valores fueron vistos como la frontera más baja de los beneficios del sistema de alerta temprana para la agricultura mexicana.

Los estudios anteriores recopilan una estrategia sistemática para estimar los beneficios del mejoramiento de la información climática sobre los eventos ENOS. Estos trabajos incluyen el esquema de programación estocástica como herramienta metodológica y, en particular, se fundamentan en la modelación del comportamiento de consumidores y productores en mercados de bienes obtenidos directa o indirectamente a partir de un recurso natural.

II. El marco de decisión óptima y el valor de la predicción.

El marco general sobre el cual se ha evaluado el mejoramiento de los servicios meteorológicos es la teoría de decisión bayesiana. Según este

enfoque, la información se ve como un factor clave para la reducción de la incertidumbre en el proceso de toma de decisiones de los distintos agentes económicos. El modelo se basa en el supuesto de racionalidad, según el cual cada agente tiene la capacidad de confeccionar un ordenamiento único de los resultados asociados a estas decisiones de acuerdo con una función de utilidad individual y en el que el comportamiento discrecional del agente se orienta a maximizar esa utilidad (Ducci, 2002).

El valor de un pronóstico es medido por el incremento esperado en los beneficios económicos, debido a cambios en los rendimientos agrícolas esperados asociados con cada estado de ENOS, es decir, aquellos que resultan del uso del pronóstico en la toma de decisión (Adams *et al.* (2001)). La formalización de la manera como los agentes utilizan la información en el marco de la teoría de decisión bayesiana se presenta en Solow *et al.* (1998) y Adams *et al.* (2001).

Sea a un patrón específico de cultivo de caña escogido por el agricultor y S la variable aleatoria que denota la fase o estado de ENOS. Los posibles valores de S son E (El Niño), V (La Niña) y N (Normal). Sea s la realización de S y $B(a/s)$ el beneficio para un patrón de cultivo a , si la fase realizada de ENOS es s . El beneficio esperado para a en ausencia de predicción de una fase de ENOS es:

$$E(B(a)) = \sum_s B(a/s) \Pi(s) \quad (1)$$

Donde $\Pi(s)$ es la probabilidad que $S = s$.

El patrón de cultivo óptimo a^* maximiza $E(B(a))$. Nótese que en ausencia de la predicción, los productores optimizan el patrón de cultivo sobre el promedio de las condiciones climáticas en un largo período. Por otro lado, la producción del cultivo de caña de azúcar en un año particular es el resultado del patrón de cultivo a^* que depende de la fase realizada de ENOS en ese año.

Para una fase s dada de ENOS, la oferta de caña de azúcar a lo ancho de la economía que resulta del patrón óptimo de cultivo de cada agricultor puede encontrarse usando un modelo económico que capture las decisiones de los productores de caña, así como las decisiones de los productores y los

consumidores de azúcar en el país. Sea $T_1(s)$ el excedente económico derivado de las curvas de oferta agregada (suma de las ofertas de todos los productores de caña de azúcar a nivel nacional). En ausencia de la predicción de una fase de ENOS, el excedente económico esperado está dado por:

$$T_1 = \sum_s T_1(s) \Pi(s) \quad (2)$$

Por otro lado, se supone que la predicción de la fase de ENOS se emite antes de la época de plantación. Sea X la variable aleatoria que denota la fase predicha de ENOS y x la realización de X . Los posibles valores de X son E , V y N .

La predicción de la fase X de ENOS en un año particular es x . Los agricultores usan esta predicción para asumir una distribución de probabilidad de S de acuerdo con el Teorema de Bayes:

$$p(s/x) = \frac{p(x/s) \Pi(s)}{p(x)} \quad (3)$$

Donde $p(s/x)$ es la probabilidad que $S=s$ dado $X=x$; es la probabilidad que $X=x$, dado $S=s$, y $p(x)$ es la probabilidad de $X=x$.

Además,

$$p(x) = \sum_s p(x/s) \Pi(s) \quad (4)$$

Para una predicción perfecta:

$$p(x/s) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = s \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5)$$

De esta manera,

$$p(s/x) = \begin{cases} 1 & \text{si } s = x \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (6)$$

En contraste, cuando no hay información de predicción del fenómeno ENOS, $p(x/s) = \frac{1}{s}$ en cada s . No obstante, en la mayoría de los casos, los agricultores no están completamente desinformados; en general, ellos toman la información dada por el conocimiento pasado de los eventos ENOS.

Cuando el pronóstico se provee, el agricultor individual de caña de azúcar procede a escoger el patrón óptimo de cultivo $a^*(x)$ para maximizar su beneficio esperado:

$$E(B(a)/x) = \sum_s B(a/s) p(s/x) \quad (7)$$

Nótese que el promedio sobre $p(s/x)$ en la ecuación (7) considera que los productores toman en cuenta la posibilidad de una predicción incorrecta. Ahora el patrón de cultivo $a^*(x)$ depende de la fase predicha de ENOS. Sea $T_2(x/s)$ el excedente económico a nivel nacional cuando $X=x$ y $S=s$. El excedente económico condicional esperado $T_2(x)$ dado $X=x$ y el excedente económico no condicional T_2 se hallan de la siguiente manera:

$$T_2(x) = \sum_s T_2(x/s) p(s/x) \quad (8)$$

$$T_2 = \sum_x T_2(x) p(x) \quad (9)$$

Finalmente, el valor de la predicción de ENOS está dado por $T_2 - T_1$. Esta diferencia se considera en el valor del mejoramiento del pronóstico a largo plazo proveída por el SAT del fenómeno ENOS. En un año cualquiera, una predicción incorrecta puede ocasionar una pérdida para la sociedad; sin embargo, en promedio, el uso de la predicción conduce a un incremento en las cuasi rentas del productor, el excedente del consumidor o ambos (Adams *et al.* 2001).

III. Metodología

El valor económico de la predicción de ENOS se mide utilizando el enfoque básico presentado en Solow *et al.* (1998) y Adams *et al.* (2001); la evaluación de los impactos en el bienestar por cambios en la frecuencia de este fenómeno climático, se desarrolla siguiendo el esquema citado en McCarl *et al.* (2000).

La metodología implementada en este artículo se diferencia de los estudios antes citados en dos aspectos principales: (1) la estimación de los impactos del fenómeno ENOS sobre el cultivo agrícola se efectúa mediante un modelo biométrico o función de rendimiento que captura las características agronómicas de los sembrados de caña; (2) los resultados cuentan con una medida estadística de la variabilidad del valor económico de la predicción de ENOS asociada con los costos de pronósticos equivocados.

Para alcanzar el objetivo de este trabajo fue necesario adelantar el siguiente procedimiento:

- 1°. Efectuar una caracterización general del sector azucarero colombiano.
- 2°. Construir un modelo de excedente económico que reflejara el comportamiento de consumidores y productores de azúcar, como el de productores de caña de acuerdo con la fase de ENOS.
- 3°. Elaborar las matrices de distribución de probabilidad conjunta para el caso base⁶ y cada nivel de predicción del fenómeno ENOS.
- 4°. Estimar las funciones que describen el modelo de excedente económico usando como herramienta la estadística y la econometría.
- 5°. Estimar el valor económico de la predicción de ENOS según el enfoque programación matemática estocástica en el lenguaje computacional Matlab.

Aquí se citan rápidamente las características principales que identifican de manera general el sector y que además fueron de relevancia en la posterior construcción del modelo de excedente económico: el sector azucarero colombiano⁷ es considerado un sector de relevante impacto socioeconómico

⁶ Se entiende por caso base aquel estado en el cual no hay predicción de los eventos ENOS.

⁷ El sector se encuentra representado por la Asociación de Productores de Caña de Azúcar de Colombia (Asocaña), la cual reúne 13 de los 14 ingenios del país; ellos son: Ingenio del Cauca, Ingenio La Cabaña, Ingenio Mayagüez, Ingenio Pichichí, Ingenio Central Castilla, Ingenio Sancarlos, Ingenio María Luisa, Ingenio Riopaila, Ingenio Central Tumaco, Ingenio Risaralda, Ingenio Manuelita, Ingenio Central Sicarare e Ingenio Providencia (CECODES, 2003).

regional y nacional⁸. Toda el azúcar que produce Colombia se obtiene exclusivamente de la caña de azúcar⁹ y su cultivo se concentra fundamentalmente en el valle geográfico del río Cauca, región donde es posible la cosecha y la molienda de caña de azúcar durante todo el año¹⁰. El azúcar producido se distribuye entre el mercado interno y el externo, y participa principalmente en ambos mercados con productos como el azúcar crudo y el azúcar blanco. Aproximadamente la mitad de la producción se exporta, dirigiéndose al mercado andino, al programa de cuota americana de Estados Unidos y al mercado mundial¹¹. A continuación se presenta el modelo de excedente económico, los modelos econométricos y la función de rendimientos agrícolas de caña de azúcar.

