

Cambio climático y rendimiento de caña de azúcar en el ingenio Tres Valles

Fermín Romero-Sandoval¹

Miguel Ángel Martínez-Damián^{2,§}

J. Reyes Altamirano-Cárdenas¹

Ramón Valdivia-Alcalá¹

1 Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México. CP. 56230. (fsandoval.romero@gmail.com; jreyesa@ciestaam.edu.mx; ramvaldi@gmail.com).

2 Colegio de Posgraduados- Campus Montecillo. Carretera México- Texcoco km 36.5, Montecillos, Texcoco, Estado de México. CP. 56264.

Autor para correspondencia: angel01@colpos.mx.

Resumen

La agroindustria de la caña de azúcar es importante para la soberanía alimentaria en México, pero el cambio climático afecta su producción y rendimiento. Este estudio analizó como las variables climáticas y los precios impactan el rendimiento de sacarosa en caña fresca en el ingenio Tres Valles, Veracruz, durante 1995-2022, usando un modelo de dos ecuaciones simultáneas. El objetivo fue analizar en qué medida afectan las variables climáticas y los respectivos precios relevantes el rendimiento de la sacarosa en caña, expresada en su equivalente de caña fresca, para cuantificar la magnitud del dicho impacto. Los resultados muestran que la oscilación térmica tiene el mayor impacto positivo (elasticidad de 1.01), mientras que la radiación solar tiene el mayor impacto negativo (elasticidad de -2.06). Las emisiones de dióxido de carbono tienen un efecto positivo moderado (elasticidad de 0.78) y la precipitación un impacto positivo menor (elasticidad de 0.17). El índice de precios del azúcar de caña muestra una elasticidad positiva de 0.96, mientras que el precio al mayoreo del azúcar estándar tiene una elasticidad negativa de -0.2. Se concluyó que este tipo de estudios proporcionan información valiosa sobre la sensibilidad del rendimiento de sacarosa a factores climáticos y económicos, útil para mitigar el cambio climático.

Palabras clave:

normales climatológicas, precios distorsionados, sacarosa en caña fresca, teorema de Gauss-Markov.



Introducción

El cambio climático es un fenómeno global con manifestaciones primarias en las variaciones de las normales meteorológicas (Arnell *et al.*, 2019). Sus consecuencias incluyen impactos ecológicos, sociales y económicos a nivel local y regional (Byg y Salick, 2009). Investigaciones muestran que los rendimientos agrícolas decrecerán si las variables climatológicas rebasan ciertos umbrales (Habib-ur-Rahman *et al.*, 2022; Bibi y Rahman, 2023).

En México, la caña de azúcar es un cultivo importante económicamente y en generación de empleos. En 2023, se posicionó tercero en valor de producción agrícola con 5.8% del total. Sin embargo, el sector enfrenta desafíos como altos precios del azúcar e incremento de importaciones, en parte debido a sequías. Modelos como el DSSAT simulan el crecimiento de cultivos bajo diferentes escenarios, apoyando la toma de decisiones (Everingham *et al.*, 2002). Sin embargo, estos modelos se centran en procesos biofísicos, dificultando la incorporación de análisis económicos complejos (Stern *et al.*, 2022). Aunque algunos incorporan análisis económico básico (Morris *et al.*, 2019), existe una brecha entre los modelos agroclimáticos y económicos, ya que los primeros no incorporan análisis estructural econométrico (McNunn *et al.*, 2019).

Esta investigación adopta un enfoque econométrico convencional, modelando el rendimiento en función de variables relevantes, con el objetivo de estimar un modelo de ecuaciones simultáneas para cuantificar los efectos de variables climáticas y precios en el rendimiento de sacarosa en caña.

Materiales y método

El área de estudio de la investigación es la delimitada por las coordenadas geográficas de los cuatro municipios en los que se ubica la zona de abastecimiento del ingenio Tres Valles. Es decir, entre los 18° 45' 00" y 18° 08' 00" latitud norte y -96° 38' 0" y -95° 46' 00" longitud oeste. El estudio se realiza con datos del ingenio Tres Valles, Veracruz para el periodo 1995-2022. Las series de tiempo de temperatura, precipitación y radiación solar se obtuvieron de NASA (2024). Los datos correspondientes a las variables de la caña de azúcar se obtuvieron de la Unión Nacional de Cañeros de la Confederación Nacional de Propietarios Rurales para varios años (UNC-CNPR, 2004; UNC-CNPR, 2014; UNC-CNPR, 2024).

