



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISION DE CIENCIAS ECONÓMICO ADMINISTRATIVAS

**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA TÉCNICA DE LA
AGROINDUSTRIA DE CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO
CON EL ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS**

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN CIENCIAS

PRESENTA

OMAR ANTONIO ESCOBEDO CÁRDENAS

**DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES**



CHAPINGO, EDO DE MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2018

**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA TÉCNICA DE LA
AGROINDUSTRIA DE CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO CON
EL ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS**

El presente trabajo ha sido revisado y aprobado por el siguiente
Comité Directivo como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias



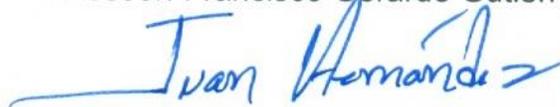
Director: Dr. Ramón Valdivia Alcalá



Codirector: Dr. Fermín Sandoval Romero



Asesor: Francisco Gerardo Gutiérrez García



Asesor: Dr. Juan Hernández Ortíz

Índice general

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Objetivos	2
1.3 Hipótesis	3
II. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Frontera de producción	4
2.2 Eficiencia técnica.....	4
2.3 El concepto de eficiencia en el Data Envelopment Analysis (DEA)	4
2.4 El modelo Charnes, Cooper y Rhodes (CCR) en forma de programación lineal.....	8
III. LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA	13
3.1 El cultivo de la caña de azúcar	13
3.1.1 Preparación del terreno	13
3.1.2 Siembra o Plantación.....	14
3.1.3 Riego	15
3.1.4 Nutrición.....	15
3.1.5 Control de malezas, plagas y enfermedades	16
3.1.6 Cosecha	18
3.1.7 Producción de azúcar	19
3.1.8 Recepción de la caña	19
3.1.9 Preparación de la caña	19
3.1.10 Molienda de la caña de azúcar	20
3.1.11 Clarificación del jugo	20
3.1.12 Evaporación del jugo	21
3.1.13 Clarificación de la meladura	21
3.1.14 Desarrollo del cristal.....	22
3.1.15 Producción de azúcar refinado.....	22
3.1.16 Acondicionamiento del azúcar	22
3.1.17 Ubicación de la agroindustria cañera	23
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	25
V. METODOLOGÍA	41
5.2 Resolución del modelo CCR mediante programación lineal	42
5.3 Eficiencia técnica sin considerar la tecnificación de la cosecha (Escenario 1)	44
5.4 Eficiencia técnica considerando la tecnificación de la cosecha (Escenario 2)	44
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
6.1 Eficiencia técnica sin considerar la tecnificación de la cosecha (escenario 1)	45

6.2 Eficiencia técnica considerando la tecnificación de la cosecha (Escenario 2)	47
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49
7.1 Conclusiones	49
7.2 Recomendaciones.....	50
BIBLIOGRAFÍA	52
ANEXO 1. SALIDA DEL SOFTWARE NLOGIT PARA EL ANÁLISIS DEA.....	55
Corrida del escenario de cosecha sin mecanizar	55
Corrida del escenario de cosecha mecanizada de caña.....	57
ANEXO 2. DEFINICIÓN DEL KARBE	59
ANEXO 3. INFORMACIÓN UTILIZADA	62

Índice de cuadros

Cuadro 1. Localización de los ingenios cañeros de México	23
Cuadro 2. Especificaciones para el modelo de la frontera estocástica	36
Cuadro 3. Resultados obtenidos	37
Cuadro 4. Información obtenida por el CONADESUCA.....	41
Cuadro 5. Definición de las variables.....	41
Cuadro 6. Estadísticas descriptivas de las variables utilizadas	42
Cuadro 7. Índices de eficiencia técnica por ingenio cañero escenario 1	45
Cuadro 8. Índices de eficiencia técnica por ingenio cañero escenario 2	47
Cuadro 9. Corrida del escenario de cosecha sin mecanizar.....	55
Cuadro 10. Corrida del escenario de cosecha mecanizada	57
Cuadro 11. Calculo del KARBE.....	60
Cuadro 12. Corrida del escenario de cosecha sin mecanizar.....	62
Cuadro 13. Tabla de abreviaturas de las variables utilizadas	64

Índice de figuras

Figura 1. Comparación de la DEA y la regresión.....	5
Figura 2. Estimación de los modelos de frontera Nlogit 5	43

Siglas y abreviaturas

CONADESUCA	=	Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar
CCR	=	Modelo Data Envelopment Analysis tipo Charnes-Cooper-Rhodes
DEA	=	Análisis Envolvente de Datos (Data Envelopment Analysis)
CSR	=	Retornos Constantes a Escala (Constant Scale Return)
DMU	=	Unidad de toma de decisiones (Decision Making Unit)
KARBE	=	Kilos de Azúcar Recuperable Base Estándar
SFA	=	Análisis Estocástico de Frontera (Stochastic Frontier Analysis)
SIAP	=	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
SAGARPA	=	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
ET	=	Eficiencia Técnica
CD	=	Cobb-Douglas
Translog	=	Trascendental Logarítmica
CES	=	Elasticidad de Sustitución Constante
BBC	=	Modelo Banker-Charnes-Cooper
m	=	metros
C	=	Carbono
H	=	Hidrógeno
O	=	Oxígeno
N	=	Nitrógeno
P	=	Fósforo
K	=	Potasio
Kg	=	Kilogramo
Cm	=	centímetro
pH	=	Potencial Hidrógeno
%POL	=	Porcentaje en peso de sacarosa del jugo contenido en la caña
°C	=	Grados Centígrados
HG	=	Unidad de medida de presión de mercurio
ICUMSA	=	International Commission for Uniform Methods for Sugar Analysis

DEDICATORIA

Para mis padres Antonio y Ortencia por todas sus enseñanzas, por su inmenso amor y apoyo incondicional que me han brindado toda mi vida, por cuidarme, creer en mí y motivarme para no rendirme nunca y ser mejor persona cada día.

Para mis hermanos Soledad, David, Casandra y Guadalupe, por estar ahí siempre para mí y recibirme en todo momento con un enorme abrazo y una gran sonrisa, por hacerme sentir querida, por su inmenso apoyo y cariño.

Para mis sobrinas Liah, Breana y Victoria por llenar cada día de mi vida de alegría y esperanza.

*Para mis tíos, primos, cuñados por su motivación apoyo, buenos deseos y cariño.
Para mis amigos, los que han estado conmigo a lo largo de este camino y se han convertido más que amigos, se han convertido en familia, por su complicidad, apoyo y compartir grandes momentos a mi lado.*

Para Cindy por ser alguien que se ha vuelto muy especial en mi vida, por acompañarme y guiarme en este camino de crecimiento profesional y personal, por tu apoyo, cariño y todos los momentos que hemos experimentado juntos.

Omar Antonio Escobedo Cárdenas

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a dios por cuidar de mis seres queridos y de mí y por guiarme a lo largo de mi vida.

A mis padres por su inmenso amor, confianza y apoyo incondicional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado para realizar y culminar mi estudio de posgrado

A mí siempre amada alma mater Universidad Autónoma Chapingo y a la División de Ciencias Económico-Administrativas (DICEA) por creer en mí, por darme la oportunidad de crecer tanto profesional como personalmente, por el apoyo brindado, por las experiencias y enseñanzas adquiridos y por todas las emociones experimentadas durante este inolvidable y hermoso camino.

Al doctor Ramon Valdivia Alcala y a los miembros del jurado por su extraordinaria contribución para guiarme en esta investigación.

A todas las personas que fueron participes de mi formación este tiempo, a personas del sector administrativo y a mis profesores por su aportación y paciencia.

Omar Antonio Escobedo Cárdenas

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Omar Antonio Escobedo Cárdenas

Fecha de nacimiento: 22 de febrero de 1991

Lugar de nacimiento: Tepic, Nayarit, México

CURP: EOCO910222HNTSRM07

Cédula profesional: 10834797

Desarrollo académico

Preparatoria Agrícola, en Universidad Autónoma Chapingo, Edo. de México

Ingeniería Agroindustrial en Universidad Autónoma Chapingo, Edo. de México

Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales en Universidad Autónoma Chapingo, Edo. de México.

Análisis de la Eficiencia Técnica de la Agroindustria de la Caña de Azúcar en México con el Análisis Envolvente de Datos

Resumen

En México el cultivo de la caña de azúcar es el cultivo agroindustrial más importante debido a su impacto económico en 267 municipios y 15 entidades federativas, representa el 3% del Producto Interno Bruto (PIB) del sector agrícola. No obstante, se considera que la agroindustria de la caña de azúcar tiene un atraso tecnológico importante que manifiesta en la ineficiencia de algunos de los ingenios azucareros que la componen. En este contexto, el objetivo del presente trabajo ha sido cuantificar la eficiencia técnica relativa de los 50 ingenios azucareros que componen la agroindustria de la caña de azúcar en el eslabón de campo mediante la metodología del análisis envolvente de datos basada en la programación lineal. Los resultados muestran que en la zafra 2015/2016 la agroindustria tuvo una eficiencia técnica relativa promedio del 89%, cuando no se considera la mecanización de la cosecha de la caña y se eleva al 96.5% cuando se considera la mecanización del corte y alza de caña. La investigación concluye que si existe margen para la mejora de la productividad de aquellos ingenios que resultaron ser ineficientes en el escenario sin mecanización de la cosecha de caña, tres de los cuales son El Carmen, San José de Abajo y El Refugio cuya eficiencia técnica relativa resulta ser del 69.0%, 69.82% y 75.0%, respectivamente.

Palabras clave: convexidad, frontera de producción eficiente, insumo virtual, producto virtual, unidad de toma de decisiones.

Analysis of the Technical Efficiency of the Sugar Cane Agroindustry in México using the Data Envelopment Analysis

Summary

In Mexico, the cultivation of sugar cane is the most important agroindustrial crop due to its economic impact in 267 municipalities and 15 states, representing 3% of the gross domestic product (GDP) of the agricultural sector. However, it is considered that the agro-industry of sugarcane, as it has a significant technological backwardness, manifests itself in the inefficiency of some of the sugar mills that make it up. In this context, the objective of this paper has been to quantify the relative technical efficiency of the 50 sugar mills that make up the sugarcane agroindustry in the field link through the methodology of data envelopment analysis based on linear programming. The results show that in the 2015/2016 harvest the agribusiness had an average relative technical efficiency of 89%, when the mechanization of the cane harvest is not considered and it rises to 96.5% when considering the mechanization of the cut and increase of such input. The research concludes that there is room for improvement in the productivity of those mills that proved to be inefficient in the scenario without mechanization of the cane crop, three of which are El Carmen, San José de Abajo and El Refugio whose relative technical efficiency it turns out to be 69.%, 69.82% and 75.0%, respectively.

Keywords: convexity, efficient production frontier, virtual input, virtual product, decision-making unit.

I. Introducción

De acuerdo con el CONADESUCA (2017) en la zafra 2016/2017 se cosecharon 777,078 hectáreas y se levantaron 53'308,643 toneladas de caña molida bruta. Se tuvo una oferta de 5'970,373 toneladas de azúcar base estándar. El rendimiento en fábrica fue de 13.194% y en campo de 68.6 toneladas por hectárea. El valor aproximado de la caña de azúcar, así como el del azúcar, alcanzaron los 42 mil 948 millones de pesos y 71 mil 486 millones de pesos en la zafra 2016/2017 respectivamente. Esta derrama económica tiene impacto directo en 267 municipios de 15 estados del país, donde habitan 15 millones de mexicanos. La agroindustria de la caña de azúcar del país tiene capacidad instalada para industrializar más de 53 millones de toneladas, producir más de seis millones de toneladas de azúcar que garantizan el abasto nacional y dan cumplimiento a los compromisos internacionales. En términos macroeconómicos, la caña de azúcar contribuye con el 3% del Producto Interno Bruto (PIB). Este contexto muestra la importancia de la agroindustria de la caña de azúcar en el sector agropecuario en particular y en la economía en general.

Por otro lado, si bien el cultivo de la caña de azúcar cuenta con una Ley y un Programa específico que regulan su funcionamiento y da directrices para la planeación, modernización y mejora de competitividad vía la investigación con un programa específico para la agroindustria , la operatividad, rentabilidad y contribución al impulso de la capacidad fabril para su molienda, presenta enormes desafíos emanados de la histórica crisis estructural y múltiples intervenciones que ha intervenido el sector público para rescatarlos por malas administraciones de la iniciativa privada. El corolario de tal situación son infraestructura y tecnología productiva poco eficientes, elevados costos de producción y una escasa diversificación en el uso de los coproductos y subproductos obtenidos en el ingenio azucarero y la destilería.

1.1 Planteamiento del problema

En México la situación actual de la agroindustria de la caña de azúcar es el resultado de un largo proceso de acomodados entre la iniciativa privada y el sector público. Es un sector agrícola muy complejo que va desde campo hasta la industrialización. El sistema bajo las que se producen el cultivo (temporal o riego) y la tecnificación puede arrojar diferencias en la eficiencia, es por eso que es importante ver que ingenios tienen alta eficiencia técnica y cuales no y así observar en qué condiciones se encuentran para que los menos eficientes puedan adoptar los manejos que los ingenios eficientes tienen.

1.2 Objetivos

Objetivo general

- Cuantificar el desempeño de la agroindustria de la caña de azúcar en México mediante el cálculo del índice de eficiencia técnica.
- Mostrar la utilización del análisis envolvente de datos como metodología de evaluación de la eficiencia relativa del eslabón de campo de la caña de azúcar.

Objetivos particulares

- Cuantificar el nivel de eficiencia técnica relativa entre los diferentes ingenios azucareros de México.
- Encontrar las diferencias entre los niveles de eficiencia relativa de los ingenios azucareros como unidades de toma de decisiones.
- Identificar los posibles factores causantes de las diferencias en eficiencia técnica de la agroindustria de la caña de azúcar en México.

1.3 Hipótesis

- La agroindustria de la caña de azúcar muestra cierto grado de ineficiencia técnica dado el atraso tecnológico que los ingenios azucareros han padecido debido a la escasa inversión realizada en dichas unidades.

-

II. Marco teórico

2.1 Frontera de producción

El análisis de la eficiencia técnica, es necesario analizar el término de frontera de producción. Ésta es definida como la función que dada una combinación de insumos o recursos permite obtener el producto máximo factible. De esta forma, la eficiencia involucra el conocimiento de dicha frontera de producción en la cual se encuentran ubicadas las entidades más productivas. De acuerdo con Farrell (1957), con esto se puede finalmente realizar una comparación entre las firmas y encontrar el nivel de desempeño.

2.2 Eficiencia técnica

Koopmans (1957), en la búsqueda de una medida de eficiencia técnica, propuso que una determinada combinación de insumos y productos era técnicamente eficiente sí para aumentar la cantidad de un producto, era necesario disminuir la producción de otro y/o aumentar la utilización de algún insumo, mientras que, para disminuir la cantidad utilizada de algún insumo, era necesario reducir la producción y/o aumentar la utilización de al menos otro insumo. Farrell (1957), considera que una medida de eficiencia técnica era la máxima contracción igualmente proporcional en todos los insumos que permitía continuar con la producción dado un vector de insumos.

2.3 El concepto de eficiencia en el Data Envelopment Analysis (DEA)

El concepto de eficiencia técnica, en el contexto del análisis envolvente de datos, empieza con la publicación de *Charnes, Cooper, and Rhodes* (1987) cuyo desafío fue originalmente el estimar tal concepto de eficiencia técnica considerando múltiples insumos, múltiples productos y sin la usual información de precios (Charnes *et al*). El resultado de aquel trabajo fue la formulación del llamado modelo Charnes- Cooper-Rhodes (CCR) del DEA en forma de una razón o ratio.

La metodología DEA involucra un principio alternativo para extraer información acerca de una población de observaciones como la que se ilustra en la Figura 1 de Charnes et al (1994).