A. El modelo de excedente económico

El modelo construido maximiza el bienestar económico neto anual esperado del sector azucarero colombiano en los diferentes estados del fenómeno ENOS (El Niño, La Niña y normal), medido a través del excedente económico (la suma del excedente del consumidor y las cuasi rentas del productor). Un cambio en el beneficio asociado con un cambio en el precio es una medida exacta de la variación compensada y la variación equivalente (Just, Hueth y Schmitz, 1982). Sin embargo, en el caso de los efectos del fenómeno ENOS, los cambios en bienestar usualmente ocurren directamente a partir de cambios en las decisiones de manejo más que de cambios en

⁸ A nivel nacional, el sector genera cerca de 30.000 empleos directos y 180.000 indirectos. En el sector industrial del Valle del Cauca su participación en el PIB de 1999 fue del 20%. En el mismo periodo, en el ámbito agrícola departamental, se reportó un aporte del 40% al PIB generado por la caña de azúcar (Asocaña 2001).

⁹ El nombre científico de la caña de azúcar es *Saccharum officinarum*. En otros países el azúcar se obtiene a partir de la remolacha (*Beta vulgaris*).

¹⁰ El área total sembrada en caña de azúcar se distribuye en 39 municipios de cuatro departamentos: 25 municipios del Valle del Cauca (78% del área total sembrada), siete del departamento del Cauca (19%), cuatro de Risaralda (1,6%) y tres municipios de Caldas (1,4%) (CECODES 2003). En el 2000, se cultivaron 184.957 hectáreas de caña en el país y se molieron 19'098.794 toneladas. Durante este año, la producción total de azúcar fue 2'391.324 toneladas.

¹¹ El mercado andino es el principal destino de exportación del azúcar colombiana. Respecto al mercado mundial, los principales destinos de exportación han sido Estados Unidos (exportaciones por fuera de cuota), la antigua Unión Soviética, Chile, Jamaica, Haití, Marruecos y Trinidad y Tobago.

los precios (Costello, Adams y Polasky, 1998). La función objetivo que incorpora cada fase o estado del fenómeno ENOS es:

$$\begin{aligned} \text{Máx} \quad & \sum_s P_s \left[\int_0^{Q_{BIs}} \varphi_{Bs}(Q_{BIs}) dQ_{BIs} + \int_0^{Q_{CIs}} \varphi_{Cs}(Q_{CIs}) dQ_{CIs} - CT_s(Q_{Ts}) \right. \\ & \left. + \int_0^{Z_{BXs}} \eta_{Bs}(Z_{BXs}) dZ_{BXs} + \int_0^{Z_{CXs}} \eta_{Cs}(Z_{CXs}) dZ_{CXs} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

s. a.

$$(Q_{MTs} + Q_{Ts}) - (Q_{Ds} + Q_{XTs}) \geq 0 \quad (11)$$

$$Q_{BIs} = f_1(Q_{Ts}) \quad (12)$$

$$Q_{CIs} = f_2(Q_{Ts}) \quad (13)$$

$$Z_{BXs} = f_3(Q_{Ts}) \quad (14)$$

$$Z_{CXs} = f_4(Q_{Ts}) \quad (15)$$

$$Q_{Ts} = \theta A_s R_s(A_s) \quad (16)$$

$$A_s \leq A_{MAX} \quad (17)$$

Donde s es el índice del la fase o estado del fenómeno ENOS (El Niño, normal, La Niña); P_s es la probabilidad del estado s de ENOS; Q_{BIs} es el consumo nacional de azúcar blanco en la fase s ; Q_{CIs} es el consumo nacional de azúcar crudo en la fase s ; Z_{BXs} es la cantidad de exceso de demanda de exportaciones colombianas de azúcar blanco según el estado s ; Z_{CXs} es la cantidad de exceso de demanda de exportaciones colombianas de azúcar crudo según el estado s ; Q_{Ts} es la cantidad total de azúcar producida (blanco y crudo) por los ingenios de Colombia en la fase s del ENOS; $\varphi_{Bs}(Q_{BIs})$ representa la función inversa de demanda nacional para el azúcar blanco en la fase s ; $\varphi_{Cs}(Q_{CIs})$ es la función inversa de demanda nacional para el azúcar crudo en la fase s ; $CT_s(Q_{Ts})$ es la función de costos totales de producción de azúcar para Colombia para el estado s ; $\eta_{Bs}(Z_{BXs})$ es la función inversa de exceso de demanda de exportaciones colombianas para el azúcar blanco en la fase s ; $\eta_{Cs}(Z_{CXs})$ es la función inversa de exceso de

demanda de exportaciones colombianas de azúcar crudo en la fase s ; Q_{MTs} representa las importaciones totales de azúcar en la fase s ; Q_{Ds} es el consumo total nacional de azúcar para la fase s ; Q_{XTs} representa las exportaciones totales de azúcar en el estado s ; A_s es el área nacional cultivada en caña de azúcar en el estado s ; R_s es el rendimiento agrícola de la caña de azúcar en el estado s del ENOS; θ es el factor de conversión que relaciona la producción de caña con la tasa de molienda de los ingenios y el rendimiento comercial de azúcar por unidad de caña; y A_{MAX} es el área cultivada nacional en caña de azúcar más alta en toda la historia del sector azucarero.

El modelo incorpora el comportamiento de los consumidores de azúcar blanco y azúcar crudo en el mercado interno, la participación de Colombia con estos productos en el mercado exterior y, finalmente, el comportamiento de los productores de azúcar (ingenios azucareros) y los productores de caña. Las variaciones en el excedente pueden interpretarse como cambios en el bienestar económico, los cuales son medidos como el ingreso anual neto perdido o ganado por productores y consumidores debido a las modificaciones en las decisiones de uso de la tierra cultivable asociadas con las fases del fenómeno ENOS.

La ecuación (11) representa una restricción de balance para el azúcar. Esta relaciona la oferta y demanda total del bien procesado. La oferta total de azúcar corresponde a la suma de las importaciones colombianas y la producción nacional de los ingenios, mientras la demanda describe la agregación del consumo nacional y las exportaciones colombianas. El símbolo $>$ presente en la restricción permite la existencia de excedentes de azúcar blanco y azúcar crudo al final del año.

Las ecuaciones (12), (13), (14) y (15) corresponden a las cantidades consumidas en el mercado interno y el exceso de demanda de exportaciones de azúcar colombiana. Estas se representan como una función de la producción nacional de azúcar. Por otro lado, la ecuación (16) describe el efecto sobre la producción de azúcar a partir de los cambios en el área cultivada y el rendimiento agrícola de la caña¹² cuando

¹² Los cambios en el área cultivada se deben al ajuste de decisiones de uso de la tierra tomado por los agricultores.

los pronósticos de ENOS son emitidos. Por último, se incluyó una restricción de complementariedad para que las decisiones óptimas de uso de la tierra no superen el registro máximo histórico de área cultivable (ecuación (17)).

Dado que cada año es posible la presencia de alguna de las fases de ENOS, el modelo arroja un promedio anual ponderado de los beneficios¹³ para cada nivel de predicción. El primer componente de las simulaciones del modelo es la solución del caso base. Éste es el valor óptimo del excedente económico en las condiciones corrientes. Tal resultado se compara con las soluciones óptimas encontradas a partir de los pronósticos del fenómeno ENOS, para derivar los cambios en el bienestar asociados con el sistema de alerta temprana de ENOS.

El artículo también evalúa la sensibilidad del modelo a las probabilidades de ocurrencia del fenómeno ENOS. La frecuencia de estos episodios se modifica de acuerdo con la incidencia futura del fenómeno de cambio climático del planeta, mostrando los posibles efectos sobre el valor de la predicción de ENOS y el bienestar. Los productos más importantes del modelo de excedente económico son los valores óptimos de la función objetivo, los cambios en el área cultivada y cambios en las magnitudes esperadas de variables como la producción de azúcar, las cuasi rentas del productor, el excedente del consumidor nacional y la participación de Colombia en el mercado exterior.