En el Cuadro 1 se muestran las variables que se utilizaron para la corrida final del modelo empírico estimado.

Cuadro 1. Definición de las variables utilizadas en el estudio.

Variable	Descripción	Unidades
Sacapa	Sacarosa en caña expresada en su equivalente de caña fresca	(t)
Tmed	Temperatura media anual	(oC)
Oter	Oscilación térmica	(oC)
Llu	Precipitación media anual	(mm año-1)
SRad	Radiación solar	MJ m-2 día-1
IPAC	Índice de precios del azúcar de caña de la FAO	Adimensional y base (2014-2016= 100)
PMay	Precio del azúcar estándar nominal en las principales centrales de abasto	(\$ t-1)
CO2	Dióxido de carbono	(ppm)

Variable	Descripción	Unidades
D1	Variable dicotómica para prevalencia del fenómeno de 'El Niño' o 'La Niña' en determinado año	0= La Niña, 1= El Niño

Para Oter, Llu, SRad la fuente es NASA (2024), para Sacapa y PMay fue la UNC-CNPR (2014, 2004 y 2024) el cual fue deflactado con el índice nacional de precios al productor (INPP) y por lo tanto se obtuvo precio del azúcar estándar real en las principales centrales de abasto (PRMay) que es el finalmente utilizado en el modelo empírico. El año base del INPP fue (2014-2016= 100) y la fuente de dicho índice fue Banco de México (2024). El CO2 se obtuvo de NOAA (2024) y para D1 el SAS Institute (2024). Finalmente, el índice de precios del azúcar de caña (IPAC) fue FAO (2024).

El modelo empírico a estimar es el siguiente sistema de dos ecuaciones simultáneas.

1)

$$Sacapa = \beta_0 + \beta_1 Tmed + \beta_2 Oter + \beta_3 Llu + \beta_4 SRad + \beta_5 IPAC + \beta_6 PRMay + \beta_7 D1 + \varepsilon_1$$

$$Tmed = \alpha_0 + \alpha_1 CO2 + \varepsilon_2$$

2.) Donde los β 's y α 's son los parámetros de la respectiva ecuación. Los parámetros β_0 y α_0 corresponden a la ordenada al origen (intercepto) de la ecuación (1) y (2). Los respectivos signos esperados son los siguientes: $\beta_1 > 0$, $\beta_2 \leq 0$, $\beta_3 > 0$, $\beta_4 \leq 0$, $\beta_5 > 0$, $\beta_6 > 0$, $\beta_7 \leq 0$ y $\alpha_1 > 0$. Además ε_1 y ε_2 son los errores estadísticos, de la ecuación en cuestión, con la propiedad de que se distribuyen normalmente con media μ y varianza finita σ^2 .

Es importante señalar que en el caso del parámetro β_2 , que pondera a la oscilación térmica (Oter), no se puede establecer *a priori* el tipo de relación que tendrá con el rendimiento de la sacarosa en caña (Sacapa) pues si bien en algunos trabajos como el de Cardozo y Sentelhas (2013) se menciona que existe una correlación positiva durante la fase de maduración de la caña, no siempre es así, pues esta relación puede variar dependiendo de otros factores como la variedad de caña, la edad del cultivo y fundamentalmente las condiciones ambientales. En el caso de la radiación solar (SRad) si bien se esperaría también una relación positiva con la sacarosa en caña en condiciones de estrés, por ejemplo, sequía, un exceso de radiación podría incluso tener efectos negativos (Inman *et al.*, 2005).

Respecto a los parámetros de la temperatura media (β_1) y de la precipitación (β_3) de antemano, se espera que sean positivos; no obstante, si estos no son en realidad lineales el signo puede resultar negativo. Es importante hacer notar que cuando estas variables se encuentran fuera de los límites óptimos por variaciones climáticas, puede provocar una disminución e incluso pérdida de sacarosa en la caña (Inman *et al.*, 2005; Cardozo y Sentelhas, 2013).