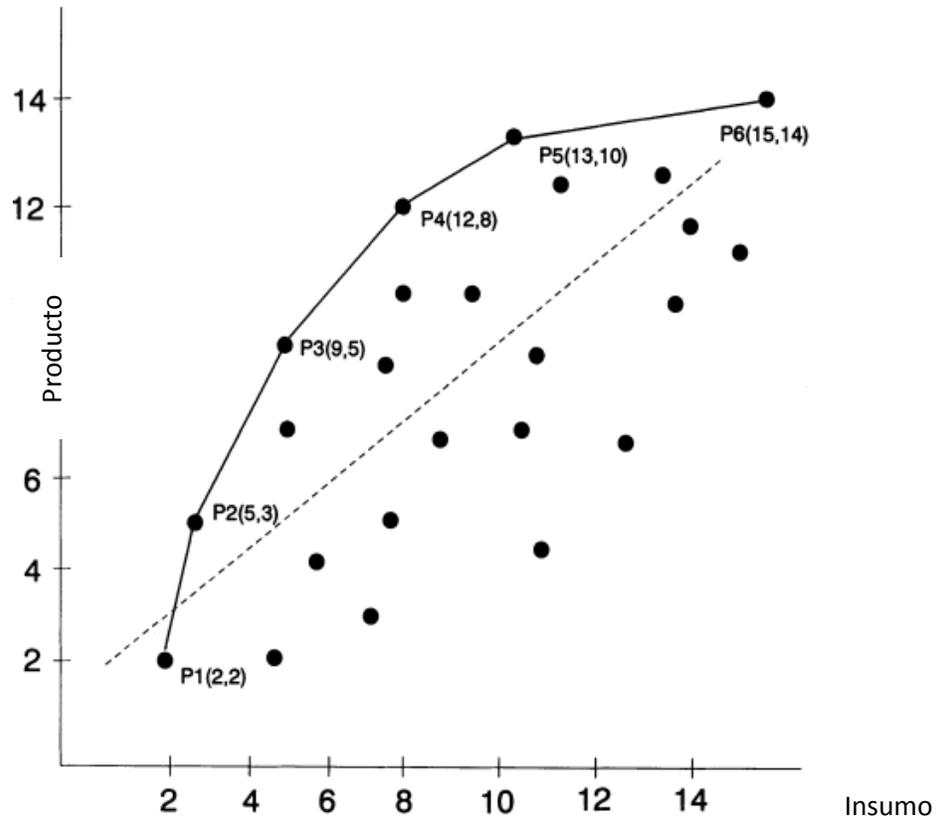


Figura 1. Comparación de la DEA y la regresión

Fuente: adaptado de Charnes et al (1994)

En contraste con los enfoques paramétricos, cuyo objetivo es optimizar un solo plano de regresión a través de los datos, la DEA optimiza para cada observación individual con el objetivo de calcular una frontera por partes discreta (piecewise) determinada por el conjunto de unidades de toma de decisiones (DMU) pareto-eficientes. Ambos enfoques, el paramétrico como el no paramétrico usan toda la información contenida en los datos. En el análisis paramétrico la línea de regresión optimizada se asume que aplica a cada una de DMU. El análisis DEA optimiza la medida, en contraste, del desempeño de cada DMU. Esto resulta en un entendimiento revelado acerca de cada DMU en lugar de la típica DMU promedio. En otras palabras, el foco de la DEA esta en las observaciones

individuales; es decir observación por observación, en contraste con el enfoque de promedios y estimación de promedios y estimación de parámetros que son asociados con los enfoques estadísticos de una optimización única (Charnes et al, 1994, pp. 4-6).

La aproximación paramétrica requiere la imposición de una forma funcional específica (por ejemplo, una ecuación de regresión, una función de producción, etc.). La forma funcional seleccionada también requiere supuestos específicos sobre la distribución de los términos de error (por ejemplo, independiente, idénticamente y normalmente distribuidos) y muchas otras restricciones como por ejemplo que a los factores de la producción se les paga el valor de su producto marginal. En contraste el análisis DEA ningún supuesto acerca de la forma funcional. En análisis DEA se calcula una medida del máximo desempeño de cada una de las DMU en relación a todas las DMU en la población observada con el único requisito de que cada DMU descansa sobre o debajo de la frontera extrema. Cada DMU que no se localiza sobre la frontera es escalada contra una combinación convexa de las DMU localizadas sobre la frontera.

Charnes, et al (1978) extendieron la idea de Farrell (1957) vinculando la estimación de la eficiencia técnica y fronteras de producción. El modelo Charnes, Cooper and Rhodes (CCR) generalizó la medida de eficiencia de un producto único y un insumo único de una DMU a una formulación de un modelo fraccional de programación lineal de múltiples productos y múltiples insumos. La eficiencia técnica relativa de cualquier DMU se calcula formando la relación de una suma ponderada de productos y una suma ponderada de insumos, donde los pesos (multiplicadores) para los productos y los insumos se deben seleccionar de una manera que calcule la medida de eficiencia de Pareto de cada DMU, sujeto a la restricción de que ninguna DMU puede tener una puntuación de eficiencia relativa mayor que la unidad (Charnes et al, 1994; pp. 5-6).

La línea sólida y continua en la Figura 5 representa una frontera derivada por DEA de datos en una población de DMU, cada una de las cuales utiliza cantidades diferentes de un solo insumo para producir varias cantidades de un solo producto. Es importante tener en cuenta que los cálculos de DEA, debido a que se generan a partir de los datos reales observados para cada DMU, solo producen medidas de eficiencia relativa. La eficacia relativa de cada DMU se calcula en relación con todas las otras DMU, utilizando los valores reales observados de los productos e insumos de cada DMU. Los cálculos del DEA están diseñados para maximizar el puntaje de eficiencia relativa de cada DMU, sujeto a la condición de que el conjunto de pesos obtenidos de esta manera para cada DMU también sea factible para todas las demás DMU incluidas en el cálculo. De esta manera, el DEA produce una superficie de producción extrema empírica por partes (por ejemplo, la línea continua en la Figura 5), que en términos económicos representa la frontera de producción de la mejor práctica revelada: o sea el máximo rendimiento empíricamente obtenible de cualquier DMU en la población observada, dado su nivel de insumos.

Para cada DMU ineficiente (aquella debajo de la frontera), el análisis envolvente de datos identifica las fuentes y el nivel de ineficiencia para cada una de los productos e insumos. El nivel de ineficiencia se determina por comparación con una DMU de referencia único o una combinación convexa de otras unidades de medida de referencia ubicadas en la frontera eficiente que utilizan el mismo nivel de entradas y producen el mismo o mayor nivel de salidas. Esto se logra al requerir soluciones para satisfacer las restricciones de desigualdad que pueden aumentar algunos productos (o disminuir algunos insumos) sin empeorar los otros insumos y productos. El cálculo de la mejora potencial para cada DMU ineficaz no se corresponde necesariamente con el rendimiento observado de alguna DMU real que constituya la frontera de producción pieza por pieza ni con una proyección determinística de una DMU ineficiente en la frontera eficiente.

Las mejoras calculadas (en cada una de los productos e insumos) para DMU ineficientes son indicativas de las mejoras potenciales que se pueden obtener porque las proyecciones se basan en el rendimiento de las mejores prácticas reveladas de DMU "comparables" que se encuentran en la frontera eficiente.

2.4 El modelo Charnes, Cooper y Rhodes (CCR) en forma de programación lineal

La metodología de la evaluación de la eficiencia técnica de las unidades de toma de decisiones y de la eficiencia media de un sector, en este caso la agroindustria de la caña de azúcar, se realiza mediante dos procedimientos. El primero está basado en la estimación de una función de producción estocástica. La función de producción utilizada es la propuesta por la teoría microeconómica convencional siendo las más comunes la Cobb-Douglas (CD), la transcendental logarítmica (Translog) y la de elasticidad de sustitución constante (CES). El procedimiento de estimación es análogo a la estimación por mínimos cuadrados excepto que el término error es un error compuesto. De esta manera el error se compone por un error estadístico que se distribuye normalmente y otro término error que captura las ineficiencias de las unidades económicas motivo de estudio (ingenios azucareros). Este último término error se asume que se distribuye: exponencialmente, que tiene una distribución *half-normal* (seminormal) o que sigue una distribución gamma.

El segundo procedimiento para la estimación de la eficiencia técnica de las unidades básicas de decisión es el llamado análisis envolvente de datos. Este método es un método no paramétrico pues no asume ninguna forma funcional específica y es puramente determinístico. Está basado en la programación lineal y se asume que las unidades de producción eficientes se localizan sobre la frontera de producción eficiente (por piezas) y las ineficientes por debajo de dicha "frontera". La desventaja obvia es que no permite realizar pruebas pues no se estiman parámetros y un modelo estadístico, como en el método de análisis de la frontera estocástica.

En la presente investigación se utilizará el enfoque del análisis envolvente de datos para realizar la evaluación de la eficiencia técnica a nivel de ingenio como la eficiencia técnica a nivel agroindustria. De una manera breve a continuación se exponen los fundamentos del análisis envolvente de datos como metodología que se utilizará.

Los modelos de la metodología del análisis envolvente de datos difieren según la forma de la frontera eficiente utilizada. Los dos modelos comúnmente utilizados son el llamado modelo CCR (Charnes, Cooper y Rodes, 1978) y el modelo BCC (Banker, Charnes y Cooper, 1994). Estas dos variantes de modelos de análisis envolvente de datos difieren porque el primero evalúa la escala y las ineficiencias simultáneamente, mientras el segundo evalúa exclusivamente la ineficiencia técnica. En este trabajo se utiliza el enfoque CCR el cual asume rendimientos constantes a escala de las unidades de toma de decisiones (DMU), la cual es una denominación convencional en el análisis envolvente de datos, comúnmente utilizada en la investigación de operaciones. En esta investigación, la unidad de toma de decisiones son los ingenios azucareros que operaron en el periodo de estudio.

La temática de la evaluación de la eficiencia técnica, la eficiencia asignativa o de costos y la eficiencia económica utilizando la función de producción de la microeconomía neoclásica, a partir de datos empíricos de las unidades microeconómicas (consumidores, empresas, instituciones, etc.), se inició formalmente con Farrell (1957). Posteriormente al trabajo de dicho investigador el análisis de la eficiencia de las unidades básicas de decisión siguió dos caminos. El primero fue el del análisis de frontera estocástica y el análisis envolvente de datos.

El CCR asume, como se ha mencionado, retornos constantes a escala (CRS). Este modelo es apropiado cuando todas las firmas analizadas operan en la escala óptima. Charnes *et al* (1978) definen a la eficiencia como el máximo de un

ratio de insumos ponderados entre insumos ponderadas, sujeto a que los ratios similares para cada DMU sean menores o iguales a la unidad. De acuerdo a Huguenin (2012) en forma matemática estas ideas puede expresarse como sigue:

$$TE_K = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rk}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ik}}$$

Donde TE_k es la eficiencia tecnica de la firma k que usa k insumos para producir s productos; y ademas

- y_{rk} = cantidad de producto r producido por la firma k
- x_{ik} = cantidad de insumo i consumido por la fima k
- u_r = ponderador del producto r
- v_i = ponderador del insumo i
- n = número de firmas a ser evaluadas
- s = número de productos
- m = número de insumos

La eficiencia técnica de la empresa k se maximiza bajo dos restricciones. Primero, las ponderaciones aplicadas a los productos e insumos de la empresa k no pueden generar un puntaje de eficiencia mayor a 1 cuando se aplica a cada empresa en el conjunto de datos. Segundo, los ponderadores de los productos e insumos son estrictamente positivos. De esta manera para cada firma se debe resolver el siguiente problema de programación lineal:

$$\text{Maximizar } \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rk}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ik}}$$

$$\text{Sujeto a } \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1 \quad j = 1, \dots, n$$

$$u_r, v_i > 0 \quad \forall r = 1, \dots, s; \quad i = 1, \dots, m$$

Este problema de programación lineal puede ser tratado siguiendo dos enfoques diferentes. En el primer caso las sumas ponderadas de insumos son maximizadas manteniendo los insumos constantes (modelo insumo orientado). En el segundo caso, las sumas ponderadas del insumos son minimizadas manteniendo los productos constantes (modelo producto orientado). Las ecuaciones del primal para cada modelo, expresadas en su forma multiplicativa, son las siguientes:

Modelo CRS producto orientado

$$\text{Min } \sum_{i=1}^m v_i x_{ik}$$

Sujeto a

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rk} = 1$$

Modelo CRS insumo orientado

$$\text{Max } \sum_{r=1}^s u_r y_{rk}$$

Sujeto a

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ik} = 1$$

$$u_r, v_i > 0 \quad \forall r = 1, \dots, s; i = 1, \dots, m$$

$$u_r, v_i > 0 \quad \forall r = 1, \dots, s; i = 1, \dots, m$$

El concepto de dualidad de la programación lineal, una forma equivalente, conocida como la forma envolvente, puede derivarse de este problema. A menudo es preferible resolver el los calculos utilizando la forma envolvente porque contiene solo restricciones $s + m$ en lugar de $n + 1$ restricciones en la forma del multiplicativa.

Modelo CRS producto orientado

Modelo CRS insumo orientado

Ecuación dual

Ecuación dual

Maximize ϕ_k

Minimize θ_k

Sujeto a

Sujeto a

$$\phi_k y_{rk} - \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \leq 0 \quad r = 1, \dots, s$$

$$y_{rk} - \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \leq 0 \quad r = 1, \dots, s$$

$$x_{ik} - \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{rj} \geq 0 \quad i = 1, \dots, m$$

$$\theta_k x_{ik} - \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \geq 0 \quad r = 1, \dots, m$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, n$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, n$$

III. LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA

3.1 El cultivo de la caña de azúcar

A continuación, se describirá el proceso desde la siembra hasta la transformación del azúcar.

3.1.1 Preparación del terreno

Para iniciar el proceso del cultivo de la caña primero se debe adecuar el suelo para poder permitir una buena germinación de la semilla, tiene que haber una relación agua-suelo-planta-aire. Para prepararlo se deben eliminar rastros de malezas y cosechas interiores, eliminar fauna dañina para el cultivo y lograr un buen intercambio gaseoso. Una de las características que se deben tomar en cuenta para la preparación del suelo es su textura y dureza.

Una de las primeras prácticas a realizar es la implementación de un subsoleo. El subsoleo consiste en un arado de cinceles que va a romper el suelo a una profundidad de 50 a 75 cm para eliminar la compactación que se tiene del pastoreo animal del término de la cosecha anterior o bien de la misma maquinaria pesada, al romper el suelo se lograra una mayor filtración de agua lo que no permitirá el estancamiento en la superficie del suelo, también abrirá paso al aire y habrá mayor absorción de nutrientes.

Posteriormente, se realiza la labor de barbecho, la cual se realiza con arado de discos, se realizan dos barbechos el primero a una mayor profundidad para seguir rompiendo y fragmentando más el suelo, se voltea el suelo y esto permite que las semillas de malezas y microorganismos dañinos se expongan al sol, agua y aire y así eliminarlas. El segundo barbecho se realiza de forma cruzada para seguir pulverizando más el suelo.

La siguiente actividad a realizar es la rastra, lo cual se rompe más los terrones que quedaron de los dos barbechos y logra que el suelo este mas pulido listo para permitirá una buena siembra. Una vez rastreado, por último, se pasan las surcadoras que ya se prepara el terreno en surcos de 1.2-1.4 m de ancho para

hacer más eficientes las posteriores labores de cultivo, la distancia de surcado también puede depender en el caso de los cultivos que serán de riego, de ser el caso se puede surcar en una distancia de 1.4 con separación de dos surcos a 0.6 m instalando en el centro de estas el sistema de riego.