El valor de la predicción del fenómeno ENOS está fundamentado en siete supuestos principales:

1. Los agricultores son conscientes del impacto que el fenómeno ENOS genera sobre el rendimiento agrícola de la caña. En este sentido, las decisiones de producción del agricultor se reflejan en el ajuste del área de tierra cultivable para caña de azúcar. Así, los cambios en el bienestar económico de productores y consumidores de azúcar ocurren por alteraciones en la producción de caña motivo del ajuste de esta decisión de manejo.

¹³ Estos beneficios corresponden a un valor esperado a largo plazo.

2. Los episodios ENOS ocurren periódicamente con la siguiente frecuencia: 29% de las veces la fase El Niño, 48 % del tiempo la fase normal y 23% de los casos el estado La Niña¹⁴. A estos valores se les llama probabilidades corrientes del fenómeno ENOS.
3. Los agricultores no están completamente desinformados cuando no hay predicción del fenómeno ENOS (caso base). Por tanto, los productores toman la distribución de probabilidades relacionada con el pasado de los eventos ENOS. Así, $p(s/x)$ es igual a 12/52 (0,23), 15/52 (0,29) y 25/52 (0,48) para las fases ENOS La Niña, El Niño y normal, respectivamente.
4. La habilidad de predicción o exactitud del pronóstico. En este trabajo se consideran tres niveles de la habilidad de predicción del fenómeno ENOS: baja, alta y perfecta. Una predicción baja, alta y perfecta asume que los pronósticos climáticos tienen una exactitud del 40%, 70% y 100% para cada estado s de ENOS. Las probabilidades posteriores $p(s/x)$ para las habilidades de predicción se consignan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Matrices de probabilidad conjunta $p(s/x)$ para tres tipos de habilidad de predicción del fenómeno ENOS.

Baja			
	S=E	S=V	S=N
X=E	0,35	0,21	0,44
X=V	0,27	0,28	0,45
X=N	0,25	0,20	0,55
Alta			
	S=E	S=V	S=N
X=E	0,66	0,11	0,23
X=V	0,16	0,58	0,26
X=N	0,11	0,08	0,81
Perfecta			
	S=E	S=V	S=N
X=E	1,00	0,00	0,00
X=V	0,00	1,00	0,00
X=N	0,00	0,00	1,00

¹⁴ Estas probabilidades se calcularon con base en la lista de episodios El Niño, La Niña y normal desde 1950 al 2001 reportada por NOAA (2003).

5. El costo de pronósticos equivocados de ENOS para el sector azucarero, respecto a los beneficios, sigue una distribución uniforme entre el 1% y 3%¹⁵. Este supuesto permite el cálculo de una medida estadística de la variabilidad (desviación estándar) del valor económico de la predicción de ENOS a pronósticos errados.
6. La frecuencia futura de los episodios ENOS de acuerdo con la incidencia del fenómeno de cambio climático global es 34% para el evento El Niño, 31% para la fase La Niña y 35% para el estado normal¹⁶. Estas frecuencias han sido reportadas in Timmermann *et al.* (1999)¹⁷.
7. La tasa de adopción de la información proveída por el SAT de ENOS. Inicialmente se asume que todos los agricultores toman ventaja de los pronósticos emitidos por el SAT. No obstante, dado que también es razonable pensar que no todos los agricultores pueden ajustar sus decisiones, se consideran dos esquemas de la tasa de adopción de la información¹⁸: uno donde solo el 20% de los productores toman ventaja del SAT y otro en el que únicamente el 50% de ellos pueden hacerlo.

B. Modelos econométricos y la función de rendimiento agrícola de caña de azúcar

El esquema modelado requiere la estimación de ecuaciones como la función de consumo nacional de azúcar, la función de exceso de demanda de exportaciones de azúcar, la función costo total de producción de azúcar y la función de rendimientos agrícolas para la caña. Esta última función mide la reacción del rendimiento agrícola de la caña de azúcar a los eventos El Niño, La Niña y normal del fenómeno ENOS, mientras las restantes caracterizan de manera general el mercado del azúcar colombiano.

¹⁵ Los porcentajes relacionados con este supuesto y la metodología de distribución uniforme han sido sugeridos en el estudio de Ducci (2002) para efectuar análisis de riesgo.

¹⁶ Estas frecuencias manifiestan que a largo plazo la ocurrencia de años El Niño y La Niña se incrementará, de modo que los estados de ENOS tienden a presentarse con la misma periodicidad.

¹⁷ Timmermann *et al.* (1999) calcularon estas probabilidades asumiendo los niveles crecientes de gases invernadero bajo las proyecciones IPPC (1992).

¹⁸ La tasa de adopción del SAT por los agricultores refleja en cierto modo el grado de rigidez en adoptar medidas mitigatorias frente al fenómeno ENOS.

La especificación de los modelos econométricos es la siguiente:

$$CONS_i = f(PA_i, PP, PIB), \quad i = 1, 2 \quad (18)$$

$$Z_i = f(PAI_i) \quad i = 1, 2 \quad (19)$$

$$CTA = f(Q_T, Q_T^2), \quad (20)$$

Donde i corresponde al tipo de producto (azúcar blanco y azúcar crudo); $CONS_i$ es el consumo nacional de azúcar i ; PA_i es el precio nacional de azúcar i ; PP el precio nacional de la panela; PIB es el producto interno bruto per cápita nacional¹⁹; Z_i es el exceso de demanda de exportaciones del azúcar colombiano i ; PAI_i es el precio internacional del azúcar i ; CTA es el costo total nacional de producción de azúcar; Q_T es la producción nacional de azúcar²⁰ de los ingenios; y Q_T^2 es el cuadrado de la producción.

Las funciones de demanda y exceso de demanda representadas por las ecuaciones (18) y (19) son funciones lineales de variables explicativas exógenas (PA_i , PP , PIB y PAI_i , respectivamente). Estas expresiones conforman dos sistemas de ecuaciones de demanda de bienes, los cuales se estimaron según el método de sistema de regresiones aparentemente no relacionadas (SUR). Esta técnica se utiliza porque la correlación entre los errores de las diferentes ecuaciones del sistema puede proveer enlaces importantes en la estimación (Wooldridge, 2002). Las ecuaciones (18) y (19) se utilizan para obtener el sistema de funciones inversa de demanda nacional de azúcar y el sistema de funciones inversa de exceso de demanda de exportaciones colombianas de azúcar. Estas expresiones son importantes en el análisis para evaluar cómo los cambios en la oferta de azúcar afectarán el bienestar de los consumidores nacionales y la participación de Colombia en el mercado externo.

Por otro lado, la ecuación (20) estima el costo total de producción de azúcar colombiano. Esta función desempeña un papel relevante en el modelo de

¹⁹ Esta variable se usa como una *proxy* del ingreso nacional per cápita.

²⁰ Aquí la producción de azúcar es agregada (azúcar blanco + azúcar crudo).

excedente económico, pues ayuda a determinar la magnitud de las cuasi rentas de los ingenios azucareros. En la ecuación (20), el costo total de producción de azúcar es una función cuadrática del nivel de producto. No se incluyen otras variables explicativas debido a que se asumen precios constantes de los insumos. Esta especificación se utiliza comúnmente para bienes agrícolas²¹. Dado que las variables Q_T y Q_T^2 son exógenas en la ecuación (20) y se supone que no existe relación lineal entre ellas, la estimación se lleva a cabo por el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) (Greene, 1998).

Finalmente, el impacto del fenómeno ENOS sobre el rendimiento agrícola de la caña de azúcar se estimó usando un modelo biométrico, el cual se presenta a continuación:

$$\begin{aligned}
 LTCH_{it} = & C_i + \beta_1 + \beta_2 LEC_{it} + \beta_3 LAREA_i + \beta_4 NINOA_t + \beta_5 NINAA_t \\
 & + \beta_6 LMM_T_{it} + \beta_7 LRIEGO_{it} + e_{it}
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Donde $LTCH_{it}$ es el logaritmo natural de toneladas de caña de azúcar por hectárea²²; LEC_{it} es el logaritmo natural de la edad de corte de la caña de azúcar; $LOREA_i$ es el logaritmo natural del área de la parcela; $NINOA_t$ es la variable *dummy* que representa el efecto de la fase El Niño sobre el rendimiento agrícola; $NINAA_t$ es la variable *dummy* que mide el impacto de la fase La Niña sobre el rendimiento agrícola; LMM_T_{it} es el logaritmo natural de la precipitación máxima diaria; y $LRIEGO_{it}$ es el logaritmo natural del riego promedio diario utilizado por parcela.