En el caso de la variable dummy (D1) se esperaría una relación negativa pues tanto 'El Niño' como 'La Niña' causan estrés en la caña de azúcar, sobre todo en la etapa fenológica de maduración (de Souza *et al.*, 2015). En el caso del parámetro α_1 se espera una relación positiva entre la temperatura media (Tmed) y el dióxido de carbono (CO2). Lacis *et al.* (2010) han establecido la relación causal entre incremento de temperatura y las emisiones de dióxido de carbono.

En la primera ecuación del sistema se introduce el índice de precios del azúcar de caña de la FAO (IPAC) como una variable económica proxi que explica el rendimiento de sacarosa en caña expresada en toneladas de caña fresca. El IPAC es un indicador global que refleja las tendencias del mercado internacional del azúcar, lo cual puede tener un impacto en las decisiones de producción y manejo de los cultivos de caña de azúcar a nivel local e influir en las prácticas de manejo de los productores, afectando potencialmente el rendimiento de sacarosa (Cheavegatti *et al.*, 2011).

Finalmente, la introducción del precio promedio del azúcar estándar en las principales centrales de abasto de México en términos reales (PRMay) corresponde al hecho de que este es utilizado por CONADESUCA (2010) para determinar el precio de referencia que sirve para determinar el precio de liquidación a los productores de caña. Se asume que precio de referencia más alto incentiva a los productores a aumentar la superficie sembrada y la producción de caña de azúcar, pero lo más importante es que el precio de referencia en México se basa en parte en el contenido de sacarosa

porque esto incentiva a los productores cañeros a enfocarse no solo en el volumen, sino también en la calidad de la caña en términos de su contenido de azúcar.

Para la identificación del modelo empírico y siguiendo a Gujarati y Porter (2009); Wooldridge (2016), se aplicaron las condiciones de orden y de rango y para la estimación del modelo estructural y el reducido se utilizó el sistema SAS/ETS 9.4. Finalmente, es necesario mencionar que el cálculo de las elasticidades evaluadas en un punto se realizó como se indica en Tomek y Kaiser (2014).

Resultados y discusión

El modelo empírico que se utilizó consta de dos ecuaciones simultáneas que se compone de siete variables exógenas o predeterminadas y dos variables endógenas. Se encontró que la primera ecuación del sistema (Sacapa) está exactamente identificada mientras la segunda ecuación (Tmed) está sobre identificada por lo que el modelo en su conjunto está identificado y es posible estimar los parámetros estructurales. En el Cuadro 2 se muestran los estadísticos descriptivos de las variables utilizadas en el modelo.

Cuadro 2. Estadísticos descriptivos de las variables utilizadas en la investigación.

Variable	Media	Desviación estándar	Valor máximo	Valor mínimo
Sacapa	255 708	54 150	341 227	156 899
Tmed	23.7	0.4	24.5	23.1
Oter	23.6	1.2	26.6	20.3
Llu	1 659.1	242.6	2 104.5	1 229.4
SRad	17.8	0.5	18.9	16.8
IPAC	388	17.7	418.5	361
PRMay	92.8	43.1	170.6	24.9
CO2	278.2	40.6	365.2	201.1
D1	0.5	0.5	1	0

En el Cuadro 3 se muestran parámetros estructurales de la ecuación (1) del modelo estimado.

Cuadro 3. Parámetros estructurales de la primera ecuación del modelo empírico estimado.

Variable	Parámetro estimado	Error estándar	Valor de t	$Pr > t $	Valor del estadístico	VIF
Intercepto	-606216	825830.6	-0.73	0.4719	F, 11.71	0
Tmed	50109.29	39018.69	1.28	0.2145	R^2 ajustado, 0.74	2.102
Oster	10984.02	4517.723	2.43	0.0251	DW, 1.97	1.08
Llu	25.57816	22.70002	1.13	0.2739		1.142
SRad	-29592.5	12828	-2.31	0.0325		1.42
IPAC	629.605	293.8182	2.14	0.0453		2.61
PRMay	-554.624	175.23	-3.17	0.0051		1.843
D1	-8822.63	13359.91	-0.66	0.5169		1.475

DW= Durbin-Watson; VIF= factor de inflación de la varianza. Elaboración con base en la salida del SAS 9.4.