3.1.2 Siembra o Plantación

Para la siembra o plantación se deben considerar varios factores para su buen aprovechamiento, la calidad de la semilla o material vegetativo que se utilizara para la siembra debe tener aproximadamente entre 8 y 10 meses, debe estar libre de infestaciones como el virus del mosaico, roya, carbón, etc. que al momento de su crecimiento pueda causar problemas en el desarrollo de la planta ya que es notoria la diferencia en cuanto rendimientos de producción de azúcar sembrando plantas sanas comparadas con plantas infestadas, para evitar infestaciones se recomienda un tratamiento hidrotérmico para poder controlar patógenos sistémicos. Otras de las características que debe tener la semilla para ser sembrada es el vigor del tallo, la cantidad de yemas con buen poder germinativo, el tiempo entre el corte y siembra y la calidad genética.

La cantidad de semilla a utilizar va a depender del largo de los trozos de la caña y del tipo de método de siembra, ya sea cruzado o doble, los trozos de caña que se siembran oscilan entre 30 a 50 cm de longitud con dos o 3 yemas, el método de siembra a cordón doble consiste en colocar los tallos de caña punta y cola, con este método se emplea más material vegetativo y se evita tener espacios vacíos a la hora de brotar. En el caso de la siembra cruzada, este consiste en colocar los tallos de manera que se toquen punta con cola, en este tipo de método como es una siembra más lineal permite mejor brotación y la densidad de siembra a utilizar es menor que la siembra a cordón doble.

En caso de que la brotación no sea uniforme, lo que se realiza es una resiembra para rellenar las partes donde no brotaron las semillas. Para evitar brotaciones no uniformes se debe fertilizar regar correctamente, se debe aplicar una fertilización de fósforo antes de la siembra y un riego después de las 24 horas de

haber sido sembrada y posteriormente a los 8 días se le aplica un segundo riego siendo el caso para siembras bajo sistema de riego o aquellas que son de riego emergente.

3.1.3 Riego

Para los sistemas de producción bajo temporal a veces es necesario riegos de auxilio y se efectúan de 3 a 5 riegos por gravedad o riegos rodados que pueden ser en las etapas más críticas de sequías. Por otra parte, en los cultivos bajo condiciones de riego se efectúan irrigaciones con periodicidad de 20 a 25 días y pueden ser sistemas por goteo o por cañones. El sistema por cañones tiene una eficiencia de 75 al 80 por ciento, este tipo de riego se monta sobre un carro que se desplaza mediante un cable transportando la manguera que en su extremo está unido a la toma de agua. El sistema de riego por goteo es de los sistemas más eficientes y más usados, su eficiencia oscila en los 95 por ciento y se caracteriza por distribuir el agua mediante gotas donde humedece el área donde se encuentra la planta alimentando directamente a las raíces.

3.1.4 Nutrición

La caña de azúcar al igual que otras plantas requiere para su crecimiento nutrientes que le permitan tener un buen desarrollo, los que más requiere son los macronutrientes como el Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K), los primeros 3 son elementos que encuentra la planta mediante el agua y el aire, el resto de los macronutrientes debe administrarse mediante fertilizantes.

Los requerimientos nutritivos para la caña de azúcar varían de acuerdo al suelo, clima, manejo de cultivo y etapa fenológica de la planta. Velasco (2014) dice que por ha se extraen de 130-200 kg de nitrógeno al año, 80-100 kg de fosforo y 300-350 kg de potasio. Dicho lo anterior el potasio es de los nutrientes que se aplica en mayor cantidad, esto se debe a que el potasio es un elemento importante para

la osmoregulación, activación de enzimas, interviene en la fotosíntesis, ayuda controlar los movimientos de los azúcares y en el uso eficiente de agua.

Para fertilizar, antes se deben considerar realizar un estudio previo del suelo para así poder ver la disponibilidad de elementos, en el momento de fertilizar el suelo debe contar con la humedad necesaria, la cantidad de fertilizante también dependerá de la densidad de siembra, el control de maleza también importa ya que mayor competencia para la caña de azúcar significará competencia en cuanto a nutrimentos, luz, agua.

Las épocas de fertilización se harán de acuerdo al estado fenológico de la planta, se recomienda aplicar al momento de la siembra fósforo y potasio, para obtener mayor brotación y mayor población, la siguiente se realiza cuando la planta tenga de 40-50 cm, en esta etapa se debe aplicar los 3 elementos principales, pero el nitrógeno en mayor cantidad.

3.1.5 Control de malezas, plagas y enfermedades

Evitar las malezas es importante para evitar bajas en los rendimientos en campo, baja calidad en los tallos, vida productiva de los cañaverales. Como se había mencionado antes, las malezas compiten con la caña por nutrientes, agua, luz y espacio, he ahí que los periodos críticos para eliminar las malezas son entre los primeros 120 días de la siembra o de los cortes, es por eso que se aplican herbicidas preemergentes y poseemergentes, que es cuando la maleza aún no ha germinado o cuando hay una emergencia temprana. También se pueden combinar con controles mecánicos o manuales, dentro de esta está el uso de azadón y machete, el tiro de mula, o bien tractores o desbrozadoras, estos se pueden realizar cuando hay plantaciones sensibles a herbicidas hormonales.

Para la aplicación de herbicidas se deben calibrar el equipo de aspersion y boquillas, al momento de su aplicación el suelo debe tener buena humedad, se deben emplear reguladores de pH y se deben aplicar los herbicidas en el día con baja radiación y poco viento.

Algunas plagas de impacto económico para la caña de azúcar son el barrenador del tallo, mosca pinta y la rata de campo. En México los barrenadores del tallo se consideran la plaga más importante ya que afecta más en épocas secas y cálidas, provocando túneles longitudinales dentro del tallo. Para controlarlo, primeramente, en la siembra se deben plantar semillas sin infestaciones de barrenador, ya cuando la planta esté en amacollamiento lo que se realiza es la entresaca de cogollos para eliminar la mayor cantidad de larvas de este insecto, una forma de eliminarlo biológicamente es por medio de la liberación de *Trichogramma sp* que son avispietas o bien hongos entomopatógenos. Para eliminarlas con control químico lo que se puede utilizar son insecticidas de contacto o bien sistémicos de baja toxicidad, pero en estos casos son aplicaciones para eliminar el adulto ya que difícilmente afecta a las larvas que se encuentran dentro del tallo barrenando.

En el caso de la mosca pinta, la ninfa de esta chupa la savia de las raíces y hojas liberando una toxina que llegan a reducir la producción de azúcar. Para evitar esta plaga, se hace un control preventivo que es eliminar toda maleza de hoja angosta dentro y fuera del cultivo, ya que ahí es donde se puede encontrar. Para controlarla químicamente, se han utilizado insecticidas de baja toxicidad que son a base de Bifentrina e Imidacloprid con ingredientes activos.

Los roedores son plagas más grandes y también de impacto económico para la caña de azúcar, estas únicamente pueden ser controladas bajo trampas de tipo golpe o de jaula.

Para el control y manejo de enfermedades en la caña, primeramente, se debe de utilizar semilla sana, que sean variedades resistentes, si se llegan a presentar plantas enfermas eliminarlas rápidamente para evitar contagio. Son muy escasos los usos de agroquímicos para controlar las enfermedades, por lo que la parte genética es la más importante y se deben sembrar variedades que sean altamente resistentes.

Entre las enfermedades más importante económicamente en la caña de azúcar podemos encontrar la roya de café que es causada por un hongo, *Puccinia melanocephala*, lo cual se presenta mediante manchas amarillas por ambos lados de la hoja y posteriormente se van tornando un color café o marrón.

Otra enfermedad es el virus del mosaico, los síntomas de esta enfermedad se observan en las hojas presenta un área clorótica o bien una necrosis. La Mancha de Ojo, esta enfermedad es causada por un hongo, presenta lesiones en las hojas de color rojizo con márgenes amarillos y se puede extender hacia la parte apical de la hoja, esta se puede presentar en ambientes con elevada humedad que permite la germinación de conidios. Mancha del anillo, también causada por un hongo, el síntoma de esta enfermedad son lesiones ovaladas en las hojas que van de color verde oscuro a café con un halo amarillo que al irse agrandando se vuelve color paja.

3.1.6 Cosecha

La cosecha es la labor de las más importantes, ya que ella puede afectar considerablemente la rentabilidad del cultivo y puede tener consecuencias en los costos de producción. Esta se debe realizar cuando la planta alcanza la madurez industrial y contenga la mayor concentración de azúcares. Estas concentraciones van de los 15 a los 17 %de POL.

La cosecha puede realizarse de acuerdo a estos 3 métodos, la primea es corte y alza manual, es lento y costoso, pero permite una cosecha más limpia. Corte manual y alza mecánica, y por último el corte y alza mecánica, este último es más rápido y económico, pero puede tener danos colaterales como es compactación del suelo, desprendimiento de cepas por las cuchillas y se incrementa la impureza de la caña. La utilización de cualquiera de esos métodos va a depender de la pendiente del terreno, la calidad de materia prima y la capacidad de molienda en el ingenio.

3.1.7 Producción de azúcar

Para la producción de azúcar es importante saber cómo está compuesta la planta, su composición química va de 73-76% de agua, del 10-16% sólidos solubles y del 11-16% fibra. Del porcentaje de sólidos solubles se encuentra en una gran cantidad la sacarosa que va de 70-88%. La sacarosa es la principal materia prima para la elaboración de azúcar, por eso en la cosecha es importante que alcance el nivel de %Pol para la eficientizar la producción de azúcar dentro del ingenio azucarero.

3.1.8 Recepción de la caña

El proceso de la industria empieza desde que se recibe la caña del campo, en ella se pesa en bruto con el camión y se le resta el peso de la tara y una vez pesándolo se hace un muestreo o análisis de laboratorio donde se hacen los estudios de calidad. Con los datos de peso y calidad se pueden obtener datos sobre el rendimiento industrial que va a obtener la planta que es kilogramos de azúcar producida/toneladas de caña molida, se emite un reporte y en base a eso se paga a los productores evaluando premiando y castigando de acuerdo al porcentaje de °Brix.

3.1.9 Preparación de la caña

Después de la descarga de la caña, se homogeniza el material para tener una alimentación continua y uniforme a los molinos, esto con la finalidad de facilitar la extracción del jugo y reducir pérdidas de sacarosa en el bagazo. La preparación se lleva a cabo reduciendo la longitud de la caña en trozos pequeños mediante cuchillas giratorias y desintegrando el tejido de la caña con martillos oscilantes sin filo.

3.1.10 Molienda de la caña de azúcar

Una vez preparada la caña de azúcar, se alimentan los molinos en donde se extrae el jugo por acción mecánica. Los molinos están en arreglos de cuatro mazas, maza cañera, maza superior, maza bagacera y cuarta maza, esta última está integrada mediante un sistema alimentador vertical, con esta última se forma un colchón de cana desfibrada o cana molida, la altura del colchón sirve para controlar la alimentación al molino y la flotación de la maza superior.

En ingenios cogeneradores de energía eléctrica, se han sustituido las turbinas de vapor por motores eléctricos, debido a la eficiencia en la transformación de energía del vapor de alta presión en energía eléctrica. El proceso de imbibición consiste en aplicar agua caliente a 70 °C al bagazo que alimenta al último molino, el jugo extraído en el último molino se aplica al bagazo del penúltimo molino y así hasta hacer una retroaplicación del jugo hasta el segundo molino.

El bagazo que se obtiene en el último molino ya con mínimas cantidades de sacarosa y humedad se transporta para alimentar los hornos de las calderas. Se utiliza como combustible para generar vapor sobrecalentado de alta presión y poder utilizar las turbinas de vapor en molinos y en turbogeneradores de electricidad. Luego de ceder energía a las turbinas el vapor de salida es utilizado para los procesos en la fabricación de azúcar.

3.1.11 Clarificación del jugo

El jugo obtenido de los molinos contiene tierra arcillo, bagacillo, y otro tipo de basuras propias de la caña. En la clarificación se deben remover las impurezas que contiene el jugo para obtener el jugo clarificado. Es importante saber las características para producir la calidad de azúcar. Si la calidad de azúcar que se desea producir es blanca, se debe dosificar al jugo ácido fosfórico. Los fosfatos solubles forman precipitados al reaccionar con el calcio de la cal. Es necesaria una concentración de fosfato de 300 ppm en el jugo.

Después, se bombea a la torre de sulfitación donde se pone en contacto con anhídrido sulfuroso, para evitar formación de anhídrido sulfúrico o ácido sulfúrico.

El jugo alcalinizado se bombea al tanque flash liberando vapor de agua y de ahí el jugo pasa a los clarificadores, en los clarificadores los sólidos insolubles se sedimentan y se separan de la fase líquida. El jugo claro decantado se descarga por gravedad y pasa a un cabezal hasta llegar a un set de coladores rotativos. Estos coladores están dotados de telas para eliminar partículas de bagacillo muy finas que no se eliminan durante el proceso de clarificación. El jugo se recolecta en un tanque de jugo claro y se bombea hacia los evaporadores. El jugo debe contener menor cantidad de partículas suspendidas y su color debe ser amarillo brillante.

3.1.12 Evaporación del jugo

El jugo claro se concentra entre 15-18 °Brix y se evapora hasta formar meladura con concentraciones de 65-67 ° Brix. La concentración se logra evaporando el jugo haciéndola hervir en evaporadores llegando hasta el punto de ebullición. Los evaporadores se disponen en un arreglo para formar un sistema de triple efecto, el vapor generado de un evaporador es capaz de calentar y evaporar agua y hervir el jugo de otro evaporador de tal manera que el punto de ebullición del jugo descienda entre los sistemas de evaporación.

3.1.13 Clarificación de la meladura

Las concentraciones de las impurezas aumentan durante la evaporación, se deben remover tanto como sea posible es por eso que se realiza el proceso de clarificación. Esta se realiza mediante varios subprocesos. Primero se hace un tratamiento fisicoquímico que consiste en formar conglomerados de partículas dosificando ácido fosfórico, floculante y cal y después se remueven las sustancias colorantes dosificando agua sulfitada. Posteriormente se calienta la meladura de 145 °F hasta llegar a los 175 °F. A la meladura se le inyectan burbujas de aire que arrastran a los flóculos de impurezas hacia arriba formando

una espuma flotante en la superficie de la meladura. Después la meladura es separada de esos flóculos mediante decantación por un cabezal a un tanque para que esté listo y sea bombeada a los tanques donde se desarrollara el cristal.

3.1.14 Desarrollo del cristal

La cristalización consiste, como su nombre lo dice, en cristalizar la sacarosa. Los cristales de sacarosa se desarrollan porque sus moléculas logran integrarse a la estructura o red de cristal y al ir creciendo va disminuyendo la pureza de la miel. El método para cristalizar es por semillamiento, la solución azucarada se concentra en un tacho operado a un vacío de alrededor de 24 HG llevando a la concentración de la misma a grado de saturación o sobresaturación con 80 grados brix, a ese punto los cristales crecen de tamaño, pero no aparecen nuevos cristales. De ser el caso, se agrega una cantidad determinada de semilla y se mantiene el régimen de evaporación agregando agua caliente para evitar viscosidad alrededor de los cristales.

3.1.15 Producción de azúcar refinado

El proceso para refinar azúcar blanco sulfitado, consiste en disolver azúcar de 230-250 unidades ICUMSA de color producida en la fábrica; el jarabe obtenido se le denomina licor disuelto. El licor disuelto se trata con carbón activado y calor para decolorarlo, simultáneamente se le adiciona tierra de diatomeas como ayuda filtrante. La mezcla obtenida se le denomina licor tratado, el cual se filtra a través de un sistema de filtros primarios. El licor obtenido se pasa por un segundo juego de filtros secundarios. El licor filtrado final es de alrededor de 150 unidades ICUMSA de color y libre de partículas sólidas suspendidas.