La ecuación (21) representa de manera general las características agronómicas de la caña de azúcar en las fases del fenómeno ENOS: El Niño, La Niña y normal. El modelo biométrico especificado es una función log-log²³, donde los parámetros β_2 , β_3 , β_6 y β_7 representan

²¹ Según el cumplimiento de los supuestos de la teoría de la producción, la especificación cuadrática representa estricta convexidad y costos marginales de producción crecientes. Estas condiciones son fundamentales en el proceso de maximización de beneficios para garantizar la existencia de un máximo global único.

²² En este artículo se entiende por rendimiento agrícola de la caña de azúcar el número de toneladas caña por hectárea.

²³ Las variables *dummy* no son transformadas en logaritmos.

directamente las elasticidades del rendimiento agrícola a la edad de corte, el área de la parcela, la precipitación máxima diaria y el riego diario promedio, respectivamente. El impacto porcentual del fenómeno ENOS sobre el rendimiento agrícola de la caña de azúcar corresponde a los parámetros β_4 y β_5 . Nótese que la magnitud de los efectos de ENOS son identificados a nivel de parcela, controlados por las variables ya mencionadas que también alteran el rendimiento agrícola de la caña de azúcar. La ecuación (21) se estimó por el método de datos panel con efectos aleatorios, dado que el efecto no observado para cada parcela (C_i) se supone no correlacionado con el término de error (Wooldridge, 2002).

IV. Base de datos, fuentes de información y construcción de variables

La información para el desarrollo del trabajo se obtuvo de varias fuentes en Colombia y el exterior. En general, se manejaron dos grupos de datos: (1.) aquellos que permitieron construir el modelo de sector azucarero (datos de consumo nacional, exportaciones, importaciones, precios nacionales e internacionales del azúcar, costos de producción de azúcar, entre otros) y (2.) los que sirvieron para estimar el efecto de ENOS sobre el rendimiento agrícola de la caña (toneladas de caña por hectárea, riego, área, lista de episodios El Niño, La Niña y normal, etcétera). En la estimación del sistema de ecuaciones de demanda nacional de azúcar y el sistema de funciones de exceso de demanda de exportaciones colombianas de azúcar se utilizó la siguiente información:

- Los datos de consumo nacional, importaciones totales y exportaciones de azúcar blanco y azúcar crudo fueron tomados del anexo estadístico del *Informe anual de Asocaña 2000-2001* (2001). Esta información relaciona datos anuales desde 1980 al 2000 para la producción total y el consumo nacional de azúcar blanco y el azúcar crudo. Aunque se reportan valores anuales agregados de exportaciones e importaciones de azúcar también en este mismo período, sólo fue posible discriminar la información para azúcar crudo y azúcar blanco de 1990 al 2000. Toda la información se presenta en toneladas²⁴.

²⁴ En particular, toneladas métricas valor crudo (tmvc). Ésta se utiliza como una unidad de medida internacional para el azúcar.

- El Sistema de Información de Precios del Sector Agropecuario (SIPSA) del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - Corporación Colombia Internacional (CCI), proporcionó los precios del azúcar y la panela. Los datos incluyen información mensual del precio regional a mayorista del azúcar y de la panela en pesos por kilogramo desde 1996 al 2000. De la Bolsa de Londres se obtuvo el precio internacional (US\$/tonelada) para el azúcar blanco (Contrato 5) y de la Bolsa de Nueva York el precio internacional (US\$ cent/libra) para el azúcar crudo (Contrato 11). La serie de datos (1990-2000) reporta el precio promedio mensual de cierres diarios de cada mercado. Los valores anuales promedio de estos precios han sido calculados por Asocaña (2001).
- Del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) se tomaron datos del producto interno bruto anual colombiano (1980-2000) a precios corrientes, la población anual nacional (1980-2000), el índice de precios al consumidor para alimentos agrícolas procesados (1980-2000), el índice de precios al consumidor total nacional ponderado (1980-2000) y el índice de precios al productor (1998-2000). El deflactor implícito del PIB (1995=100) se extrajo de *International Financial Statistics Yearbook 2001* y la tasa de cambio nominal promedio a diciembre en \$/US\$, período 1990-2001 del Banco de la República - Subgerencia de Estudios Económicos.
- Para estimar los costos de producción de azúcar se tomó la información que aparece en Posada *et al.* (2002)²⁵ sobre producción y costos totales de azúcar de un ingenio piloto por condición de molienda de caña. Esta información está relacionada con rangos de precipitación acumulada de los últimos cinco días previos a la molienda. Así, los costos y el nivel de producción de azúcar incorporan información climática. Los datos de costos (pesos colombianos) y producción (quin-tales) en Posada *et al.* (2002) corresponden a información de 1998. Dado que el estudio de Posada *et al.* (2002) representa la estructura típica de costos de producción de azúcar de un ingenio, se construyeron las variables de costo total nacional y producción agregada a lo largo de trece ingenios del sector azucarero.

²⁵ Se presentan tres condiciones de molienda de caña: favorable, normal y desfavorable. La condición favorable y desfavorable corresponden al promedio de la tasa de molienda de caña del proceso productivo más o menos una desviación estándar, respectivamente.

- Otra información importante relacionada con costos de producción fue “Costos en campo, cosecha y fábrica por hectárea para plantilla por época según labores, procesos principales y sistemas de cosecha”²⁶. Estos datos fueron tomados del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña) y permitieron desagregar los costos de producción de azúcar de acuerdo con la etapa productiva: 45%, 32% y 23% para las unidades campo, cosecha y fábrica. Todos los procesos de producción relacionados con la producción de caña como la siembra, fertilización, el mantenimiento del cultivo, entre otros, corresponden a la unidad de negocio campo. El corte, alce y demás actividades hasta la previa molienda de caña se denomina unidad de negocio cosecha; finalmente, el proceso de elaboración del azúcar hasta su empaque representa la unidad de negocio fábrica. Con esta desagregación se separaron los cambios en bienestar para cada etapa productiva con base en el mejoramiento de la predicción de ENOS.

Con base en la información anterior, en el sistema de ecuaciones de demanda nacional de azúcar y la función de costos de producción de azúcar, las variables monetarias en pesos colombianos corrientes se deflactaron usando el índice de precios correspondiente para cada variable (IPC para precios del azúcar y la panela, deflactor implícito para el PIB y el IPP para los costos de producción de azúcar²⁷), usando como período base el 2000. Siguiendo este mismo enfoque, en el sistema de ecuaciones de exceso de demanda de exportaciones de azúcar, los precios en dólares fueron convertidos a pesos colombianos corrientes usando la tasa de cambio nominal promedio; posteriormente, estas magnitudes se pasaron a precios constantes del 2000 usando el índice de precios al consumidor.

Respecto al modelo biométrico, una parte de los datos utilizados se obtuvo del Sistema de Información para el Manejo de la Caña Específico por Sitio (SIMCES) de Cenicaña. De esta fuente se tomó información anual de 14 parcelas para el período 1991-2000 de variables como la edad de corte de la caña (años), el riego promedio diario (mm), toneladas caña por hectárea, área cultivada (ha.) y precipitación máxima diaria (mm). Estos

²⁶ Cifras en pesos colombianos del 2000.

²⁷ IPC es el índice de precios al consumidor y el IPP es el índice de precios al productor.

datos muestran información de la hacienda Balsora, Ingenio Mayagüez. Este ingenio representa aproximadamente el 7% de todos los ingenios del país²⁸.

La otra parte de la información para estimar el modelo biométrico correspondió a la lista de episodios ENOS. Estos datos fueron tomados de NOAA (2003) y permitieron, además de calcular las probabilidades corrientes de ocurrencia del fenómeno ENOS, construir las variables $NINO_t$ y $NINAA_t$, de la función de rendimiento agrícola de la caña de azúcar. NOAA (2003) reporta los episodios en períodos trimestrales desde 1950 al 2001, clasificándolos en fase caliente (El Niño), fase fría (La Niña) y fase normal, con base en las anomalías de temperatura de la superficie del océano Pacífico tropical a lo largo de la línea del ecuador desde los 150° oeste. Todo el proceso de clasificación llevado a cabo por NOAA (2003) tiene en cuenta el análisis de la información producida por el Centro Nacional para la Predicción Ambiental de Estados Unidos y la Oficina Meteorológica del Reino Unido.