Como se observa en la columna seis, el estadístico F de 11.7 con 7 grados de libertad indica que el modelo en su conjunto es altamente significativo desde el punto de vista estadístico, existe una fuerte evidencia para rechazar la hipótesis nula de que todos los coeficientes de las variables independientes son simultáneamente iguales a cero. Adicionalmente, dado el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) es de 0.74 por lo que este modelo explica aproximadamente el 74% de la variabilidad en la variable dependiente (Sacapa).

Adicionalmente, el estadístico de Durbin-Watson (DW) tiene un valor de 1.97 (muy cercano a 2) lo que se puede afirmar que no hay autocorrelación significativa de primer orden en los residuos del modelo y por lo tanto esto sugiere que el modelo está bien especificado en términos de su estructura temporal y que no se han omitido variables importantes que podrían causar dependencia en los errores (Gujarati y Porter, 2009). Finalmente, en el caso del factor de inflación de la varianza (VIF) indica que no existe el problema de la multicolinealidad. Si bien, en el caso del índice de precios del azúcar de caña tiene un VIF de 2.6 puede considerarse como una multicolinealidad de leve a moderada que no causa problemas (Hair *et al.*, 2019).

En el Cuadro 4 se muestran los resultados de la segunda ecuación del modelo empírico.

Cuadro 4. Parámetros estructurales de la segunda ecuación modelo empírico estimado.							
Variable	Parámetro estimado	Error estándar	Valor de t	Pr > t	Estadístico	Valor	VIF
Intercepto	18.1153	1.212693	14.94	<0.0001	F	21.33	0
CO2	0.014385	0.003115	4.62	0.0001	R ² ajustado	0.46	1
					DW	1.67	
DW= Durbin-Watson; VIF= factor de Inflación de la varianza. Elaboración con base en la salida del SAS 9.4.							

La interpretación de los estadísticos *F*, *R*²ajustado y DW es análoga al caso anterior y por lo tanto los parámetros estimados del modelo empírico son insesgados, consistentes y eficientes. Ahora bien, el análisis de los efectos marginales de las covariantes sobre la variable de respuesta puede resultar confuso si el mismo es realizado en términos de valores absolutos debido a las unidades físicas de las variables. Para evitar esta situación, en economía es más común realizar el análisis de sensibilidad en términos relativos, libre de unidades físicas; es decir, a través del análisis de elasticidades evaluadas en un punto las cuales se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Elasticidades de la forma reducida del modelo empírico estimado.							
Variable	Oter	Llu	SRad	CO2	IPAC	PMay	D1
Sacapa	1.01	0.17	-2.06	0.78	0.96	-0.2	-0.02
Tmed				0.17			

De manera general, se puede asumir que el análisis de sensibilidad en términos relativos de los resultados del modelo reducido a través de las elasticidades considera tomar el cambio del 1% en las variables exógenas o predeterminadas y el parámetro estimado respectivo será la variación porcentual que se dará en la variable endógena o de respuesta. De esta manera, un cambio del 1% en la oscilación térmica (Oter) incrementará en 1.01% la sacarosa en caña pero expresada en términos de caña fresca (Sacapa), un aumento del 1% en la precipitación (Llu) incrementará el rendimiento de la Sacapa en 0.17%; un aumento del 1% en la radiación solar (SRad), causará que el rendimiento de la Sacapa disminuya en 2.06%; en el caso de un incremento del 1% de las emisiones de CO2 la Sacapa se incrementará en 0.78% lo cual es debido al llamado efecto fertilización de este gas de efecto invernadero sobre la caña.

La elasticidad de la temperatura media (Tmed) respecto a la Sacapa, que se obtiene a partir del modelo estructural, pues ambas variables son endógenas, resultó ser de 4.64. Esto implica que si la Tmed se incrementa en 1% la Sacapa se incrementará en 4.64%. Por otro lado, si el índice de precios del azúcar de caña (IPCA) se incrementará en 1% la Sacapa se incrementará en 0.96%. En el caso del precio al mayoreo del azúcar estándar en términos reales (PRMay) como una variable exógena del rendimiento de la Sacapa no presentó el signo esperado, ya que un incremento del 1% provocaría un descenso de la Sacapa; lo cual es, aparentemente, una irracionalidad económica por parte del productor.