3.1.16 Acondicionamiento del azúcar

El azúcar ya obtenido a pesar de que paso por un proceso de secado contiene alta humedad. Se debe someter a un proceso de secado y posteriormente a uno de enfriamiento para evitar deterioros en almacenaje y envasado de este y

conserve sus estándares de calidad que el cliente final desea. Para estos procesos se atraviesa el azúcar por un cilindro rotativo que provocan una cortina de azúcar transversal expuesta al flujo de aire en contracorriente, el tiro de aire es producido por un ventilador al extremo del cilindro rotativo y a la entrada del cilindro se encuentra la secadora donde se inyecta vapor a 100 psig, dentro de las centrifugas el azúcar llega a tener una humedad de 1-2%. El azúcar crudo debe tener una humedad entre 0.11 a 0.35%.

3.1.17 Ubicación de la agroindustria cañera

En México, la caña de azúcar es uno de los cultivos más importantes desde el punto de vista económico y social ya que se encuentra en 15 Estados del país abarcando 127 municipios en su mayoría rurales, donde más de 2.2 millones de personas trabajan tanto en campo como en la agroindustria. De acuerdo con el CONADESUCA (2017) en la zafra 2015/2016 en la agroindustria de la caña de azúcar en México operaron 51 ingenios cañeros. La distribución por entidad se muestra en el Cuadro1.

Cuadro 1. Localización de los ingenios cañeros de México

No.	Entidad	Ingenio	No.	Entidad	Ingenio
1	Campeche	La Joya	27	SLP	Plan de San Luis
2	Chiapas	Huixtla	28	Tabasco	San Miguel del Naranjo
3		Pujilic	29		Azsuremex
4	Colima	Quesería	30		Presidente Benito Juárez
5	Jalisco	Bellavista	31		Santa Rosalía
6		José María Morelos	32	Tamaulipas	Aarón Sáenz Garza
7		Melchor Ocampo	33		El Mante
8		San Francisco Ameca	34	Veracruz	Central La Providencia
9	Tala	35	Central Motzorongo		
10	Tamazula	36	Central Progreso		
11	Michoacán	Lázaro Cárdenas	37		Constancia
12		Pedernales	38		Cuatotolapan
13		Santa Clara	39		El Carmen
14	Morelos	Central Casasano	40	El Higo	
15		Emiliano Zapata	41	El Modelo	
16	Nayarit	El Molino	42	El Potrero	
17		Puga	43	La Gloria	
18	Oaxaca	Adolfo López Mateos	44		Mahuixtlán

19		El Refugio	45	Pánuco
20		Pablo Machado	46	San Cristóbal
21	Puebla	Atencingo	47	San José de Abajo
22		Calipam	48	San Miguelito
23	Quintana Roo	San Rafael de Pucté	49	San Nicolás
24	Sinaloa	Eldorado	50	San Pedro
25	SLP	Alianza Popular	51	Tres Valles
26		Plan de Ayala		

Fuente: CONADESUCA (2017).

Como se puede observar, el grueso de la agroindustria de la caña de azúcar ingenios se localiza en Veracruz con 18 ingenios azucareros, Jalisco con seis ingenios azucareros y San Luis Potosí con cuatro ingenios azucareros.

IV. Revisión de Literatura

Kumar y Arora (2012) en su trabajo, estudian las variaciones intertemporales e interestatales en los niveles de eficiencia técnica y eficiencia de escala de la industria azucarera de la India utilizando datos de corte longitudinal para 12 Estados en un periodo de 31 años (de 1974/75 a 2004/05). Un segundo objetivo de este estudio fue identificar los determinantes de la eficiencia técnica de la referida industria utilizando la regresión tobit con datos de panel.

Los autores, a partir de los resultados empíricos, observaron que, en promedio, la industria azucarera de la India está operaba con un alto nivel de ineficiencia global de aproximadamente del 35.5%, lo cual indicaba que, en promedio, se podía producir un 35.5% más de producción en la industria azucarera hindú usando el mismo paquete de insumos y adoptando las mejores prácticas. En el estudio se identifica que la mayor causa de la ineficiencia técnica es la administración (gerencia) más que la ineficiencia de escala. También en el trabajo se menciona que existe una gran variación en la ineficiencia técnica global pues variando en el rango de 43.67% y el 73.77%. Se resalta el hecho que la dominancia de la ineficiencia administrativa-gerencial como principal fuente de la ineficiencia global es un fenómeno perverso no limitado a algún estado de la India; pues en cada estado productor de azúcar, la inhabilidad administrativa en la organización de los insumos del proceso productivo es la principal fuente de la ineficiencia global. Al hacer un análisis comparativo de las medidas de eficiencia entre el periodo que antecedieron a las reformas y el periodo posterior a las reformas, se observó que el proceso de reformas económicas había fallado en ejercer algún impacto positivo o negativo sobre la eficiencia de la industria azucarera hindú a nivel nacional o estado; lo cual es evidencia del hecho que la eficiencia promedio de la industria observo un declive en el periodo posterior a las reformas. En el artículo se define el periodo pre-reformas al periodo que corre de 1947/75 a 1990/91 y al periodo post-reformas al periodo 1991/92 a 2004/05.

El análisis de regresión truncada con datos de panel persiguió examinar el impacto de varias variables explicatorias sobre las medidas de eficiencia y ello reveló que tanto la disponibilidad de mano de obra calificada como la rentabilidad tienen una relación positiva con la eficiencia técnica global como con la pura eficiencia técnica. Se encontró también que la intensidad de capital tiene un impacto negativo y estadísticamente significativo en las tres medidas de eficiencia, lo que indica que una mayor mecanización no conduce a aumentar la eficiencia de la industria azucarera hindú debido a la probable existencia de exceso de capacidad en la industria azucarera de la India.

La investigación finaliza afirmando que en general el análisis empírico muestra que la industria azucarera de la India presentaba altos niveles de ineficiencia gerencial en los principales Estados productores de azúcar, la cual parecía ser el resultado de intervenciones gubernamentales excesivas. Se afirma que la interferencia del gobierno en el proceso de producción obligaba a los gerentes a elegir una segunda mejor combinación alternativa de insumos en lugar de elegir la mejor asignación de recursos y por lo tanto, como resultado, las ineficiencias gerenciales prevalecieron en las operaciones de producción de las empresas azucareras. Además, la mayoría de los ingenios operaban con enormes pérdidas y, por lo tanto, no funcionan de manera eficiente en medio de la crisis financiera. La mayoría de las veces, se observó que las empresas azucareras eran las incumplidoras, incluso en el pago de los atrasos de la caña de azúcar. La rentabilidad negativa por lo tanto, obstaculizaba la eficiencia técnica de la industria azucarera.

Barrios (2007), expone los resultados sobre la medición de eficiencia técnica relativa de un conjunto de Unidades Básicas de Producción Cooperativas cañeras de la provincia de Villa Clara, Cuba, utilizando la metodología del análisis envolvente de datos. Señala que históricamente el sector agroindustrial azucarero ha tenido un peso determinante en la dinámica reproductiva de la economía cubana pero que sin embargo la pérdida del mercado preferencial de los países

socialistas con la desaparición de este sistema en Europa Oriental, unido al propio agotamiento del modelo estructural y funcional provocaron en Cuba una singular crisis económica. Por lo tanto, el sector agroindustrial azucarero cubano no fue ajeno a la misma, al reducirse drásticamente los precios de comercialización de azúcar reduciéndose sustancialmente los ingresos de este sector. Esta situación conllevó a que se reevaluara para el desarrollo prospectivo de Cuba dos alternativas fundamentales: elevar la productividad y efectividad de la producción cañera azucarera y diversificar integralmente, para distribuir los riesgos y ser más independientes del mercado del azúcar. Señala que a pesar de la implementación del Programa de Reestructuración de la Agroindustria Azucarera los resultados aún no se corresponden totalmente con los objetivos-metas de la producción cañera debido a una deficiente gestión de los recursos productivos en estas entidades productoras a factores exógenos como la carencia de algunos insumos en el mercado nacional, la elevación del precio de los mismos, la sobreexplotación de los suelos, las prolongadas sequías, entre otros. Por lo tanto, el objetivo fundamental de su trabajo fue identificar la eficiencia relativa de estas empresas productoras de caña, la eficiencia de escala correspondiente y de esta forma disponer de una información para fundamentar las líneas de actuación en la búsqueda de mayores niveles de producción con la utilización mínima de recursos.

Señala que el concepto de eficiencia es un concepto multidimensional pues las empresas suelen producir múltiples productos a partir de múltiples insumos y que la evaluación de la eficiencia mediante el análisis envolvente de datos se centra preferentemente en la medición de la eficiencia técnica debido a la dificultad que supone el conocimiento de los precios de productos e insumos. El procedimiento para la estimación de la eficiencia técnica fue el desarrollado por Charnes, Cooper y Rhodes (CCR, 1978). El modelo CCR considera la medida de eficiencia como el cociente entre la suma ponderada de los productos con la de insumos de cada unidad de decisión y es un programa fraccional en un programa ordinario lineal, a efectos del cálculo de los índices de eficiencia. En el apartado de

resultados la autora explica que el análisis de eficiencia se realizó para 90 ingenios azucareros.

Chaitip, Chukiaty y Inluang (2014), examinan las propiedades estadísticas de la eficiencia técnica de la producción de caña de azúcar en Tailandia utilizando el método de bootstrapping. Los datos utilizados para estimar la eficiencia técnica de la caña de azúcar fueron datos de panel para un periodo de cinco años (2008-2012) y recolectados de hogares agrícolas en las regiones cañeras de mayor relevancia en Tailandia. La eficiencia técnica fue modelada como una función del rendimiento de la caña de azúcar y de los factores de la producción. Los resultados indican que las propiedades estadísticas y la eficiencia técnica en términos del rendimiento de la caña por unidad de superficie, es significativamente influenciada por el área cultivada y los factores locales de la precipitación. Entre los resultados también se destaca que la eficiencia de escala muestra que, para dos años, el análisis de la eficiencia técnica de los hogares agrícolas involucrada en la producción de azúcar puede ser adoptada para análisis de política basada en los enfoques del análisis envolvente de datos de panel porque la media de este enfoque iguala la media del enfoque del análisis envolvente de datos ordinario con datos de panel solamente en los años de 2008 y 2011.

Nanda and Sujarwo (2016), afirman que en su país la demanda de azúcar es mayor que la oferta y su gobierno tiene un plan de autosuficiencia de mediano plazo. La importancia del programa es porque pretende lograr la autosuficiencia para satisfacer las necesidades nacionales de azúcar, utilizar los recursos de manera óptima, aumentar el bienestar de los agricultores y la sociedad, y aumentar las oportunidades de trabajo, de modo que pueda reducir el nivel de desempleo y por lo tanto los objetivos de su estudio tiene como objetivos: (1) analizar los factores que afectan la producción de caña de azúcar, (2) analizar el nivel de eficiencia técnica en la producción de caña de azúcar e (3) identificar las características de los encuestados relacionadas con el nivel de eficiencia

alcanzado en las actividades de producción de caña de azúcar. La muestra analizada consiste de todos los 36 pequeños productores caña de azúcar de la aldea de Sutojayan quienes son socios del ingenio cañero cercano a su población. La metodología de análisis para los dos primeros objetivos es el análisis estocástico de frontera y se utiliza el Stata 14.

Para la determinación de los factores que influyen la eficiencia técnica se utilizó la siguiente forma funcional:

$$\ln Y_i = \ln \beta_{0i} + \beta_{1i} \ln X_{1i} + \beta_{2i} \ln X_{2i} + \beta_{3i} \ln X_{3i} + \beta_{4i} \ln X_{4i} + \beta_{5i} \ln X_{5i} + \beta_{6i} \ln X_{6i} + (v_i - u_i)$$

Donde:

Y	=	Cantidad de caña de azúcar producida	quintales
β_0	=	Ordenada al origen o intercepto	
β_i	=	Parámetros estimados	
X_1	=	Tamaño de explotación	hectáreas
X_2	=	semillas	Quintales
X_3	=	Fertilizante ZA	Quintales
X_4	=	Fertilizante phonska	Quintales
X_5	=	Herbicidas	Litros
X_6	=	Trabajo	Días-hombre
i	=	Agricultor- i , $i = 1, 2, 3, \dots, n$	
g	=	Término del error del agricultor- i , $g = v_i - u_i$	
v_i	=	Término de error estocástico	
u_i	=	Efectos de la ineficiencia técnica	

De acuerdo con los autores, que citan a Coelli *et al* (1998), la ecuación matemática de la eficiencia técnica en el marco de la frontera estocástica es:

$$TE_i = \frac{Y_i}{\exp(x_i\beta)} = \frac{\exp(x_i\beta - u_i)}{\exp(x_i\beta)} = \exp(-u_i)$$

donde

- TE_i = Eficiencia técnica
- Y_i = La cantidad producida de caña de azúcar por el agricultor - i
- X_i = Cantidad de insumo usado por agricultor - i
- β_i = Parámetro estimado
- u_i = Variable aleatoria asociada con la eficiencia técnica
- i = Agricultor - $i, i = 1, 2, \dots, n$

Entre más alto el valor de u_i esta asociado a una mayor ineficiencia de la respectiva empresa. El valor del índice de ineficiencia técnica está entre cero y la unidad; es decir, si el índice esta cercano a la unidad implica que la empresa es altamente productiva La ineficiencia técnica de las actividades de cultivo de la caña de azúcar se prueba en función del valor de los parámetros σ^2 y gama (γ). La prueba de hipótesis en esta investigación es la siguiente:

La ineficiencia técnica de las actividades agrícolas de la caña de azúcar es probada sobre el valor de σ^2 y los parámetros γ . La prueba de hipótesis en la investigación son los planteados de la siguiente forma:

a. Los parámetros σ^2

H₀: $\sigma^2 = 0$, lo cual significa que no hay efectos de ineficiencia técnica en el modelo

H₁: $\sigma^2 > 0$, lo cual significa que existen efectos de ineficiencia técnica

b. Los parámetros γ

H₀: $\gamma = 0$, lo cual significa que no hay efectos de ineficiencia técnica en el modelo

H₁: $\gamma > 0$, lo cual significa que existen efectos de ineficiencia técnica

En el análisis estadístico, la interpretación de los parámetros estimados mediante en la función de producción doble logarítmica se realiza en términos porcentuales. No obstante, de los seis insumos utilizados en la producción de caña de azúcar, solo un insumo es estadísticamente significativo al 95% de confianza. Este insumo fue la semilla de la caña de azúcar.

Respecto al índice promedio de eficiencia técnica de los productores de la localidad estudiada fue de 0.95. Esto implica que la eficiencia de la producción de caña de azúcar podría mejorarse en 5%. Además, el nivel mínimo de eficiencia técnica es 0.870 y el más alto es 0.989. El alto índice de eficiencia técnica logrado en esta investigación se debe a que los encuestados forman parte del programa de asociación con Kebon Agung Sugar Factory.

Por otro lado, Johnson *et al* (1995), analizan la eficiencia de la producción de caña de azúcar utilizando el enfoque del análisis estocástico de frontera. En el trabajo se señala que en sus más de 200 años de existencia la agroindustria de la caña de azúcar, en el estado norteamericano de Louisiana, ha contribuido significativamente en términos de empleo e ingreso. Se afirma que durante dicho periodo tal agroindustria sufrió intensos cambios estructurales pero que en las últimas tres décadas precedentes a 1995 el número de ingenios azucareros disminuyó considerable mientras la capacidad de molienda diaria se incrementó. De esta manera, se afirma que a futuro la agroindustria de la caña de azúcar debe enfrentar retos y ser más productivos y eficientes en el uso de los recursos debido principalmente a la incertidumbre de la política pública respecto al sector en aquella época y a la cambiante estructura de costos de la agroindustria. Si

bien los ajustes para cambiar los escenarios económicos y físicos han sido progresivos, poco se conocía acerca de la eficiencia técnica (ET) de las factorías de caña de azúcar sobrevivientes usando modelos económicos de la eficiencia técnica. Se comenta que las factorías azucareras del Loussiana usan el llamado “factor de liquidación” como una medida de eficiencia técnica. Esta medida relaciona la cantidad de azúcar realmente recuperada (en libras por tonelada de caña) como un porcentaje del azúcar teóricamente recuperable (también referida como recuperación prevista de azúcar). No obstante, se señala que este índice es de valor limitado como una medida de desempeño. En primer lugar, porque su interpretación es algo subjetiva debido a que tal índice no está constreñida al intervalo entre cero y la unidad y por lo tanto tiene un límite superior abierto y porque tal índice solo considera solo uno de los insumos usados en la producción de azúcar cruda, ignorando los otros insumos en la función de producción. Por lo tanto el “factor de liquidación” como medida de eficiencia carece de justificación económica formal¹.