Para presentar los episodios en períodos anuales fue necesario usar el siguiente criterio: cuando la fase caliente se presenta durante seis meses consecutivos incluyendo octubre a diciembre, el año se clasifica como episodio El Niño; del mismo modo, si la fase fría continúa durante seis meses consecutivos incluyendo octubre a diciembre, el año se clasifica como episodio La Niña; por último, los otros años fueron clasificados como año normal. A continuación se muestra esta clasificación.

Cuadro 2. Estados del fenómeno ENOS (1950 - 2001) clasificados por año.

La Niña			Normal					El Niño		
1950	1971	1998	1951	1961	1970	1980	1989	1957	1972	1991
1954	1973	1999	1952	1962	1976	1981	1995	1958	1982	1992
1955	1974		1953	1966	1977	1983	1996	1963	1986	1993
1956	1975		1959	1967	1978	1984	2000	1965	1987	1994
1964	1988		1960	1968	1979	1985	2001	1969	1990	1997

²⁸ Se comprobó que no existe sesgo de selección mediante una prueba de hipótesis. El procedimiento arrojó un t estadístico de $-1,34$ y p -valor de $0,18$ para la diferencia de medias relacionada con la variable toneladas caña por hectárea entre una muestra aleatoria del resto de ingenios y los datos correspondientes al Ingenio Mayagüez.

Las variables $NINOA_t$ y $NINAA_t$, en el modelo biométrico, se construyeron así: $NINOA_t$, variable *dummy*, que toma el valor de 1 si dos o más trimestres consecutivos previos a la fecha de corte de la caña de azúcar fueron evento El Niño, y 0 en otro caso. $NINAA_t$, variable *dummy*, que toma el valor de 1 si dos o más trimestres consecutivos previos a la fecha de corte de la caña fueron estado La Niña, y 0 en otro caso. Las estadísticas descriptivas de estas variables y las relacionadas con los modelos de demanda nacional de azúcar, exceso de demanda de exportaciones de azúcar y costos de producción se presentan en el anexo 1, cuadros A1, A2 y A3.

V. Resultados

El orden de la presentación de los resultados es el siguiente: (1) se muestra la estimación de los modelos econométricos y la función de rendimiento agrícola de la caña de azúcar; (2) los resultados de área óptima y producción esperada a partir del modelo de programación matemática estocástica; (3) el valor económico de la predicción derivado de los pronósticos de ENOS.

Respecto al sistema de ecuaciones de demanda nacional de azúcar presentado en el cuadro 3, el modelo econométrico²⁹ estimado muestra una relación inversa entre el consumo de azúcar blanco ($CONSB$) y su precio propio (PAB). También se observa una relación de esta naturaleza en la ecuación de consumo de azúcar crudo ($CONSCR$ y PAC). Por otro lado, se evidencia una relación positiva entre el consumo de azúcar blanco y variables como el PIB per cápita (PIB) y el precio de la panela (PP)³⁰. Esto permite concluir que la panela y el azúcar blanco son bienes sustitutos respecto al consumo. De acuerdo con la ecuación de azúcar crudo, los resultados demuestran que el incremento en el consumo de este tipo de azúcar en el período anterior $CONSCR(-1)$ aumenta el consumo presente, reflejando la existencia de inercia sobre las cantidades demandadas de azúcar crudo.

²⁹ Las cantidades consumidas están en toneladas y los precios en pesos por tonelada.

³⁰ Las variables PIB y PP no aparecen en la ecuación de consumo nacional de azúcar crudo, debido a que cuando el modelo se estima con ellas, resultan no significativas y no cuentan con los signos esperados.

Cuadro 3. Estimación de las ecuaciones de demanda nacional de azúcar mediante SURE ^a.

Variable	Variable dependiente (consumo)	
	CONSB	CONSCR
Constante	613650 (3,3810)***	271622 (2,5095)**
PAB	-0,3744 (-1,9224)*	
PP	0,3949 (2,1837)**	
PAC		-0,2335 (-2,2852)**
PIB	0,1198 (2,9029)***	
CONSCR(-1)		1,0963 (5,0655)***
TENDB	7215 (2,0802)**	
TENDC		-2914 (-2,0599)**
R ²	0,85	0,61
R ² ajustado	0,81	0,51
F estadístico	22,09	6,33
Probabilidad (F)	0,000004	0,008071
n.R ² (White) ^b	16,78	9,41
n.R ² (Breusch-Godfrey) ^b	0,51	3,8

^a Los t-estadísticos aparecen entre paréntesis.

^b n.R² (White) es el estadístico de la prueba de heterocedasticidad de White y n.R² (Breusch-Godfrey) es el estadístico de prueba LM de correlación serial.

* Significativo al 10%.

** Significativo al 5%.

*** Significativo al 1%.

Los resultados del modelo (véase cuadro 3) fueron consistentes con la teoría económica en los signos esperados de las variables fundamentales (precios e ingreso); todas las variables resultaron estadísticamente significativas y, además, se cumplen los supuestos del modelo de regresión (homoscedasticidad, independencia lineal, normalidad y no correlación de los errores). Puede notarse que la ecuación de consumo de azúcar blanco arroja mejores resultados en términos de bondad de ajuste. Las variables *TENDB* para el azúcar blanco y *TENDC* para el azúcar crudo corresponden a la tendencia del consumo para cada tipo de producto. Estas se incorporaron para mejorar el ajuste de la estimación.

Respecto al modelo econométrico de ecuaciones de exceso de demanda de exportaciones colombianas de azúcar³¹ (véase cuadro 4), los precios (*PLB* y *PNYC*) mostraron una relación negativa y estadísticamente significativa con el exceso de exportaciones para el azúcar blanco y el azúcar crudo, respectivamente (*ZB* y *ZC*). También se identificó una inercia positiva en el caso del azúcar crudo.

Aunque el modelo (véase cuadro 4) presenta validez teórica, el ajuste de los resultados es más bajo que el logrado con el sistema de ecuaciones de demanda nacional. Esto manifiesta la posible existencia de otras variables que pueden afectar el exceso de exportaciones y no fueron incorporadas. Las pruebas estadísticas sobre no violación de los supuestos del modelo de regresión arrojó resultados satisfactorios.

Cuadro 4. Estimación de las ecuaciones de Exceso de demanda de exportaciones colombianas de azúcar mediante SURE ^a.

Variable	Variable dependiente (exc. exportaciones)	
	<i>ZB</i>	<i>ZC</i>
<i>Constante</i>	575987 (9,5269) ***	634191 (2,0574) **
<i>PLB</i>	-0,427 (-4,8757) ***	
<i>PNYC</i>		-0,7583 (-1,4980) *
<i>ZC(-1)</i>		0,3258 (-1,1350)
<i>R</i> ²	0,66	0,42
<i>R</i> ² ajustado	0,63	0,27
<i>F</i> estadístico	19,7	3,21
Probabilidad (<i>F</i>)	0,0013	0,1036
<i>n.R</i> ² (White) ^b	1,00	5,97
<i>n.R</i> ² (Breusch-Godfrey) ^b	0,17	1,18

^a Los *t*-estadísticos aparecen entre paréntesis.

^b *n.R*² (White) es el estadístico de la prueba de heterocedasticidad de White y *n.R*² (Breusch-Godfrey) es el estadístico de prueba LM de correlación serial.

* Significativo al 20%.

** Significativo al 5%.

*** Significativo al 1%.

³¹ El exceso de demanda de exportaciones está en toneladas y los precios en pesos por tonelada.

Por otro lado, el modelo econométrico de costos de producción (*CTA*)³² (véase cuadro 5), arrojó estimaciones consistentes con la teoría económica de producción. En particular, se aprecia un crecimiento suave de los costos marginales³³ (coeficiente de QT^2). El modelo de costos de producción tiene la mejor bondad de ajuste entre los modelos econométricos estimados, satisface los supuestos del modelo de regresión³⁴ y presenta alta relevancia estadística en las variables.

Cuadro 5. Estimación de la función de costo total de producción de azúcar mediante MCO ^a.