No obstante, una posible explicación a dicho hecho es que el mercado de la caña de azúcar es uno de los más distorsionados, pues; por ejemplo, los líderes cañeros locales continuamente promueven movimientos sociales que pueden afectar los precios de la caña de azúcar como insumo fundamental de la industria del azúcar y además el precio de la caña de azúcar es un precio controlado al ser fijado por el gobierno y no por el mercado (Aguilar *et al.*, 2011). Finalmente, en el caso de la variable dummy D1 codificado como 0 para la prevalencia de 'La Niña' en el respectivo año y 1 para cuando se dio la prevalencia de 'El Niño' en dicho año, el parámetro respectivo tuvo un valor de -0.02; esto se interpreta aseverando que en promedio la Sacapa es menor en 0.02% durante el año de prevalencia de 'El Niño' en comparación con los años de prevalencia de 'La Niña', manteniendo constantes todas las demás variables del modelo.

Discusión

La investigación reveló relaciones complejas entre variables climáticas, económicas y el rendimiento de sacarosa en caña (Sacapo). La temperatura media (Tmed) mostró una relación directa con Sacapo, con un incremento del 1% en Tmed aumentando Sacapo en 4.64%. Esto contrasta con los hallazgos de Chandio *et al.* (2020) en China, donde se encontró un efecto negativo de la temperatura en la producción agrícola a largo plazo. La precipitación mostró un impacto positivo, con un aumento del 1% incrementando Sacapo en 0.17%. Este resultado difiere de lo reportado en Chandio *et al.* (2020) en China, pero es consistente con Habib *et al.* (2022) localizaron un impacto positivo de la precipitación en la producción agrícola. La radiación solar (SRad) presentó un efecto negativo, con un incremento del 1% disminuyendo Sacapo en 2.06%. Esto podría explicarse por la relación no lineal entre radiación solar y acumulación de sacarosa en la caña de azúcar, una planta C4 con alta eficiencia fotosintética según se menciona en Cardozo y Sentelhas (2013); Arnell *et al.* (2019).

La oscilación térmica (Oter) mostró un impacto positivo, con una variación del 1% incrementando Sacapo en 1.01%. Esto se alinea con estudios en Guatemala que asocian mayores amplitudes térmicas con mayor acumulación de azúcar en la caña tal como se señala en Castro *et al.* (2010). Un incremento del 1% en la concentración de CO₂ aumentó Sacapo en 0.78%. El índice de precios del azúcar de caña de la FAO (IPAC) resultó estadísticamente significativo ($t = 2.14$) como variable explicativa de Sacapo. El precio al mayoreo real del azúcar estándar (PRMay) se utilizó como sustituto del precio de liquidación de la caña de azúcar (PRliq), ya que este último no resultó estadísticamente significativo. Esto puede deberse a que el precio de la caña de azúcar es controlado por el gobierno vía la Ley Cañera de 2005, lo que distorsiona el precio y afecta la asignación de recursos y las decisiones del productor.

Conclusiones

El estudio revela que el cambio climático influye negativamente en la producción y rendimiento de la caña de azúcar, afectando la seguridad alimentaria de México. Se adoptó un modelo de ecuaciones simultáneas para cuantificar el efecto de variables climáticas y precios a través de elasticidades. Los hallazgos principales incluyen: la oscilación térmica tiene un efecto positivo significativo en el rendimiento de sacarosa; la radiación solar muestra un impacto negativo en el rendimiento y los precios internacionales del azúcar desempeñan un papel relevante en el rendimiento de la caña. Este enfoque integra el análisis económico con variables climáticas, proporcionando una evaluación más completa que estudios previos centrados principalmente en aspectos biofísicos. El modelo propuesto ofrece una comprensión más integral de la interrelación entre factores climáticos y económicos en la producción de caña de azúcar.

Bibliografía

- 1 Aguilar, R. N.; Galindo, M. G.; Fortanelli, M. J. y Contreras, S. C. 2011. Factores de competitividad de la agroindustria de la caña de azúcar en México. Región y sociedad. 33(52):261-297. <https://www.scielo.org.mx/pdf/regsoc/v23n52/v23n52a9.pdf>.