Basado en la argumentación anterior los autores argumentan por lo tanto que es necesaria la construcción de un índice de eficiencia técnica consistente con la función de producción de los ingenios cañeros (fábrica) porque el mismo puede proporcionar información útil relacionada con las diferencias en el rendimiento técnico asociado con el tamaño de ingenio, predicciones de eficiencias técnicas de ingenios individuales basadas en el proceso de producción y una indicación de pérdidas en unidades monetarias debido a ineficiencias técnicas además de que las inversiones de capital en la industria de procesamiento de la caña de azúcar, en particular las asociadas con mejoras en las fábricas, tienden a ser considerables, y la tasa de rendimiento del capital está directamente relacionada con la eficiencia técnica de la firma.

¹ En las estadísticas de la agroindustria de la caña de azúcar del CONADESUCA (2017) un índice análogo aparece con el nombre de KARBE por tonelada bruta teórico y el KARBE por tonelada neto teórico donde KARBE se refiere a los kilos de azúcar recuperable base estándar.

De esta manera, el conocimiento de la eficiencia técnica por sí solo puede contribuir significativamente a una mejor comprensión del desempeño de los ingenios azucareros y, quizás, a aumentar las posibilidades de supervivencia de los mismos a largo plazo. En la industria azucarera de Luisiana, el incentivo de beneficio para reducir la ineficiencia técnica en el nivel de procesamiento se extiende tanto a los productores de caña de azúcar como a los propietarios y debido a los acuerdos contractuales tradicionales entre productores y procesadores.

Por lo tanto, el documento proporciona medidas de eficiencia técnica de los procesadores individuales de caña de azúcar de Louisiana utilizando una función de producción de frontera estocástica. El documento se estructura de la siguiente manera: en el primer apartado brevemente se resaltan los cambios estructurales ocurridos en la industria procesadora de caña de azúcar de Louisiana. En el segundo apartado se presenta una revisión de la literatura referente a la medición de la eficiencia. Los procedimientos, incluida la especificación y los datos del modelo, se incluyen en la siguiente tercera, seguidos por los principales resultados del estudio y una cuantificación de la eficiencia técnica. El artículo concluye con un resumen de las principales implicaciones del trabajo y agrega algunas observaciones sobre futuras investigaciones.

Se dice que los análisis de eficiencia de frontera a menudo se utilizan para evaluar cuestiones relacionadas con la estructura de la agricultura, la supervivencia de las familias de los hogares agrícolas, los aspectos estructurales y financieros de las empresas de agronegocios y los aspectos de la política agrícola. El objetivo de los estudios previos ha variado desde la estimación de la eficiencia técnica hasta la estimación de la eficiencia económica (técnica y de asignación), la escala y el alcance. La eficiencia técnica se relaciona con la pregunta del como una empresa utiliza la mejor tecnología disponible en su proceso de producción, mientras que la eficiencia asignativa refleja si una empresa técnicamente eficiente produce al menor costo posible. A menudo es el

caso que los datos no están disponibles para estimar un índice de eficiencia económica y, por lo tanto, el foco de algunos estudios es, necesariamente, en los aspectos técnicos de la producción.

El esfuerzo serio de estimar funciones de producción de frontera comenzó con Farrell (1958). Posteriormente, se han desarrollado varias técnicas de programaciones matemáticas y econométricas que han ampliado las opciones a los investigadores en la formulación de estudios de eficiencia técnica.

El enfoque de la frontera estocástica ha ganado considerable popularidad en la literatura económica. Esto se debe, en parte, en primer lugar, a la capacidad del modelo para separar las desviaciones de la frontera en componentes aleatorios y de ineficiencia, y en segundo lugar a la ventaja de realizar inferencias estadísticas sobre la función de respuesta y los componentes de ineficiencia. Los desarrollos más recientes han expandido la investigación previa mediante la adopción de modelos que capturan las propiedades hipotéticas de la ineficiencia técnica.

De acuerdo con Johnson *et al* (1995) los desarrollos de Battese (1991) se habían aplicado (para la época en que fue publicado su trabajo) al estudio de las unidades productoras de caña de azúcar de Luisiana (Kanjilal). Las ineficiencias técnicas específicas de cada unidad productora fueron estimadas a partir de datos de panel de cuarenta y cinco granjas de caña de azúcar bajo especificaciones alternativas de modelos y suposiciones de distribución. Los resultados indicaron que la eficiencia técnica aumentó con el tiempo y que la ineficiencia asignativa fue mucho más alta que la técnica.

Para medir la eficiencia técnica se dice que la eficiencia técnica se refiere a la capacidad de producir el nivel máximo de producción para una cantidad dada de insumos y tecnología. Si se observa una empresa en un plan de producción

La eficiencia técnica se refiere a la capacidad de producir el nivel máximo de producción para una cantidad dada de insumos y tecnología. Si se observa una empresa con un plan de producción (y^0 , x^0), dicho plan es técnicamente eficiente si $y^0 = F(x^0)$ y técnicamente ineficiente si $y^0 < F(x^0)$, donde $F(x^0)$ es el producto máximo (frontera) asociada con el nivel de insumos, dada por x^0 . Por lo tanto, la eficiencia técnica puede medirse por la relación entre los valores de producción reales y los valores de producción de la frontera de producción.

En el estudio se hacen las siguientes suposiciones respecto a la especificación de la frontera: 1) cada empresa en la agroindustria de la caña de azúcar tiene la misma tecnología; 2) todos los insumos son homogéneos.

La forma funcional utilizada en el estudio fue la siguiente:

$$\ln Y_{it} = \beta_0 + \sum_{j=1}^4 \beta_j \ln X_{ijt} + v_{it} - u_{it}, \quad i = 1, \dots, 19; \quad t = 1, \dots, 7,$$

Donde

Y	=	azúcar cruda producida	en toneladas
X_1	=	caña de azúcar producida	en toneladas
X_2	=	trabajo asociado con operaciones en fábrica	en horas
X_3	=	gas	en M.C.F. -1,000 pies cúbicos
X_3	=	agua de lavado	millones de galones
V_{it}	=	error estadístico	
u_{it}	=	error aleatorio de una cola	

Por construcción, $u_{it} \geq 0$ lo que implica que la ineficiencia existe y $u_{it} = 0$ implica que no existe ineficiencia. Se asume que:

$$u_{it} = u_i e^{-\eta(t-T)}, \text{ y}$$

$$v_{it} \sim N(0, \sigma_v)$$

donde η es un parámetro desconocido y u_i es una truncación de la distribución $v_{it} \sim N(\mu, \sigma^2)$.

Hay tres parámetros en estos modelos que se relacionan con ineficiencias técnicas. El primero es η que mide si la ineficacia en el procesamiento del azúcar ha cambiado con el tiempo; $\eta > 0$, $\eta < 0$ y $\eta = 0$ implican que las ineficiencias están disminuyendo, aumentando o permanecen constantes, respectivamente. Dado que se supone que la ineficiencia es estocástica, su distribución está representada por una variable aleatoria μ . El parámetro $\gamma = \frac{\sigma_u}{\sigma_v}$, está asociado con el grado de ineficiencia; un valor cero para γ implica la ausencia de ineficiencia.

La ecuación anterior se conoce comúnmente como un modelo de frontera estocástica. Una característica atractiva de esta especificación es que el modelo permite varias restricciones en los parámetros η , μ y γ (cuadro 2). Imponer la restricción $\eta = \mu = \gamma$ implica ausencia de ineficiencia. Similarmente, la restricción $\eta = 0$ implica que los efectos de ineficiencia son invariantes en el tiempo. Los coeficientes del modelo y los parámetros que describen los errores aleatorios y de ineficiencia se estiman mediante métodos de máxima verosimilitud y las restricciones se prueban con las pruebas clásicas de la ratio de verosimilitud. Las especificaciones alternativas de los modelos de la frontera estocástica mencionados son los mostrados en el cuadro 2:

Cuadro 2. Especificaciones para el modelo de la frontera estocástica

Modelo	Restricciones	Descripción
MCO	$\mu = 0, \eta = 0, \gamma = 0$	No existe ineficiencia
I	$\mu = 0, \eta = 0$	La ineficiencia es invariante en el tiempo y distribuida con una moda de cero

II	$\eta = 0$	La ineficiencia es invariante en el tiempo y distribuida como una normal truncada
III	$\mu = 0$	La ineficiencia es variante en el tiempo y distribuida con una moda de cero
IV	Ninguna restricción	La ineficiencia es variante en el tiempo y distribuida como una normal truncada

Nota: los modelos I-IV son estimados con el método de máxima verosimilitud; μ parámetro de la distribución, η es el parámetro de la varianza en el tiempo y γ es el parámetro de ineficiencia; MCO = Mínimos cuadrados ordinarios.

Fuente: Obtenido de Johnson et al, (1995)

Los datos del estudio consisten en datos secundarios y primarios de panel que se obtuvieron de diecinueve fábricas independientes de procesamiento de azúcar en Louisiana para las temporadas de molienda de 1986 a 1992. Estos datos incluyen la producción de azúcar en bruto junto con los niveles correspondientes y como insumos se consideran a la caña de azúcar, trabajo, gas y agua de lavado. La producción de azúcar en bruto y los cuatro insumos son medidos en cantidades anuales totales como los reportaron confidencialmente los ingenios. Uno de los ingenios suspendió actividades en fábrica durante uno de los años considerados en el estudio para lo cual se consideró que mantuvo idéntico nivel de eficiencia que el año previo con lo que se tuvo una muestra balanceada de datos de panel.

Los resultados obtenidos en la estimación de los parámetros de las funciones de la frontera de producción estocástica para las factorías de azúcar de Louisiana son los siguientes véase cuadro 3:

Cuadro 3. Resultados obtenidos

Variable	Modelos				
	MCO	I	II	III	IV
Constante	-2.527 (-5.99)	-2.506 (-5.69)	-2.506 (-5.67)	-2.525 (-5.65)	-2.604 (-4.52)
Caña de azúcar	0.947 (22.27)	0.935 (21.05)	0.934 (21.59)	0.941 (22.53)	0.935 (39.29)
Trabajo	0.058 (1.54)	0.061 (1.52)	0.062 (1.56)	0.059 (1.53)	0.062 (2.08)
Gas	-0.002 (-1.13)	-0.002 (-1.03)	-0.002 (-1.07)	-0.002 (-1.12)	-0.002 (-1.11)
Agua de lavado	0.040 (1.11)	0.047 (1.22)	0.048 (1.27)	0.042 (1.09)	0.060 (2.24)
Ln L	154.62	154.85	154.86	155.09	156.62

R^2 ajustada	0.95				
γ		0.098 (0.62)	0.060 (0.38)	0.291 (2.05)	0.203 (0.70)
μ			0.022 (0.28)		0.049 (0.35)
η				-0.273 (-4.40)	-0.245 (-0.74)
σ^2	0.006	0.006	0.006	0.008	0.007

Nota: El ratio de t aparece entre paréntesis; γ es un parámetro de ineficiencia; η es un parámetro de varianza en el tiempo y μ es un parámetro de la distribución.

Fuente: Obtenido de Johnson et al, (1995)

Los resultados de la estimación se presentan en el cuadro 3. La primera columna muestra los resultados de la regresión mínimos cuadrados ordinarios, seguidos de los resultados para los modelos I-IV definidos en cuadro 2 del artículo. La caña de azúcar, el principal insumo en la producción de azúcar en bruto, obtiene la mayor elasticidad de producción de 0.93 o 0.94. La suma de los coeficientes estimados del modelo de frontera es cercana a uno, y no se rechaza una prueba t sobre la hipótesis de rendimientos constantes a escala (el valor t estimado es 1.24 con 128 grados de libertad). El trabajo y el agua de lavado tienen elasticidades muy bajas y son solo variables significativas en el modelo IV. En todos los modelos, la variable del gas exhibe una relación negativa y es insignificante estadísticamente.

Los modelos estocásticos de frontera (I-IV) también reportan estimaciones de parámetros para η , que mide las propiedades variables en el tiempo de los efectos no negativos de la firma u_{it} , μ la cual es la moda de la distribución para los efectos de la firma, y γ que mide la ineficiencia (un valor entre cero y la unidad). La especificación general del modelo de frontera IV es equivalente a la función de respuesta tradicional si los parámetros γ , η y μ son simultáneamente igual a cero; esto es una prueba de la hipótesis nula: $H_0 : \gamma = \eta = \mu = 0$ la cual puede ser probada estimando como el ratio de las funciones de verosimilitud para el modelo IV (el modelo no restringido) y el modelo restringido via mínimos cuadrados ordinarios. Este ratio de verosimilitud se distribuye como una Chi-cuadrada con tres grados de libertad. Para los

datos de panel balanceados usado en el estudio en cuestión, la hipótesis no es rechazada (el ratio de verosimilitud estimado es igual a 4), sugiriendo que la función promedio de respuesta tradicional puede ser apropiada para los datos utilizados en el estudio. Al comparar los resultados de los modelos III y IV, sin embargo, cuando la distribución del parámetro de ineficiencia μ es igualado a cero, el parámetro de ineficiencia γ y el parámetro variante en el tiempo η llegan a ser significativos (modelo III), pero esta significancia desaparece cuando μ es estimado en el modelo IV. En el artículo, para evitar el sesgo por una especificación errónea, se adoptó el modelo IV para predecir la eficiencia técnica. La hipótesis de que ninguna variable explicatoria relevante ha sido omitida de la ecuación de regresión se usó la prueba RESET. En el estudio se implementaron tres versiones de la prueba lo cuales dieron como valores de la Chi-cuadrada de 0.60, 0.63 y 0.81, lo cual implicó que el modelo no tenía el problema de variable relevante omitida, por lo que el modelo estaba apropiadamente especificado.

El factor de liquidación descrito en la introducción es comúnmente utilizado por las fábricas cooperativas (que comprenden aproximadamente la mitad de las fábricas en el estado) para medir el rendimiento. Para el período de 1986 a 1992, los factores de liquidación mínimos y máximos fueron aproximadamente 0.82 y 1.025, respectivamente. Como se dijo, al principio, en este trabajo se ha estimado la medida alternativa de eficiencia técnica (TE) para las fábricas azucareras individuales y para la industria utilizando el procedimiento de Battese y Coelli (1991). Durante 1986, las fábricas de azúcar experimentaron un nivel relativamente alto de eficiencia en comparación con la frontera de eficiencia. El índice TE más bajo para 1986 fue de 0.981, mientras que el más alto fue de 0.993. El índice TE para la peor fábrica en 1992 fue de 0.918, mientras que el de las fábricas más eficientes fue de 0.97.

Como conclusiones en el estudio se enuncia que el estudio cuantifica la eficiencia técnica de las fábricas individuales de azúcar de Louisiana y mide las pérdidas económicas por ineficiencia técnica y que los modelos econométricos alternativos

probados conducen a la misma conclusión básica, apoyando la existencia de una alta eficiencia técnica dentro de la industria de procesamiento de azúcar sin procesar de Louisiana en relación con la frontera estocástica.

Gran parte del interés en este estudio está relacionado con las implicaciones de la ineficiencia no solo para las fábricas, sino también para los productores y los propietarios. Una gran repercusión del acuerdo de acciones es que solo el 40% de todas las pérdidas debidas a la ineficiencia técnica en el procesamiento se acumulan en las fábricas de crudo bruto. El restante 60% de las pérdidas son absorbidas por productores y propietarios sobre una base acorde con el acuerdo de tenencia de la tierra.