Variable	<i>CTA</i>
<i>Constante</i>	4,66E+10 (2,6200) **
<i>QT</i>	534058 (27,5912) ***
<i>QT²</i>	0,04588 (10,3647) ***
<i>R²</i>	0,99
<i>R² ajustado</i>	0,99
<i>F Estadístico</i>	58262
<i>Probabilidad (F)</i>	0,00
<i>n.R² (White) ^b</i>	4,76
<i>n.R² (Breusch-Godfrey) ^b</i>	1,37

^a Los *t*-estadísticos aparecen entre paréntesis.

^b *n.R² (White)* es el estadístico de la prueba de heterocedasticidad de White y *n.R² (Breusch-Godfrey)* es el estadístico de prueba LM de correlación serial.

* Significativo al 10%.

** Significativo al 5%.

*** Significativo al 1%.

Por último, los resultados del modelo biométrico (véase cuadro 6) muestran una relación inversa y fuertemente significativa entre el rendimiento agrícola (*LTCH*) y las variables: área de la parcela (*LAREA*), la precipitación máxima diaria (*LMM _ T*) y la presencia de episodios El Niño (*NINO A*) y

³² Los costos aparecen en pesos y el nivel de producción en toneladas.

³³ Debido a la investigación adelantada por más de 20 años, hoy día el sector azucarero colombiano cuenta con uno de los mayores índices de productividad y eficiencia del mundo (Asocaña, 2001).

³⁴ Inicialmente, el modelo presentó autocorrelación de orden 1, pero a través del método Cochrane-Orcut ésta fue corregida.

La Niña (*NINAA*). Respecto al área cultivada, un incremento de ésta en el 1% disminuye en promedio el rendimiento agrícola en 0,05%; esto manifiesta que las nuevas hectáreas que se incorporan para el cultivo de caña son menos productivas. Precipitaciones de alta intensidad también suelen afectar el rendimiento, y en cuanto a la ocurrencia de los eventos El Niño y La Niña, esas fases impactan parcialmente la producción de caña de azúcar por hectárea en -12,5% y -8,7%, respectivamente. Además, se encontró que el incremento de la edad de corte de la caña y el mejoramiento del riego aumentan el rendimiento agrícola. Existe alta bondad de ajuste y todas las variables del modelo cuentan con alta relevancia estadística. Se encontró que el impacto promedio agregado sobre el rendimiento agrícola (luego de acumular el efecto de factores como el riego, precipitación y edad de corte) es -6,5% a causa del episodio El Niño y -4,3% debido a la fase La Niña, respecto a un año normal.

Cuadro 6. Estimación de la función de rendimiento agrícola de la caña de azúcar mediante efectos aleatorios (datos panel) ^a.

Variable	<i>LTCH</i> ^b
Constante	3,7916 (1,4872)***
<i>LEC</i>	0,8323 (8,4364)***
<i>LAREA</i>	-0,0538 (-3,3463)***
<i>NINOA</i>	-0,1254 (-6,6844)***
<i>NINAA</i>	-0,0865 (-3,5706)***
<i>LMM_T</i>	-0,4221 (-1,0510)***
<i>LRIEGO</i>	0,1874 (7,1690)***
<i>R</i> ²	0,76
<i>LM</i> estadístico ^c	4,55
Probabilidad (<i>LM</i>)	0,03

^a Los *t*-estadísticos aparecen entre paréntesis.

^b La variable dependiente y las variables independientes (excepto *NINOA* y *NINAA*) se encuentran en logaritmos.

^c *LM* es el estadístico que permite comparar los resultados de Pooled *OLS* con efectos aleatorios.

* Significativo al 10%.

** Significativo al 5%.

*** Significativo al 1%.

Los resultados de área bajo cultivo, producción esperada, el valor económico de la predicción de ENOS y las medidas de bienestar se obtuvieron por programación matemática estocástica, usando el algoritmo *qnewton* creado por Miranda y Fackler (2000) para Matlab. El área total de cultivo encontrada en el caso base con las probabilidades corrientes de ocurrencia de ENOS (162.646 ha.³⁵) es similar al promedio histórico entre 1980 y 2001 (154.748 ha.); aunque el área se incrementó en el 5% respecto a este promedio, no supera el área máxima cultivada el país, la cual es 188.362 ha. Por otro lado, cuando los agricultores usan la información de predicción de ENOS (exactitud del 40%, 70% y 100%) proveída por un sistema de alerta temprana, el área bajo cultivo se incrementa en promedio en 592 ha. (aproximadamente el 0,4%). Este aumento en el área ocurre debido a que se reduce la incertidumbre. El pequeño porcentaje encontrado puede interpretarse como el resultado de la existencia de restricciones de tipo físico, técnico y económico en la toma de decisiones de uso de la tierra.

La producción esperada de azúcar en todos los casos se encontró dentro del rango histórico (1980-2001). Por ejemplo, en el caso base y las probabilidades corrientes de ocurrencia de ENOS, la producción esperada es 2'155.300 toneladas de azúcar, muy cerca del valor máximo de los últimos 20 años (2'391.324 toneladas). Los resultados muestran que el uso de la información de pronósticos de ENOS, para una predicción baja, alta y perfecta, conducen a un incremento en la producción nacional esperada del 1%, 0,6% y 0,1%, respectivamente, en relación con el caso base. En el cuadro 7 se presentan las estimaciones generales de la variable producción esperada.

Cuadro 7. Efecto en la producción esperada de azúcar por cambio en la frecuencia de ENOS (toneladas).

Habilidad de la predicción	Probabilidades corrientes ^a	Probabilidades GEI ^b	Efecto por cambio en la frecuencia del ENOS	Cambio (%) respecto a probabilidades corrientes
Perfecta (100%)	2'177.000	2'155.400	-21600	-0,99%
Alta (70%)	2'167.400	2'144.700	-22700	-1,05%
Baja (40%)	2'157.700	2'133.600	-24100	-1,12%
Sin información	2'155.300	2'131.000	-24300	-1,13%
Efecto promedio debido al cambio en la frecuencia del ENOS				-1,07%

^a Probabilidades de los episodios ENOS dadas por su ocurrencia histórica (1950-2001).

^b Probabilidades de los episodios ENOS de acuerdo con las proyecciones de incremento de gases invernadero.

³⁵ ha.= hectárea, unidad de medida de superficie.

En el cuadro 7 se observa que el cambio en la frecuencia de ENOS de acuerdo con la incidencia futura del fenómeno de cambio climático tiene consecuencias sobre la producción nacional de azúcar. Este impacto representa en promedio una caída del 1,07% en la producción esperada respecto a las condiciones de probabilidades corrientes.

A partir del modelo de excedente económico se obtuvieron los valores óptimos de la función objetivo que representan el bienestar económico³⁶ para varios niveles de predicción del fenómeno ENOS. Estos resultados se presentan principalmente en dólares con el objeto de que sean comparables a nivel internacional. En este sentido, cuando se tienen en cuenta las condiciones corrientes de ocurrencia del fenómeno ENOS, los valores anuales de la función objetivo son: US\$ 951,17 millones para el caso base o escenario no pronóstico, US\$ 952,24 millones para predicción baja (40% de exactitud del pronóstico), US\$ 956,52 millones para predicción alta (70% de exactitud del pronóstico) y US\$ 960,76 millones para predicción perfecta (100% de exactitud del pronóstico). El valor económico de la predicción de ENOS se presenta en el cuadro 8.

Cuadro 8. Valor económico anual esperado de la predicción del fenómeno ENOS de acuerdo con las probabilidades corrientes^a de ocurrencia de ENOS (millones de US\$ del 2000)^b.

Habilidad de la predicción	Valor económico de la predicción	Desviación estándar	Participación del valor económico de la predicción respecto al valor óptimo de la función objetivo ^c	Participación del valor económico de la predicción respecto al PIB del sector ^d
Perfecta (100%)	9,59	2,78	1,01%	1,09%
Alta (70%)	5,35	1,54	0,56%	0,61%
Baja (40%)	1,08	0,31	0,11%	0,12%

^a Probabilidades de los episodios ENOS dadas por su ocurrencia histórica (1950-2001).

^b Se usó la tasa de cambio nominal promedio a diciembre del 2000 (\$2.186,21 / 1 US\$).

^c Respecto al valor óptimo de la función objetivo del caso base.

^d Corresponde al PIB del sector en el 2000.

³⁶ Para presentar los resultados en valor económico, las medidas de bienestar en valores de mercado se ajustaron por las razones precios de cuenta (RPC) de la divisa (1,18), de la caña de azúcar (0,88), y fabricación y refinación de azúcar (0,85). Las RPC fueron tomadas de Cervini (1990).