- 2 Arnell, N. W.; Lowe, J. A.; Challinor, A. J. and Osborn, T. J. 2019. Global and regional impacts of climate change at different levels of global temperature increase. *Climatic Change*. 155(1):377-391. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02464-z>.
- 3 Bibi, F. and Rahman, A. 2023. An overview of climate change impacts on agriculture and their mitigation strategies. *Agriculture*. 13(8):1-15. Doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081508>.
- 4 BM. 2024. Banco de México. Serie histórica diaria del tipo de cambio peso-dólar. <https://www.banxico.org.mx/SieInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?sector=6&accion=consultarCuadro&idCuadro=CF373&locale=es>.
- 5 Byg, A. and Salick, J. 2009. Local perspectives on a global phenomenon. *Climate change in eastern Tibetan villages*. *Global Environmental Change*. 19(2):156-166. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.01.010>.
- 6 Cardozo, N. P. and Sentelhas, P. C. 2013. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. *Scientia Agricola*. 70(6):449-456. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000600011>.
- 7 Casellas, E.; Bergez, J. E.; Belhouchette, H.; Therond, O.; Adam, M.; Metay, A. and Wery, J. 2009. A methodology for the evaluation and improvement of a generic biophysical soil-plant-atmosphere crop model based on 'mini-application'. Ed. *Integrated assessment of agriculture and sustainable development. Setting the Agenda for Science and Polic*. Egmond and Zee, The Netherlands. 198-199 pp. <https://hal.inrae.fr/hal-02755379v1/file/41721-20110225053142917-2.pdf>.
- 8 Castro, L. O. R. y Gil, A. 2010. Efecto de la temperatura en la acumulación de azúcar estudio preliminar realizado en ingenio la unión. Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICANA). 3-5 pp. <https://cengicana.org/files/20150828053605101.pdf>.
- 9 Chandio, A. A.; Jiang, Y.; Rehman, A. and Rauf, A. 2020. Short and long-run impacts of climate change on agriculture: an empirical evidence from China. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*. 12(2):201-221. Doi: <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-05-2019-0026>.
- 10 Cheavegatti, G. A.; Couto-Abreu, H. M.; Arruda, P.; Besspalhok, F. J. C.; Lee, B. W.; Creste, S.; Ciero, L.; Aparecido, F. J. and Vargas, O. F. A. 2011. Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): a reference study for the regulation of genetically modified cultivars in Brazil. *Tropical Plant Biology*. 4(1):62-89. Doi: 10.1007/s12042-011-9068-3.
- 11 CNIAA. 2024. Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcoholera. El manual azucarero mexicano. Compañía Editorial del Manual Azucarero. 187-394 pp. <https://www.manualazucarero.com/-files/ugd/fc2095-b4e9661cd898438aad336a83992d281.pdf>.
- 12 CONADESUCA. 2010. Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. Metodología del precio nacional de azúcar estándar al mayoreo. Definiciones y procedimiento de cálculo del precio de referencia del kilogramo de azúcar base estándar. 1-4 pp. <http://conadesuca.gob.mx/politica%20comercial/metodolog%c3%8da%20del%20precio%20nacional%20de%20az%c3%9acar%20est%c3%81ndar%20al%20mayoreo.pdf>.
- 13 De Souza, R. G.; Buzinaro, C. N. B.; Brunini, M. V. and Prela, P. A. 2015. Influence of El Niño and La Niña on sugarcane yield and sucrose production in northern São Paulo, Brazil. *Australian Journal of Crop Science*. 9(6):509-516. <https://www.cropj.com/moreto-9-6-2015-509-516.pdf>.
- 14 Everingham, Y. L.; Muchow, R. C.; Stonec, R. C.; Inman-Bamber, N. G.; Singels, A. and Bezuidenhout, C. N. 2002. Enhanced risk management and decision-making