Los altos niveles estimados de eficiencia técnica durante el período de 1986 a 1992 sugieren que la industria ha alcanzado una etapa de equilibrio al ajustarse a fábricas más pequeñas y más grandes. El hallazgo de rendimientos constantes a escala implica que cero economías de escala caracterizan a la industria de procesamiento durante el período de estudio. Este resultado parece consistente con el reciente cese en la disminución del número de fábricas que había causado considerable preocupación durante el período de 1967 a 1985, cuando los fabricantes disminuyeron en más del 50%. El aumento de la productividad por lo tanto requeriría la introducción de nuevas innovaciones o un mayor nivel de tecnología.

V. Metodología

5.1 Fuentes de información

La principal fuente de información para poder realizar las corridas del modelo de programación lo constituyó el “Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México Zafra 2006-2007/2015-2016” que publicó el CONADESUCA en línea en 2017. De acuerdo con dicha institución, en tal documento se encuentran tabulados históricos de 10 años los siguientes conceptos véase cuadro 4:

Cuadro 4. Información obtenida por el CONADESUCA

Concepto	Variables
Molienda y producción	27
Campo	12
Parámetros de eficiencia	16
Perdidas de sacarosa	5
Generación y consumo de energía	5
Consumo de petróleo	7
Resumen de tiempos perdidos	6
Total	78

Fuente: CONADESUCA (2017).

Las variables utilizadas para correr el modelo de programación lineal del estudio se muestran en el Cuadro 5. En la quinta columna define si dicha variable es un insumo (input) o un producto (output).

Cuadro 5. Definición de las variables

Variable	Descripción	Escala	Unidades	Tipo
CANMOLBR	Caña molida bruta	Continua	Tonelada	Producto
HORZAF	Horas de zafra	Continua	Horas	Insumo
SUPCACOS	Superficie cosechada de caña	Continua	Hectáreas	Insumo
FRENCOR	Frentes de corte	Continua	Unidades	Insumo
CANQUEMA	Caña quemada	Continua	Toneladas	Insumo
VEHACAR	Vehículos de carga	Continua	Unidades	Insumo
CACOSMEC	Caña cosechada mecánicamente	Continua	Toneladas	Insumo
CAALZMEC	Caña levantada con alzadoras mecánicas	Continua	Toneladas	Insumo

Fuente: adaptado de CONADESUCA (2017).

Las estadísticas descriptivas de las variables utilizadas se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Estadísticas descriptivas de las variables utilizadas

Variable	Promedio	Valor máximo	Valor mínimo	Desviación estándar
CANMOLBR	1,083,772	131,269	2,646,308	549,713
HORZAF	4,178	1,577	5,783	741
SUPCACOS	15,579	2,984	53,825	9,420
FRENCOR	34	2	310	48
CANQUEMA	1,011,608	131,269	2,391,442	503,838
VEHACAR	317	13	1,435	250
CACOSMEC	187,178	0	680,433	191,763
CAALZMEC	883,392	0	2,393,427	602,000

Fuente: adaptado de CONADESUCA (2017).

Nota: la descripción de las variables es la dada en el Cuadro 5.

La metodología empleada se realizó mediante 2 escenarios. El primer escenario se corrió para obtener la eficiencia técnica sin considerar la cosecha de caña mecanizada y el alza mecanizada. En el segundo escenario si se tomaron en cuenta, esto con el fin de observar cómo cambia la eficiencia técnica bajo condiciones de producción mecanizada y sin mecanizar y ver si es posible un aumento en la eficiencia al tecnificar la producción. A continuación, se presentaran los dos escenarios a estudiar.

5.2 Resolución del modelo CCR mediante programación lineal

El modelo DEA-CCR con orientación al insumo u orientación al producto se resuelve mediante el software Nlogit. Este software en su versión 5, no incluye los pesos, también llamados multiplicadores, asignados a cada insumo o producto por el modelo de programación lineal. La versión 6 del Nlogit proporciona dichos multiplicadores.

Nlogit tiene la ventaja de ser el único, hasta el momento, de ofrecer en el mismo conjunto de opciones del menú, y en las instrucciones que el usuario puede escribir directamente, y bajo la opción **Frontier** la posibilidad de obtener los índices de eficiencia de las DMU analizadas utilizando la metodología del análisis envolvente de datos y la metodología del análisis estocástico de frontera véase figura 6.

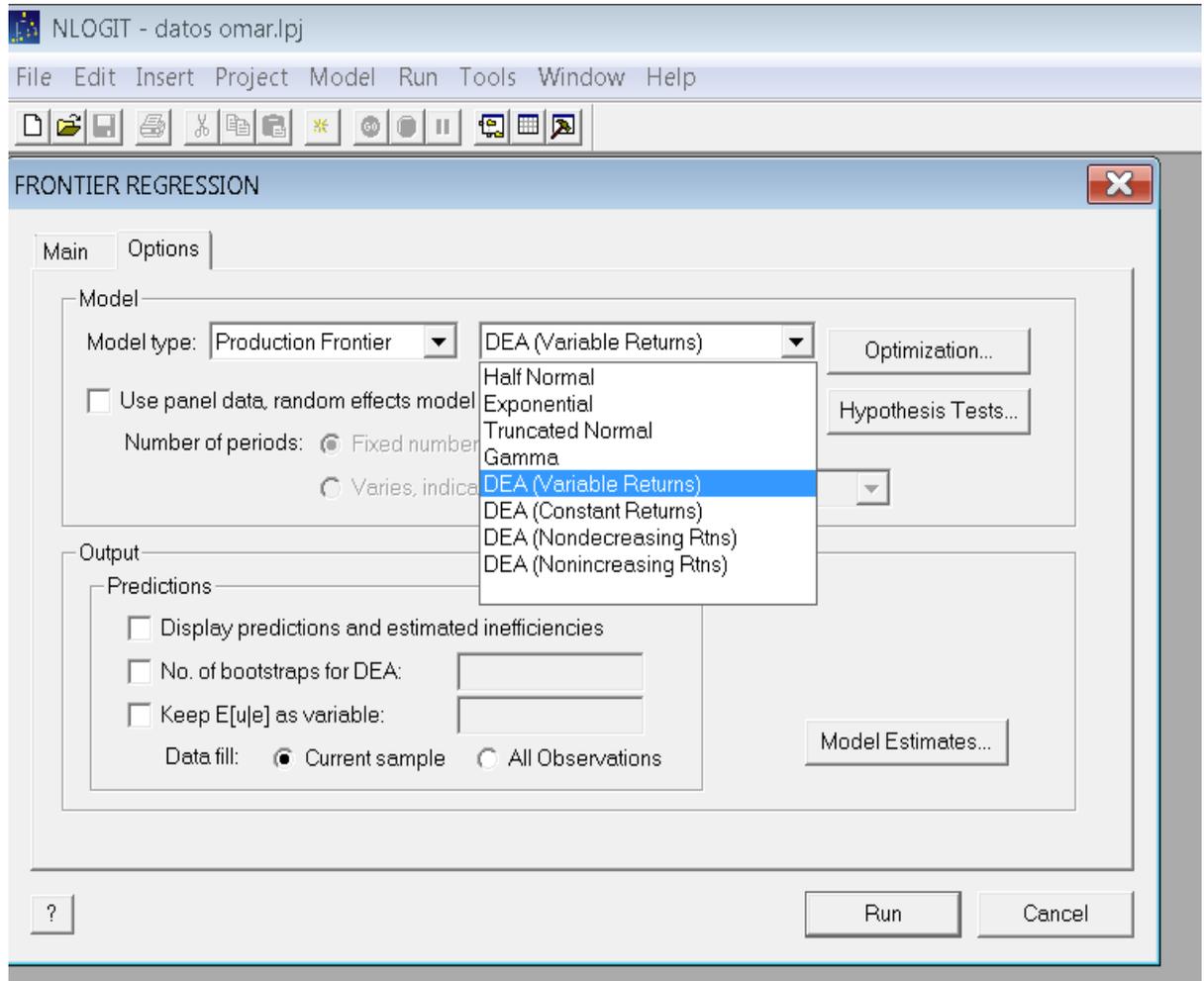


Figura 2. Estimación de los modelos de frontera Nlogit 5

La teoría estadística, econométrica y de programación lineal que fundamentan los resultados obtenidos al correr el modelo DEA o el modelo SFA ésta documentado en los respectivos manual y guía del usuario del Limdep/nlogit.

5.3 Eficiencia técnica sin considerar la tecnificación de la cosecha (Escenario 1)

En este escenario se asume que la cosecha de la caña se realiza sin considerar las variables (insumos) de una cosecha mecanizada en la caña de azúcar. Es decir, se excluyen del cálculo del índice de eficiencia técnica a las variables de cosecha mecanizada de caña de azúcar (CACOSMEC) y a la caña alzada mecánicamente (AZALZMEC). De acuerdo con los datos del Cuadro 6, la caña cosechada mecánicamente represento el 17.3% y la caña alzada mecánicamente el 81.5%, respectivamente, en la zafra 2015/2016.

Se introducen los datos en el software Nested Logit 5 para estimar la eficiencia de las unidades básicas de decisión utilizando la metodología del análisis envolvente de datos mediante el modelo de Charmes, Cooper and Rhodes orientado al insumo y con rendimientos constantes a escala, como variable de salida (output) se introdujo la caña molida bruta y como insumos o variables de entrada (inputs), las horas zafra, superficie cosechada de cana, frentes de corte, cana quemada y vehículos de carga.

5.4 Eficiencia técnica considerando la tecnificación de la cosecha (Escenario 2)

En este escenario las variables de cosecha mecanizada y alza mecanizada de azúcar son agregadas a la corrida para estimar la eficiencia de los ingenios que operan en la agroindustria de la caña de azúcar. Y bajo el mismo procedimiento del escenario 1 se corrieron los datos en el programa Nested logit 5.

Para comparar los datos de eficiencia con la metodología aplicada anteriormente y con la forma en que el ingenio obtiene su eficiencia, calculamos el KARBE por cada ingenio mediante la fórmula dada por el CONADESUCA. La fórmula y los cálculos se encuentran en la parte de anexos.

VI. Resultados y discusión

6.1 Eficiencia técnica sin considerar la tecnificación de la cosecha (escenario 1)

Los resultados obtenidos al estimar la eficiencia técnica en campo por cada unidad de decisión (ingenio cañero) sin mecanización se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Índices de eficiencia técnica por ingenio cañero escenario 1

	Ingenio	IET		Ingenio	IET
1	El Carmen	0.6920	26	La Gloria	0.8878
2	San José de Abajo	0.6982	27	Plan de San Luis	0.9065
3	El Refugio	0.7405	28	Central Motzorongo	0.9067
4	El Mante	0.7643	29	Plan de Ayala	0.9083
5	Central La Providencia	0.7764	30	San Pedro	0.9096
6	Central Progreso	0.7837	31	El Molino	0.9209
7	Constancia	0.7942	32	Quesería	0.9220
8	José María Morelos	0.7967	33	Pujiltic (Cia. La Fe)	0.9413
9	Lázaro Cárdenas	0.8058	34	Huixtla	0.9462
10	Cuatotolapam (CIASA)	0.8131	35	Emiliano Zapata	0.9469
11	San Nicolás	0.8187	36	San Miguel del Naranjo	0.9511
12	Pablo Machado (La Margarita)	0.8190	37	Mahuixtlán	0.9518
13	La Joya	0.8369	38	Pánuco	0.9538
14	Presidente Benito Juárez	0.8385	39	Atencingo	1.0000
15	El Dorado	0.8402	40	Azsuremex	1.0000
16	Adolfo López Mateos	0.8457	41	Central Casasano	1.0000
17	San Miguelito	0.8471	42	El Higo	1.0000
18	Aarón Sáenz Garza	0.8483	43	Melchor Ocampo	1.0000
19	Pedernales	0.8508	44	Puga	1.0000
20	Alianza Popular	0.8511	45	San Cristóbal	1.0000
21	Bellavista	0.8621	46	San Francisco Ameca	1.0000
22	Santa Rosalía	0.8690	47	Santa Clara	1.0000
23	El Modelo	0.8722	48	Tala (José Ma. Martínez)	1.0000
24	San Rafael de Pucté	0.8730	49	Tamazula	1.0000
25	El Potrero	0.8829	50	Tres Valles	1.0000

Fuente: elaborado a partir de la salida del modelo DEA.

Debe remarcarse que los puntajes (score) de la eficiencia técnica son válidos bajo el supuesto de retornos constantes a escala y el modelo tipo Charnes-Cooper-Rhodes (CCR) orientado al insumo.

En el cuadro los ingenios cañeros se ordenan de los que tiene cierto grado de ineficiencia a los que tienen las mejores prácticas en la utilización de los insumos en su proceso productivo y que sirven como referencia (benchmarking) para aquellos cuya ineficiencia permite mejorar sus prácticas y procesos productivos, tomando como ejemplo aquellos ingenios azucareros cuyo puntaje para la eficiencia técnica es iguala a la unidad.

En el caso de la agroindustria de la caña de azúcar los resultados obtenidos en la corrida indican que el índice de eficiencia técnica promedio en el escenario sin mecanización de la cosecha es de 0.8895 que redondeado puede expresarse afirmando que la eficiencia técnica de la agroindustria de la caña de azúcar, en el eslabón de campo, es del 89%; por lo que existe margen para que utilizando las mejores prácticas en el proceso productivo y en el manejo y administrativo en la fase de campo se incremente la eficiencia técnica.

De los resultados del escenario sin la mecanización de la cosecha de la caña de azúcar, se encuentra que son 12 ingenios los que realizaron las mejores prácticas productivas utilizando los insumos involucrados en la producción de caña de azúcar bruta molida, por lo que su eficiencia técnica es del 100%. Algunos de estos ingenios son Atencingo, Azsuremex, Central Casasano, El Higo, Melchor Ocampo, Puga, San Cristóbal, San Francisco Ameca, Santa Clara, Tala, Tamazula y Tres Valles. De esta manera, estos son los ingenios que se encuentran sobre la frontera eficiente de producción.

En contraste con el buen desempeño de los 12 ingenios enumerados en el párrafo anterior se encuentran 38 ingenios cañeros que en la zafra 2015/2006 tuvieron un desempeño ineficiente en la combinación, gerencia y utilización de los insumos en el proceso productivo para la obtención de la caña de azúcar bruta para la molienda. Los dos ingenios más ineficientes en la referida zafra fueron El

Carmen y San de Abajo con una eficiencia técnica de 69.2% y 69.8%, respectivamente.

Ahora bien, en el cálculo de los índices de eficiencia técnica, la metodología del análisis envolvente compara los ingenios que resultaron ineficiente con aquellos que resultaron tener las mejores prácticas de productivas y de administración; es decir aquellos que resultaron ser eficientes por lo que tienen un IET del 100%; es decir un puntaje o score de la unidad.