Así, el valor económico de una predicción perfecta de ENOS para el sector azucarero colombiano alcanza los US\$ 9,59 millones anuales con una desviación estándar de US\$ 2,78. Esta medida de estadística muestra en promedio una variabilidad del 29%³⁷ para el valor económico de predicción asociada con los costos de pronósticos equivocados. Las predicciones imperfectas arrojaron valores económicos del pronóstico de ENOS inferiores. Las columnas 4 y 5 de izquierda a derecha del cuadro 8 se calcularon para mostrar la validez de los resultados del modelo de excedente económico. Puede observarse que la participación del valor económico para cada nivel de predicción de ENOS respecto al valor de la función objetivo del caso base es aproximadamente igual a la participación del valor económico respecto al PIB (US\$ 861 millones) del sector azucarero en el año 2000. Para la predicción perfecta tal participación corresponde al 1,01% de la función objetivo del caso base. Al parecer, la experiencia acumulada en investigación y los estándares de eficiencia del sector azucarero colombiano hacen que esta participación sea inferior a la encontrada por Adams *et al.* (2001) (2,5% para la agricultura mexicana) y Costello, Adams y Polasky (1998) (1,5% para el salmón del *coho* en Estados Unidos).

Por otro lado, cuando la frecuencia de los episodios ENOS es modificada de acuerdo con la incidencia futura del fenómeno de cambio climático (véase cuadro 9.) el valor económico anual de la predicción de ENOS para cada nivel de exactitud del pronóstico asciende a US\$ 10,77 millones para predicción perfecta, US\$ 6,04 millones para predicción alta y US\$ 1,13 millones para predicción baja (un incremento promedio del 10,3% en relación con las probabilidades corrientes); sus desviaciones estándar respectivamente son: US\$ 3,74 millones, US\$ 2,08 millones y US\$ 0,37 millones. La variabilidad promedio del valor económico de la predicción se incrementa en 34%. Estos resultados muestran que el sector azucarero en promedio valoraría económicamente más la información de predicción debido a la incidencia futura del fenómeno de cambio climático; sin embargo, existe un aumento en la variabilidad (34% contra 29%) de tal valoración que podría explicarse por el hecho que en esta nueva situación es más costoso equivocarse.

³⁷ Este valor es el coeficiente de variación ((desviación estándar / media) * 100).

Cuadro 9. Valor económico anual esperado de la predicción del fenómeno ENOS de acuerdo con las probabilidades GEI^a de ocurrencia de ENOS (millones de US\$ del 2000)^b.

Habilidad de la predicción	Valor económico de la predicción	Desviación estándar	Participación del valor económico de la predicción respecto al valor óptimo de la función objetivo ^c	Participación del valor económico de la predicción respecto al PIB del sector ^d
Perfecta (100%)	10,77	3,74	1,15%	1,22%
Alta (70%)	6,04	2,08	0,64%	0,69%
Baja (40%)	1,13	0,37	0,12%	0,13%

^a Probabilidades de los episodios ENOS de acuerdo con las proyecciones de incremento de gases invernadero.

^b Se usó la tasa de cambio nominal promedio a diciembre del 2000 (\$2.186,21 / 1 US\$).

^c Respecto al valor óptimo de la función objetivo del caso base.

^d Corresponde al PIB del sector en el 2000.

Respecto a la distribución del bienestar económico, el mejoramiento de la predicción de ENOS indicó ganancias para los consumidores nacionales de azúcar, la participación de Colombia en el mercado exterior azucarero y los productores de azúcar; este incremento fue del 72%, el 21% y el 7%, respectivamente (véase cuadro 10). De acuerdo con lo anterior, dado que Colombia es un país exportador neto de azúcar, el aumento en la producción incrementa la medida de bienestar para la participación de Colombia en el mercado exterior. Respecto al bienestar de productores, por ejemplo de los US\$ 0,76 millones anuales derivados de la predicción perfecta en las condiciones corrientes de ENOS, US\$ 0,34 millones corresponden a la unidad campo, US\$ 0,24 millones a la unidad cosecha y US\$ 0,17 millones a la unidad fábrica. El cuadro 10 muestra que la incidencia futura del fenómeno de cambio climático global del planeta afecta en promedio el bienestar anual del sector azucarero colombiano en -1,1%, cuando el SAT no es adoptado: consumidores nacionales de azúcar (US\$ -7,6 millones), la participación de Colombia en el mercado exterior azucarero (US\$ -2,3 millones) y los productores de azúcar (US\$ -0,7 millones).

Los resultados anteriores están relacionados con una tasa de adopción anual de la información del 100%, es decir, cuando todos los agricultores sacan provecho de los pronósticos emitidos por el SAT. Debido a la posible rigidez de adoptar medidas mitigatorias frente al fenómeno ENOS, en el cuadro 11. se presenta el valor anual económico de la predicción de ENOS

para el sector azucarero colombiano, según tasas de adopción de la información del 20% y 50%. Este cuadro muestra valores económicos anuales de la predicción de ENOS superiores para el escenario en que se considera las probabilidades de los gases efecto invernadero, respecto al escenario construido a partir de las probabilidades de ocurrencia histórica del ENOS.

Cuadro 10. Distribución promedio por componente del valor económico esperado de la predicción del fenómeno ENOS y efectos ocasionados por cambio en la frecuencia ^a respecto a las probabilidades corrientes ^b.

Componente	Distribución promedio del valor económico	Efectos por cambio en la frecuencia de ENOS	
		Sobre la magnitud del Valor de la información	Sobre el bienestar sin SAT (millones de US\$ del 2000)
Consumidores nacionales	72%	10,40%	-7,6
Participación en el mercado exterior	21%	10,08%	-2,3
Productor	7%	9,80%	-0,7
Efecto promedio por el cambio en la frecuencia del ENOS		10,30%	-10,7

^a Probabilidades de los episodios ENOS de acuerdo con las proyecciones de incremento de gases invernadero.

^b Probabilidades de los episodios ENOS dadas por su ocurrencia histórica (1950-2001).

Cuadro 11. Valor anual de la predicción de ENOS para dos tasas de adopción de la información proveída por el SAT (millones de US\$ del 2000)^a.

Habilidad de la predicción	Probabilidades corrientes ^b		Probabilidades GEI ^c	
	Tasa del 20%	Tasa del 50%	Tasa del 20%	Tasa del 50%
Perfecta (100%)	1,92	4,80	2,15	5,38
Alta (70%)	1,07	2,68	1,21	3,02
Baja (40%)	0,22	0,54	0,23	0,57

^a Se usó la tasa de cambio nominal promedio a diciembre del 2000 (\$2.186,21 / 1 US\$).

^b Probabilidades de los episodios ENOS dadas por su ocurrencia histórica (1950-2001).

^c Probabilidades de los episodios ENOS de acuerdo con las proyecciones de incremento de gases invernadero.

Conclusiones

Se estimó el valor económico de la predicción del fenómeno El Niño Oscilación del Sur ENOS para el sector azucarero colombiano, mediante un modelo biométrico, modelos econométricos de demanda y costo y el modelo de excedente económico. Con la metodología utilizada se pudo mostrar el efecto anual promedio de los episodios ENOS sobre el rendimiento agrícola de la caña de azúcar, sus consecuencias económicas sobre el sector azucarero y el beneficio derivado del mejoramiento de la habilidad de predicción climática.

La ocurrencia de los eventos ENOS sobre el rendimiento agrícola de la caña de azúcar, luego de acumular el efecto de factores como el riego, la precipitación y la edad de corte genera una reducción promedio agregada del 6,5% a causa del episodio El Niño y del 4,3% debido a la fase La Niña, respecto a un año normal. Cuando se usa la distribución de probabilidad de los episodios ENOS dada por el pasado, una predicción perfecta genera un incremento anual promedio en los beneficios del sector de US\$ 9,59 millones con una desviación estándar de US\$ 2,78 millones, y tanto productores como consumidores mejoran su bienestar. Estas ganancias equivalen al 1% del PIB del sector azucarero en el 2000. Predicciones imperfectas conducen a beneficios menores para el sector.

Se confirma la hipótesis de Timmermann *et al.* (1999) acerca de que la alteración en la frecuencia futura del ENOS a causa del fenómeno de cambio climático del planeta tendría repercusiones económicas. Se estimó una caída en el bienestar del sector azucarero de US\$ 10,7 millones relacionada con esta alteración en la frecuencia, cuando el SAT no es adoptado. En esta situación se encontró que el sector en promedio valora económicamente más la información de predicción que en el caso de las probabilidades corrientes de ENOS, pero la varianza de esta valoración se incrementa mostrando que predicciones equivocadas pueden ser más costosas.