- capability across the sugarcane industry value chain based on seasonal climate forecasts. *Agricultural Systems*. 74(2) 459-477. Doi: 10.1016/s0308-521x(02)00050-1.
- 15 FAO. 2024. Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO Food Price Index. <https://www.fao.org/worldfoodsituation/foodpricesindex/en/>.
- 16 Gujarati, D. N. and Porter, D. C. 2009. Basic econometrics 5th Ed. McGraw-Hill Irwin. 673-682 pp.
- 17 Habib-ur-Rahman, M.; Ahmad, A.; Raza, A.; Hasnain, M. U.; Alharby, H. F.; Alzahrani, Y. M.; Bamagoos, A. A.; Hakeem, K. R.; Ahmad, S.; Nasim, W.; Ali, S.; Mansour, F. and El Sabagh, A. 2022. Impact of climate change on agricultural production. Issues, challenges, and opportunities in Asia. *Frontiers in Plant Science*. 13(1):01-22. Doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.925548>.
- 18 Hair, Jr. J. F.; Black, W. C.; Babin, B. J. and Anderson, R. R. 2019. Multivariate data analysis 8th Ed. Cengage. 795-815 pp.
- 19 Inman, M. N. G.; Bonnett, G. D.; Smith, D. M. and Thorburn, P. J. 2005. Sugarcane physiology: integrating from cell to crop to advance sugarcane production. *Field Crops Research*. 92(2-3):115-366. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.011>.
- 20 Jones, J. W.; Antle, J. M.; Basso, B.; Boote, K. J.; Conant, R. T.; Foster, I. and Wheeler, T. R. 2017. Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems* . 155(3):240-254. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.014>.
- 21 Lacis, A. A.; Schmidt, G. A.; Rind, D. and Ruedy, R. A. 2010. Atmospheric CO₂: principal control knobs governing Earth's temperature. *Science*. 330(6002):356-359. <https://doi.org/10.1126/science.1190653>.
- 22 McNunn, G.; Heaton, E.; Archontoulis, S.; Licht, M. and Loocke, A. V. 2019. Using a crop modeling framework for precision cost-benefit analysis of variable seeding and nitrogen application rates. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 3(108):1-15. Doi: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00108>.
- 23 Morris, T. L.; Schulze, M.; Riethmuller, G. and Angadi, S. V. 2019. Using a crop modeling framework for precision cost-benefit analysis of variable seeding and nitrogen application rates. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 3(6):1-16. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00108>.
- 24 NASA. 2024. National Aeronautics and Space Administration. The prediction of worldwide energy resources project. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
- 25 NOAA. 2024. National Oceanic and Atmospheric Administration. Carbon cycle greenhouse gases. Trends in CO₂. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/data.html>.
- 26 SAS Institute Inc. 2024. El Niño and La Niña years and intensities based on oceanic Niño index (ONI). Golden gate weather services. <https://ggweather.com/enso/oni.htm>.
- 27 Schlenker, W.; Hanemann, W. M. and Fisher, A. C. 2006. The impact of global warming on US. agriculture: an econometric analysis of optimal growing conditions. *The Review of Economics and Statistics*. 88(1):113-125. Doi: <https://doi.org/10.2307/40042963>.
- 28 Stern, N.; Stiglitz, J. E. and Taylor, C. 2022. The economics of immense risk, urgent action and radical change: towards new approaches to the economics of climate change. *Journal of Economic Methodology*. 29(3):181-216. Doi: <https://doi.org/10.1080/1350178X.2022.2040740>.
- 29 UNC-CNPR. 2004. Unión Nacional de Cañeros-Confederación Nacional de Propietarios Rurales. Estadísticas de la agroindustria de la caña de azúcar. 15-147 pp.
- 30 UNC-CNPR. 2014. Unión Nacional de Cañeros-Confederación Nacional de Propietarios Rurales. Estadísticas de la agroindustria de la caña de azúcar. 37-397 pp.

- 31 UNC-CNPR. 2023. Unión Nacional de Cañeros-Confederación Nacional de Propietarios Rurales. Estadísticas de la agroindustria de la caña de azúcar. 42-400 pp.
- 32 UNC-CNPR. 2023. Unión Nacional de Cañeros-Confederación Nacional de Propietarios Rurales. Estadísticas de la agroindustria de la caña de azúcar. 48-409 pp.
- 33 Wooldridge, J. M. 2016. Introductory econometrics: a modern approach to the 6th Ed. Cengage Learning. 423-439 pp.



Cambio climático y rendimiento de caña de azúcar en el ingenio Tres Valles

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 1 August 2025
Date accepted: 1 November 2025
Publication date: 13 November 2025
Publication date: Oct-Nov 2025
Volume: 16
Issue: 7
Electronic Location Identifier: e3855
DOI: 10.29312/remexca.v16i7.3855

Categories

Subject: Artículos

Palabras clave:

Palabras clave:

normales climatológicas
precios distorsionados
sacarosa en caña fresca
teorema de Gauss-Markov

Counts

Figures: 0

Tables: 5

Equations: 2

References: 33