6.2 Eficiencia técnica considerando la tecnificación de la cosecha (Escenario 2)

Los resultados de este escenario se presentan en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Índices de eficiencia técnica por ingenio cañero escenario 2

	Ingenio	IET		Ingenio	IET
1	Constancia	0.8502	26	Adolfo López Mateos	1.000
2	La Joya	0.8681	27	Atencingo	1.0000
3	San Nicolás	0.8728	28	Azuremex	1.0000
4	José María Morelos	0.8793	29	Central Casasano	1.0000
5	Bellavista	0.8927	30	Central Motzorongo	1.0000
6	El Carmen	0.8991	31	Central Progreso	1.0000
7	Cuatotolapam	0.9039	32	El Higo	1.0000
8	El Refugio	0.9040	33	El Molino	1.0000
9	San Rafael de Pucté	0.9186	34	El Potrero	1.0000
10	Quesería	0.9220	35	Eldorado	1.0000
11	Alianza Popular	0.9224	36	Emiliano Zapata	1.0000
12	Plan de San Luis	0.9311	37	Huixtla	1.0000
13	San Pedro	0.9399	38	Mahuixtlán	1.0000
14	Plan de Ayala	0.9406	39	Melchor Ocampo	1.0000
15	La Gloria	0.9413	40	Presidente Benito Juárez	1.0000
16	El Modelo	0.9435	41	Puga	1.0000
17	Central La Providencia	0.9478	42	Pujiltic (Cia. La Fe)	1.0000
18	San Miguel del Naranjo	0.9511	43	San Cristóbal	1.0000
19	Santa Rosalía	0.9535	44	San Francisco Ameca	1.0000
20	El Mante	0.9635	45	San José de Abajo	1.0000
21	La Margarita	0.9675	46	San Miguelito	1.0000
22	Aarón Sáenz Garza	0.9828	47	Santa Clara	1.0000

23	Pedernales	0.9891	48	Tala	1.0000
24	Pánuco	0.9895	49	Tamazula	1.0000
25	Lázaro Cárdenas	0.9904	50	Tres Valles	1.0000

Fuente: elaborado a partir de la salida del modelo DEA.

En el segundo escenario donde se consideran las variables de cosecha y alza mecanizada de caña, el número de ingenios que realizan las mejores prácticas productivas y de dirección gerencial pasa de 12 en el primer escenario a 25 en el segundo escenario. Cuando se incorpora la mecanización al proceso productivo en campo de la caña la eficiencia promedio de la agroindustria de la caña de azúcar se eleva a 96.5% con el valor mínimo de eficiencia 85.0%.

En este escenario los ingenios más ineficientes resultaron ser Constanica con una eficiencia del 85.0%, La Joya con 86.8% y San Nicolás con 87.2%.

VII. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

- La aplicación del modelo CCR, con rendimientos constantes a escala, al análisis de la eficiencia de la agroindustria de la caña de azúcar muestra que, en un escenario en el que no se considera la mecanización de la cosecha de la caña de azúcar (corte y alza), la eficiencia relativa de la agroindustria de la caña de azúcar es, en promedio, del 89%.
- En el escenario en el que se considera la mecanización del corte y alza de la caña de azúcar la eficiencia relativa de la agroindustria de la caña de azúcar se incrementa al 96.5%; es decir con la utilización de maquinaria en la cosecha del insumo incrementa la eficiencia relativa en un 7.5%.
- En el escenario que no considera la mecanización de la cosecha de la caña de azúcar 12 de los ingenios azucareros (24%) muestran una eficiencia relativa del 100% por lo cual son los tomados como referencia para que los ingenios que muestren la menor eficiencia técnica adopten las mejores prácticas productivas de los ingenios de referencia.
- Entre los cinco ingenios que tienen la menor eficiencia técnica en el escenario sin mecanización son El Carmen (69.2%), San José de Abajo (69.8%), El Refugio (74.0%), el Mante (76.4%) y Central Providencia (77.6%). De esta manera, estas unidades productivas pueden considerar incorporar las prácticas productivas realizadas por los ingenios azucareros tomados como referencia para el cálculo de su eficiencia técnica. Por ejemplo, El Carmen puede tomar como referencia las prácticas productivas realizadas por el Ingenio Santa Clara; el ingenio San José de Abajo las practicas realizadas por los ingenios de Santa Clara y el Higo.

- En el segundo escenario en el que se introduce la mecanización de la cosecha (el corte y alza mecánica de la caña de azúcar) 25 de los 50 ingenios considerados en el estudio; es decir el 50% de los que operaron en la zafra 2015/2016, tuvieron una eficiencia técnica del 100%. Esta mejora en la productividad relativa de los ingenios muestra la importancia de la mecanización de la cosecha de la caña de azúcar (corte y alza).
- En este escenario de mecanización de la cosecha el ingenio Constanica, que resultó ser el que tiene el menor índice de eficiencia técnica (85%) y los ingenios de referencia fueron Presidente Benito Juárez, Mahuixtlán, Tala y Santa Clara. De esta manera, los ingenios Constanica, La Joya y San Nicolás, por ejemplo, pueden seguir las mejores prácticas productivas de los ingenios de referencia.

7.2 Recomendaciones

Como se ha constatado en la presente investigación, la metodología del análisis envolvente de datos permite identificar cuáles son los ingenios que tienen los índices de eficiencia técnica relativa más baja en términos relativos respecto a todos los demás ingenios de la agroindustria de caña; así como determinar cuáles son los ingenios de comparación que realizan las mejores prácticas productivas. No obstante, para futuros estudios es recomendable analizar lo siguiente:

- Comparar cómo se comportan los índices de eficiencia técnica al considerar rendimientos variables a escala en el modelo CCR-DEA.
- Determinar las eficiencias de escala para cada ingenio y para la agroindustria de la caña de azúcar en general que es obtenido como el ratio de la eficiencia técnica bajo rendimientos constantes a escala y la eficiencia técnica bajo rendimientos variables a escala.

- Determinar la eficiencia precio de la agroindustria de la caña de azúcar, que si bien implica conocer los precios de los insumos y productos que intervienen en el proceso productivo del eslabón de campo, permitirá realizar un análisis de mayor profundidad en la agroindustria cañera.
- Comparar, en la medida de lo posible, los índices de eficiencia técnica calculada mediante la DEA con aquella estimada mediante la metodología del análisis estocástico de frontera, permitiendo de esta manera realizar un análisis causal y estadístico-econométrico de esta temática.
- Finalmente se recomienda analizar la eficiencia técnica mediante la utilización de datos de panel para determinar la evolución de la productividad de la agroindustria cañera a través del tiempo.

Bibliografía

- 1.- Barrios Castillo, G. Y. (2007). La medición de la eficiencia técnica en la producción de caña de azúcar mediante el Análisis Envolvente de Datos. Disponible en <http://centrozucar.uclv.edu.cu/media/articulos/PDF/2007/4/1.pdf>.
2. - Banker, R. D., Charnes, A. & Cooper, W. W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 30(9), 1078-1092.
- 3.- Battese, G. E. and Coelli, T.J. (1991). Frontier production function, technical efficiency and panel data: with application to paddy farmers in India. Dep. Econ. Working Paper in Econometrics and Applied Statistics 56, University of New England, Armidale, Australia.
- 4.- Bogetoft, P. and Otto, L. (2011). Benchmarking with DEA, SFA, and R. International Series in Operations Research & Management Science Volume 157. New York: Springer
- 5.-CENGICAÑA (2014). El cultivo de la caña de azúcar.GUATEMALA.
- 6.- Chaitip, Prasert, Chukiat, Chaiboonsri and Inluang, Fawikorn (2014). The Production of Thailand's Sugarcane. Using Panel Data Envelopment Analysis (Panel DEA) Based Decision on Bootstrapping Method. *Procedia Economics and Finance* 14: 120 – 127.
- 7.- Charnes, A., Cooper W.W, Lewin, A.Y. and Seiford, L.M. (eds) (1994). Data envelopment analysis. Theory, methodology, and application. Springer Science+Business Media, LLC.
- 8.- Charnes, A., Cooper, W. W., Rhodes, E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units. *European Journal of Operational Research* (1978), 2(6): 429-444.
- 9.- Charnes, A, Cooper, W. W. & Rhodes E. L. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429-444.
- 10.- Coelli, T.J., Prasada Rao, D.S., and Battese, G.E. (1998). An Introduction to efficiency and productivity analysis. Boston, Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publisher.

- 11.- CONADESUCA (2016). Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México Zafras 2008-2009/2014-2015. Ciudad de México, México.
- 12.- CONADESUCA (2017). Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México Zafras 2006-2007/2015-2016. Ciudad de México, México. Disponible en <https://www.gob.mx/conadesuca/articulos/informe-estadistico-del-sector-agroindustrial-de-la-cana-de-azucar-en-mexico-zafras-2006-2007-2015-2016?idiom=es>. Consultado 29 de abril de 2018.
- 13.- Farrell, M. (1957) The Measurement of Productive Efficiency. Journal of the Royal Statistical Society A, General, 120, pp. 253-281.
- 14.- Farrell, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. Journal of the Royal Statistical Society, Series A 120, pp. 253-281.
- 15.- Huguenin, J. M. (2012). Data Envelopment Analysis (DEA). A pedagogical guide for decision makers in the public sector. Institut de Hautes Études en Administration Publique (IHEAP). Laussane, Suwis.
- 16.- INIFAP (2017). Tecnología de producción de caña de azúcar para el estado de Colima. Tecomán Colima. México.
- 17.- Johnson, J. L., Zapata, H. O. and Heagler A. M. (1995). Technical efficiency in Louisiana sugar cane processing. Journal of Agribusiness 13(2): 84-98.
18. Koopmans, T.C., Beckman, M. (1957). Assignment problems and the location of economic activities. Econometrica Journal of the econometric society vol 25: 53-76
- 18.- Kumar, Sunil and Arora, Nitin (2012). Evaluation of technical efficiency in Indian sugar industry: An application of full cumulative data envelopment analysis. Eurasian Journal of Business and Economics 5 (9): 57-78.
- 19.- Nanda Anggiadita, Nanda and Sujarwo (2016). "Technical efficiency analysis of sugar cane production in Sutojayan Village, Pakisaji Sub-District, Malang, East-Java, Indonesia". Agricultural Socio-Economics Journal, Vol. XVI, No. 02: 45-51.
- 20.- SAGARPA (2005). Ley de desarrollo sustentable de la caña de azúcar. Diario Oficial de la Federación (DOF) del 22 de agosto de 2005. México, D.F.
- 21.- SAGARPA-CONADESUCA (2014). Programa nacional de la agroindustria de la caña de azúcar. Diario Oficial de la Federación (DOF) del 2 de mayo de 2014. México, D.F.

22.- Unión de Nacional de Cañeros (UPC-CNPR) (2017). Estadísticas de la agroindustria de la caña de azúcar 2007-2017. Decima Quinta Edición, México, D.F.

23.- Zhu, J. (2013). Quantitative models for performance evaluation and benchmarking. Data envelopment analysis with spreadsheets. New York: Springer.

Anexo 1. Salida del software nlogit para el análisis DEA

Las siguientes capturas de pantalla muestran las instrucciones del software nested logit (nlogit 5) para estimar la eficiencia de las unidades básicas de decisión (DMU) utilizando la metodología del análisis envolvente de datos utilizando el modelo de Charnes, Cooper and Rhodes (CCR) orientado al insumo y con rendimientos constantes a escala (CRS).

Cuadro 9. Corrida del escenario de cosecha sin mecanizar

```
| -> FRONTIER;Lhs=CANMOLBR;Rhs=HORZAF,SUPCACOS,FRENCOR,CANQUEMA,VEHACAR;ALG=DEA;CRS>List$
```

```
-----
```

Data Envelopment Analysis
Output Variables: CANMOLBR
Input Variables: HORZAF SUPCACOS FRENCOR CANQUEMA VEHACAR
Underlying Technology assumes CONSTANT Returns to Scale.
Convergence value for linear program = .10000D-03; Maximum iterations = 100

```
-----
```

Estimated Efficiencies:	Mean	Std.Deviation	Minimum	Maximum
Technical Efficiency				
Input Oriented	.8895	.0865	.6920	1.0000
Output Oriented	.8895	.0865	.6920	1.0000

Sample Size: 50 Observations. 50 Complete observations
Efficiencies saved as variables DEAEFF_0, DEAEFF_I and DEAEFF_E
Efficiencies saved as matrices DEA_EFF0, DEA_EFFI and DEA_EFFE

```
-----
```

Estimated Efficiency Values for Individual Decision Making Units
(Results are listed only for complete observations)

Observation Sample	Data	Input Oriented		Output Oriented		Economic		Allocative	
		Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value
I= 1	R= 1	33	.84830	33	.84830	0	.00000	0	.00000
I= 2	R= 2	35	.84571	35	.84571	0	.00000	0	.00000
I= 3	R= 3	31	.85109	31	.85109	0	.00000	0	.00000
I= 4	R= 4	1	1.00000	1	1.00000	0	.00000	0	.00000
I= 5	R= 5	1	1.00000	1	1.00000	0	.00000	0	.00000
I= 6	R= 6	30	.86212	30	.86212	0	.00000	0	.00000
I= 7	R= 7	1	1.00000	1	1.00000	0	.00000	0	.00000
I= 8	R= 8	46	.77644	46	.77644	0	.00000	0	.00000
I= 9	R= 9	23	.90666	23	.90666	0	.00000	0	.00000
I= 10	R= 10	45	.78370	45	.78370	0	.00000	0	.00000
I= 11	R= 11	44	.79417	44	.79417	0	.00000	0	.00000
I= 12	R= 12	41	.81305	41	.81305	0	.00000	0	.00000
I= 13	R= 13	50	.69197	50	.69197	0	.00000	0	.00000
I= 14	R= 14	1	1.00000	1	1.00000	0	.00000	0	.00000

```
-----
```

I=	15	R=	15		47	.76428		47	.76428		0	.00000		0	.00000
I=	16	R=	16		28	.87223		28	.87223		0	.00000		0	.00000
I=	17	R=	17		20	.92093		20	.92093		0	.00000		0	.00000
I=	18	R=	18		26	.88287		26	.88287		0	.00000		0	.00000
I=	19	R=	19		48	.74048		48	.74048		0	.00000		0	.00000
I=	20	R=	20		36	.84016		36	.84016		0	.00000		0	.00000
I=	21	R=	21		16	.94685		16	.94685		0	.00000		0	.00000
I=	22	R=	22		17	.94622		17	.94622		0	.00000		0	.00000
I=	23	R=	23		43	.79674		43	.79674		0	.00000		0	.00000
I=	24	R=	24		25	.88779		25	.88779		0	.00000		0	.00000
I=	25	R=	25		38	.83688		38	.83688		0	.00000		0	.00000
I=	26	R=	26		42	.80582		42	.80582		0	.00000		0	.00000
I=	27	R=	27		14	.95183		14	.95183		0	.00000		0	.00000
I=	28	R=	28		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	29	R=	29		39	.81895		39	.81895		0	.00000		0	.00000
I=	30	R=	30		13	.95380		13	.95380		0	.00000		0	.00000
I=	31	R=	31		32	.85075		32	.85075		0	.00000		0	.00000
I=	32	R=	32		22	.90833		22	.90833		0	.00000		0	.00000
I=	33	R=	33		24	.90652		24	.90652		0	.00000		0	.00000
I=	34	R=	34		37	.83849		37	.83849		0	.00000		0	.00000
I=	35	R=	35		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	36	R=	36		18	.94129		18	.94129		0	.00000		0	.00000
I=	37	R=	37		19	.92195		19	.92195		0	.00000		0	.00000
I=	38	R=	38		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	39	R=	39		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	40	R=	40		49	.69823		49	.69823		0	.00000		0	.00000
I=	41	R=	41		15	.95106		15	.95106		0	.00000		0	.00000
I=	42	R=	42		34	.84707		34	.84707		0	.00000		0	.00000
I=	43	R=	43		40	.81870		40	.81870		0	.00000		0	.00000
I=	44	R=	44		21	.90956		21	.90956		0	.00000		0	.00000
I=	45	R=	45		27	.87296		27	.87296		0	.00000		0	.00000
I=	46	R=	46		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	47	R=	47		29	.86900		29	.86900		0	.00000		0	.00000
I=	48	R=	48		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	49	R=	49		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	50	R=	50		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000

Corrida del escenario de cosecha mecanizada de caña

En este escenario se incluyen las variables de cosecha mecanizada de caña de azúcar (cacosme) y el alza mecanizada de caña (caalzmeac).