La posible ocurrencia de eventos ENOS o cambios en la frecuencia de este fenómeno sustentan la existencia de un valor económico potencial para la predicción de la información climática. La evidencia encontrada en este estudio, de un alto valor económico de la predicción para los agentes económicos del sector azucarero, debe considerarse en la política gubernamental de prevención de desastres, específicamente en lo relacionado con el diseño e implementación de sistemas de alerta temprana. Los impactos negativos del fenómeno ENOS pueden compensarse de acuerdo en el grado de adopción del SAT.

Finalmente se recomienda en un estudio posterior llevar a cabo el análisis costo beneficio (ACB) del SAT. Los resultados del presente artículo son parte de la información primaria requerida para efectuar este procedimiento.

Bibliografía

- ADAMS R., HOUSTON L., MCCARL B., TISCAREÑO M., MATUS J. y WEIHER R. (2001). *The Benefits and Costs of an El Niño Southern Oscillation (ENOS) early Warning System in Mexican Agriculture*. WMO.
- ADAMS R., CHEN C., MCCARL B. and WEIHER R. (1999). "The economic consequences of El Niño and La Niña events for agriculture". *Journal of Climate Research*.
- ASOCAÑA (2001). *Informe anual 2000-2001*. Cali. Web site: www.asocana.org.
- BARRETT, CHRISTOPHER (1998). "The value of imperfect ENOS forecast information: discussion". *American Journal And Agricultural Economics*, 80(5), 1109-1112.
- BID y OMM. (2002). *Marco conceptual para el desarrollo de un sistema nacional de alerta temprana ante el fenómeno de El Niño en los países de América Latina y el Caribe*. Proyecto IDB ATN / JF-6569-RG. Febrero.
- _____ (2002). *Propuesta del Sistema Nacional de Alerta Temprana en Colombia ante el Fenómeno El Niño / Oscilación del Sur*. Proyecto IDB ATN/JF-6569-RG. Agosto.
- _____ (2002). *Propuesta del Sistema Nacional de Alerta Temprana en México ante el Fenómeno El Niño / Oscilación del Sur*. Proyecto IDB ATN/JF-6569-RG. Septiembre.
- CAF. (2002). *El Niño Returns to the Andes*. El Niño Project, Washington D. C.
- CECODES (2003). *Indicadores de Asocaña*. Web site: <http://www.cecodes.org.co/Indicadores/asocana/asocana.htm#top>.

CERVINI, HÉCTOR (1990). *Estimación de precios de cuenta para Colombia*. Proyecto BID-DNP, Washington D.C.

CHEN, C.C. and MCCARL, B.A. (1999). "The value of ENSO information: considerations of uncertainty and trade". *Draft Journal Article Department of Agricultural Economics Texas A. and M. University*.

COSTELLO, C., ADAMS, R. and POLASKY, S. (1998). "The value of El Niño forecasts". *The Management of Salmon: A Stochastic Dynamic Assessment. A.J.A.E.*, 80: 765-777.

DUCCI, JORGE (2002). *El Sistema de Alerta Temprana del Niño. Metodología de medición de beneficios*. Proyecto IDB ATN / JF-6569-RG. Mayo.

GREENE, WILLIAM (1998). *Econometric Analysis*. Third edition, Prentice Hall Inc.

HUNT, B., LIPSMAN, R., ROSENBERG, J., COOMBES, K., OSBORN, J. and STUCK, G. (2001). *A Guide to Matlab for Beginners and Experienced Users*. Cambridge University Press, Cambridge.

IDEAM (2002). *Efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno El Niño en Colombia*. Ministerio del Medio Ambiente, Bogotá, D.C.

IMF (2001). *Financial Statistics Yearbook 2001*. vol. LIV.

IPPC (1992). *Climate Change. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Edited by J. T. Houghton, B. A. Callander and S. K. Varney, Cambridge University Press, Cambridge.

IRI (2002). *ENSO Basics, What are El Niño and La Niña?* Web site: <http://iri.columbia.edu/climate/ENSO.html>.

_____. (2001). *A Climate Information System Plan: Feasibility for ENSO Early Warning in Latin America and the Caribbean*. August.

JUST, R.E., HUETH, D.L. and SCHMITZ, A. (1982). *Applied Welfare Economics and Public Policy*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs N.J.

MATH WORKS, INC. (2001). Web site: www.mathworks.com/products/matlab.

- MCCARL, B., ADAMS, R. and CHEN, C. (2000). "Economic effects of shifts in ENSO event frequency and strength". *Climatic Change*, 49: 1-12.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL (2002). *Plan nacional de contingencia y mitigación de los efectos del fenómeno El Niño en el sector agropecuario*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural Bogotá, D.C.
- MIRANDA, MARIO J. and FACKLER, PAUL L. (2000). *Applied Computational Economics and Finance*. The Ohio State University and North Carolina State University.
- NOAA (2003). *Cold and Warm Episodes by Season*. National Weather Service-National Centers for Environmental Prediction-Climate Prediction Center. Maryland. Web site: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.html.
- POSADA, C., LUNA, C., OROZCO, B., PALMA, A. y MORENO, C. (2002). "Cuánta azúcar producir en forma eficiente en un año". En: *Memorias V Congreso Colombiano de la Asociación de Técnicos de Caña de Azúcar*. Cali.
- SOLOW, A., ADAMS, R., BRYANT, K., LEGLER, D., O'BRIEN, J., MCCARL, B., NAYDA, W. and WEIHER, R. (1998). "The value of improved ENSO prediction to U.S. agriculture". *Climatic Change*, 39:47-60.
- TIMMERMANN, A., OBERHUBER, J., BACHER, A., EACH, M., LATIF, M. and ROECKNER, E. (1999). "ENSO response to greenhouse warming". *Nature*: 694-697.
- WMO (2001). "Evaluation of existing institutional and technical capabilities in Latin America and Caribbean countries to make use of ENSO predictions". October.
- WOOLDRIDGE, JEFFREY M. (2002). *Econometrics Analysis of Cross Section and Panel Data*. MIT Press, Massachusetts.
- ZEBIAK, STEPHEN (1999). "El Niño and the science of climate prediction. A review Assessment". *Consequences* vol. 5, no. 2, 3-15.

Anexo 1. Estadísticas descriptivas

Cuadro A1. Variables del modelo de demanda nacional de azúcar crudo y azúcar blanco.

Variable	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
<i>CONSB</i>	1120236	1303733	963237	103454
<i>CONSCR</i>	59700	141538	12227	38529
<i>CONSCR(-1)</i>	55977	141538	6701	40671
<i>PAB</i>	979923	1181440	845274	89565
<i>PAC</i>	1038074	1240512	887538	102412
<i>PP</i>	851215	1064256	615162	112557
<i>PIB</i>	3793294	4666267	3217434	477758
<i>TENDB</i>	12	22	1	7
<i>TENDC</i>	11	172	19	1

Cuadro A2. Variables del modelo de exceso de demanda de exportaciones de azúcar crudo y azúcar blanco.

Variable	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
<i>PNYC</i>	447550	547150	278836	88620
<i>PLB</i>	657124	1216012	395930	220194
<i>ZC</i>	427642	674691	179479	164084
<i>ZB</i>	295414	429877	48512	115281
<i>ZC(-1)</i>	407954	674691	179479	156198

Cuadro A3. Variables del modelo de costos de producción de azúcar y variables del modelo biométrico de la caña.

Variable	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
<i>CTA</i>	1,45E+12	2,45E+12	9,05E+10	8,17E+11
<i>QT</i>	2132822	3453465	149594	1139921
<i>QT^2</i>	5,76E+12	4,48E+12	1,19E+13	2,24E+10
<i>TCH</i>	137,8369	180,9284	104,0754	17,3669
<i>EC</i>	13,1005	15,6667	10,8333	1,0926
<i>ÁREA</i>	20,9224	36,6380	1,8000	9,4637
<i>NNINOA</i>	0,5833	1,0000	0,0000	0,4965
<i>NINAA</i>	0,1944	1,0000	0,0000	0,3985
<i>LMM_T</i>	13,9010	24,9856	5,5960	3,6209
<i>RIEGO</i>	6,3194	11,0000	2,0000	2,3166