Cuadro 10. Corrida del escenario de cosecha mecanizada

| -> FRONTIER;Lhs=CANMOLBR;Rhs=HORZAF,SUPCACOS,FRENCOR,CANQUEMA,VEHACAR,CACOSMEC,CAALZMEC;ALG=DEA;CRS;List\$

```

-----+-----
Data Envelopment Analysis
Output Variables:  CANMOLBR
Input Variables:  HORZAF  SUPCACOS  FRENCOR  CANQUEMA  VEHACAR  CACOSMEC
                  CAALZMEC
Underlying Technology assumes CONSTANT Returns to Scale.
Convergence value for linear program = .10000D-03; Maximum iterations = 100
-----+-----
Estimated Efficiencies:      Mean      Std.Deviation      Minimum      Maximum
Technical Efficiency
  Input Oriented              .9653              .0447              .8502         1.0000
  Output Oriented            .9653              .0447              .8502         1.0000
Sample Size:                  50 Observations.      50 Complete observations
Efficiencies saved as variables DEAEFF_O, DEAEFF_I and DEAEFF_E
Efficiencies saved as matrices  DEA_EFFO, DEA_EFFI and DEA_EFFE
-----+-----
Estimated Efficiency Values for Individual Decision Making Units
(Results are listed only for complete observations)
-----+-----+-----+-----+-----+
Observation | Input Oriented | Output Oriented | Economic | Allocative
Sample Data | Rank   Value | Rank   Value | Rank   Value | Rank   Value
-----+-----+-----+-----+-----+
I=  1 R=  1 |  29  .98276 |  29  .98276 |  0  .00000 |  0  .00000
I=  2 R=  2 |   1 1.00000 |   1 1.00000 |  0  .00000 |  0  .00000
I=  3 R=  3 |  40 .92236 |  40 .92236 |  0  .00000 |  0  .00000
I=  4 R=  4 |   1 1.00000 |   1 1.00000 |  0  .00000 |  0  .00000
I=  5 R=  5 |   1 1.00000 |   1 1.00000 |  0  .00000 |  0  .00000
I=  6 R=  6 |  46 .89267 |  46 .89267 |  0  .00000 |  0  .00000
I=  7 R=  7 |   1 1.00000 |   1 1.00000 |  0  .00000 |  0  .00000
I=  8 R=  8 |  34 .94779 |  34 .94779 |  0  .00000 |  0  .00000
I=  9 R=  9 |   1 1.00000 |   1 1.00000 |  0  .00000 |  0  .00000
I= 10 R= 10 |   1 1.00000 |   1 1.00000 |  0  .00000 |  0  .00000
I= 11 R= 11 |  50 .85019 |  50 .85019 |  0  .00000 |  0  .00000
I= 12 R= 12 |  44 .90390 |  44 .90390 |  0  .00000 |  0  .00000
I= 13 R= 13 |  45 .89911 |  45 .89911 |  0  .00000 |  0  .00000
I= 14 R= 14 |   1 1.00000 |   1 1.00000 |  0  .00000 |  0  .00000
I= 15 R= 15 |  31 .96347 |  31 .96347 |  0  .00000 |  0  .00000

```

I=	16	R=	16		35	.94351		35	.94351		0	.00000		0	.00000
I=	17	R=	17		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	18	R=	18		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	19	R=	19		43	.90396		43	.90396		0	.00000		0	.00000
I=	20	R=	20		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	21	R=	21		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	22	R=	22		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	23	R=	23		47	.87930		47	.87930		0	.00000		0	.00000
I=	24	R=	24		36	.94132		36	.94132		0	.00000		0	.00000
I=	25	R=	25		49	.86808		49	.86808		0	.00000		0	.00000
I=	26	R=	26		26	.99039		26	.99039		0	.00000		0	.00000
I=	27	R=	27		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	28	R=	28		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	29	R=	29		30	.96753		30	.96753		0	.00000		0	.00000
I=	30	R=	30		27	.98946		27	.98946		0	.00000		0	.00000
I=	31	R=	31		28	.98907		28	.98907		0	.00000		0	.00000
I=	32	R=	32		37	.94060		37	.94060		0	.00000		0	.00000
I=	33	R=	33		39	.93114		39	.93114		0	.00000		0	.00000
I=	34	R=	34		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	35	R=	35		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	36	R=	36		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	37	R=	37		41	.92195		41	.92195		0	.00000		0	.00000
I=	38	R=	38		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	39	R=	39		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	40	R=	40		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	41	R=	41		33	.95106		33	.95106		0	.00000		0	.00000
I=	42	R=	42		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	43	R=	43		48	.87280		48	.87280		0	.00000		0	.00000
I=	44	R=	44		38	.93993		38	.93993		0	.00000		0	.00000
I=	45	R=	45		42	.91859		42	.91859		0	.00000		0	.00000
I=	46	R=	46		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	47	R=	47		32	.95348		32	.95348		0	.00000		0	.00000
I=	48	R=	48		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	49	R=	49		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000
I=	50	R=	50		1	1.00000		1	1.00000		0	.00000		0	.00000

Anexo 2. Definición del KARBE

El CONADESUCA (2016, pp. 521, 526-527) define el KARBE bruto teórico por ingenio como el resultado de multiplicar la Pol por ciento caña por la eficiencia base de fábrica por el factor fibra, por el factor pureza, por el factor de polarización del azúcar estándar. El Karbe Bruto teórico considerará hasta seis decimales para el cálculo de KARBE neto teórico.

El KARBE neto teórico por ingenio es el resultado de multiplicar el KARBE bruto teórico por la caña molida bruta, todo dividido entre la caña molida neta. El KARBE neto teórico considerara sólo tres decimales para el cálculo del azúcar KARBE.

La fórmula para el cálculo del KARBE bruto teórico por ingenio es:

$$Pol\%caña * Eficiencia base de fábrica * Factor fibra * Factor pureza * Redondear\left(\frac{10}{99.4}, 6\right)$$

Donde:

- a) $Factor\ fibra = Redondear\left(1.085966 - \frac{0.519 * Fibra\%Caña}{100 - Fibra\%Caña}, 6\right)$
- b) $Factor\ pureza = Redondear\left(1.085966 - \left(1.4 - \frac{40}{Pureza\ aparente\ jugomezclado}\right), 6\right)$
- c) Eficiencia base de fábrica = 82.370

El KARBE bruto teórico considera hasta seis decimales para el cálculo de KARBE neto teórico.

Ahora bien, la fórmula para el cálculo del KARBE neto teórico por ingenio es:

$$\frac{KARBE\ bruto\ teórico * Caña\ molida\ bruta}{Caña\ molida\ neta}$$

Como se hizo referencia anteriormente, Johnson *et al.* (1995) mencionó que el llamado “factor de liquidación” era una medida de la eficiencia técnica utilizada (para la época de su estudio) por las factorías de caña de azúcar de Louisiana pero señala que este índice es de valor limitado como una medida de desempeño. En primer lugar, porque su interpretación es algo subjetiva, debido a que tal índice no está constreñida al intervalo entre cero y la unidad y por lo tanto tiene un límite superior abierto y porque tal índice solo considera solo uno de los insumos usados en la producción de azúcar cruda, ignorando los otros insumos en la función de producción. Por lo tanto, el “factor de liquidación” como medida de eficiencia carece de justificación económica formal.

Para la zafra 2015/2016 I KARBE teórico bruto y neto son los mostrados en el cuadro 11:

Cuadro 11. Calculo del KARBE

	Ingenio	KARBE/tonelada de caña bruta teórica	KARBE/tonelada de caña neta teórica
	Ingenio	kg	kg
1	Aarón Sáenz Garza	113.941	125.237
2	Adolfo López Mateos	108.905	114.806
3	Alianza Popular	120.528	125.510
4	Atencingo	127.014	128.435
5	Azsuremex	87.629	87.629
6	Bellavista	120.255	123.919
7	Central Casasano	135.046	135.046
8	Central La Providencia	109.010	113.223
9	Central Motzorongo	109.846	113.905
10	Central Progreso	126.804	126.844
11	Constancia	107.468	112.500
12	Cuatotolapam (CIASA)	118.447	122.775
13	El Carmen	99.589	102.410
14	El Higo	108.892	115.327
15	El Mante	105.705	115.720
16	El Modelo	106.740	110.623
17	El Molino	119.257	121.892
18	El Potrero	119.905	123.281
19	El Refugio	108.323	112.398
20	El Dorado	96.634	102.704
21	Emiliano Zapata	141.347	141.347
22	Huixtla	94.781	103.709
23	José María Morelos	101.824	104.977
24	La Gloria	111.055	115.124
25	La Joya	105.993	109.824
26	Lázaro Cárdenas	115.564	118.006
27	Mahuixtlán	104.510	110.022
28	Melchor Ocampo	117.392	122.379
29	Pablo Machado (La Margarita)	117.248	121.016
30	Pánuco	115.817	122.195
31	Pedernales	116.410	119.024
32	Plan De Ayala	109.670	115.068
33	Plan De San Luis	122.159	128.602

34	Presidente Benito Juárez	104.542	112.323
35	Puga	118.809	121.987
36	Pujilic (Cia. La Fe)	119.896	121.722
37	Quesería	112.024	116.000
38	San Cristóbal	108.977	113.084
39	San Francisco Ameca	115.450	119.824
40	San José de Abajo	111.020	115.156
41	San Miguel del Naranjo	116.491	121.614
42	San Miguelito	106.517	109.031
43	San Nicolás	105.833	111.011
44	San Pedro	103.002	108.250
45	San Rafael de Pucté	96.342	102.060
46	Santa Clara	109.368	112.521
47	Santa Rosalía	106.783	110.825
48	Tala (Jóse Ma. Martínez)	117.584	122.301
49	Tamazula	129.459	133.856
50	Tres Valles	114.641	119.787

Fuente: CONADESUCA (2017).

De acuerdo a Johnson *et al* (1995) esta medida no considera más que solo un insumo y no está restringida al intervalo cerrado entre cero y la unidad

Anexo 3. Información utilizada

Cuadro 12. Corrida del escenario de cosecha sin mecanizar

	Ingenio	canmolbr	horzaf	supcacos	frencor	cortador	canquema	cacosmec	caalzmec	vehacar
		ton	horas	ha			ton	ton	ton	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
1	Aarón Sáenz Garza	830,025	4,401	11,461	10	402	761,266	571,680	258,345	217
2	Adolfo López Mateos	1,702,820	4,788	28,411	26	2,387	1,702,820	0	1,702,820	484
3	Alianza Popular	1,174,524	5,073	21,636	31	1,886	1,077,285	155,613	988,162	359
4	Atencingo	1,810,879	4,586	15,382	32	1,992	1,803,817	12,749	1,810,879	717
5	Azsuremex	131,269	2,629	3,546	3	353	131,269	0	131,269	13
6	Bellavista	706,574	4,427	8,278	18	494	643,286	176,099	706,574	164
7	Central Casasano	589,190	4,503	5,236	2	577	588,725	588,577	0	96
8	Central La Providencia	864,446	4,226	15,005	50	1,582	863,651	0	864,446	246
9	Central Motzorongo	1,391,682	3,749	18,608	61	2,817	1,297,563	73,300	1,225,933	370
10	Central Progreso	841,913	3,882	13,896	45	1,642	841,357	0	841,913	186
11	Constancia	771,752	3,820	12,656	49	1,650	748,445	141,732	630,791	245
12	Cuatotolapam	671,912	3,513	13,883	30	1,500	625,658	78,694	593,258	145
13	El Carmen	242,071	3,199	3,724	33	598	239,408	3,994	123,626	90
14	El Higo	1,795,411	4,853	24,428	4	1,621	1,473,081	354,773	1,440,638	219
15	El Mante	782,506	4,597	13,556	13	142	765,119	608,766	173,740	187
16	El Modelo	993,538	3,591	12,650	14	1,921	976,171	55,241	938,297	281
17	El Molino	1,122,402	5,424	12,029	8	568	1,122,402	0	1,023,990	247
18	El Potrero	1,653,120	3,991	25,991	173	3,422	1,620,074	0	1,545,998	548
19	El Refugio	471,423	3,254	6,456	39	1,216	471,423	94	469,617	159
20	Eldorado	264,043	1,577	2,984	5	0	264,043	257,856	6,187	95
21	Emiliano Zapata	1,056,265	4,111	10,797	11	976	1,056,265	153,232	903,033	238
22	Huixtla	1,238,907	4,032	13,326	14	887	1,221,067	680,433	558,425	272
23	José María Morelos	613,196	3,742	8,673	28	450	611,019	316,201	296,995	131
24	La Gloria	1,434,850	3,499	17,426	63	2,617	1,434,850	101,831	1,333,019	479
25	La Joya	792,519	4,022	14,821	30	895	717,095	196,267	596,252	207

	Ingenio	canmolbr	horzaf	supcacos	frencor	cortador	canquema	cacosmec	caalmec	vehacar
		ton	horas	ha			ton	ton	ton	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
26	Lázaro Cárdenas	342,798	4,144	4,103	26	595	342,798	0	249,564	88
27	Mahuixtlán	432,924	4,368	5,107	8	784	353,244	0	315,212	81
28	Melchor Ocampo	1,112,239	4,294	11,111	2	542	1,087,392	398,827	1,112,239	152
29	La Margarita	1,123,351	4,543	19,077	57	1,751	1,091,234	19,692	1,103,659	326
30	Pánuco	1,574,888	5,056	21,487	30	2,613	1,333,347	241,541	1,333,347	417
31	Pedernales	382,214	3,960	4,171	12	645	382,214	0	347,520	136
32	Plan De Ayala	1,238,218	5,570	18,321	13	1,906	1,045,279	262,032	973,747	375
33	Plan De San Luis	1,230,730	4,379	21,890	41	2,127	1,084,864	340,740	889,990	548
34	Presidente Benito Juárez	1,163,568	3,504	22,710	19	2,013	1,157,052	0	0	676
35	Puga	1,716,164	5,469	19,287	7	1,330	1,708,630	204,567	1,639,623	331
36	Pujiltil (Cia. La Fe)	1,546,230	4,169	17,177	21	2,938	1,546,230	0	1,546,230	458
37	Quesería	1,425,200	5,112	17,794	32	1,050	1,279,231	406,909	1,425,200	255
38	San Cristóbal	2,646,308	4,212	53,825	61	4,006	2,391,442	253,887	2,393,427	1,435
39	San Francisco Ameca	1,161,087	4,078	13,330	18	1,262	968,927	192,160	968,927	174
40	San José De Abajo	512,984	4,179	9,091	43	721	512,984	0	0	170
41	San Miguel Del Naranjo	1,755,784	5,783	28,022	18	1,535	1,482,233	402,601	1,731,203	386
42	San Miguelito	485,674	3,888	5,931	10	1,027	415,941	0	472,818	220
43	San Nicolás	1,014,907	4,133	14,981	43	1,601	993,685	288,721	667,037	343
44	San Pedro	1,202,882	3,935	18,736	11	2,056	1,070,300	211,022	986,496	639
45	San Rafael De Pucté	1,335,437	4,504	30,090	31	1,286	1,240,033	243,370	1,092,054	219
46	Santa Clara	674,320	4,064	6,825	14	407	461,478	214,245	461,080	158
47	Santa Rosalía	664,400	3,123	11,778	14	1,188	584,034	78,034	664,400	314
48	Tala (Jose Ma. Martínez)	2,012,135	4,181	22,471	36	1,615	1,752,751	259,384	1,752,751	383
49	Tamazula	1,156,946	4,015	10,530	310	545	1,156,946	608,068	548,878	168
50	Tres Valles	2,329,987	4,733	36,225	20	3,444	2,080,958	205,971	2,329,987	1,014

Fuente: CONADESUCA (2017)

Cuadro 13. Tabla de abreviaturas de las variables utilizadas

Variable	Definición	Unidades
canmolbr	Caña molida bruta	ton
horzaf	Horas de zafra	horas
supcacos	Superficie de caña cosechada	ha
frencor	Frentes de corte	unidades
cortador	Cortadores	hombres
canquema	Caña quemada	ton
cacosmec	Caña cosechada mecánicamente	ton
caalmec	Caña alzada mecánicamente	ton
vehacar	Vehículos de acarreo	unidades