



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO ADMINISTRATIVAS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y DE
LOS RECURSOS NATURALES

DETERMINACIÓN NO PARAMÉTRICA DE LAS EFICIENCIAS A ESCALA Y
DE LOS RETORNOS A ESCALA DE LOS INGENIOS AZUCAREROS DE

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE:

MAESTRÍA EN CIENCIAS

P R E S E N T A

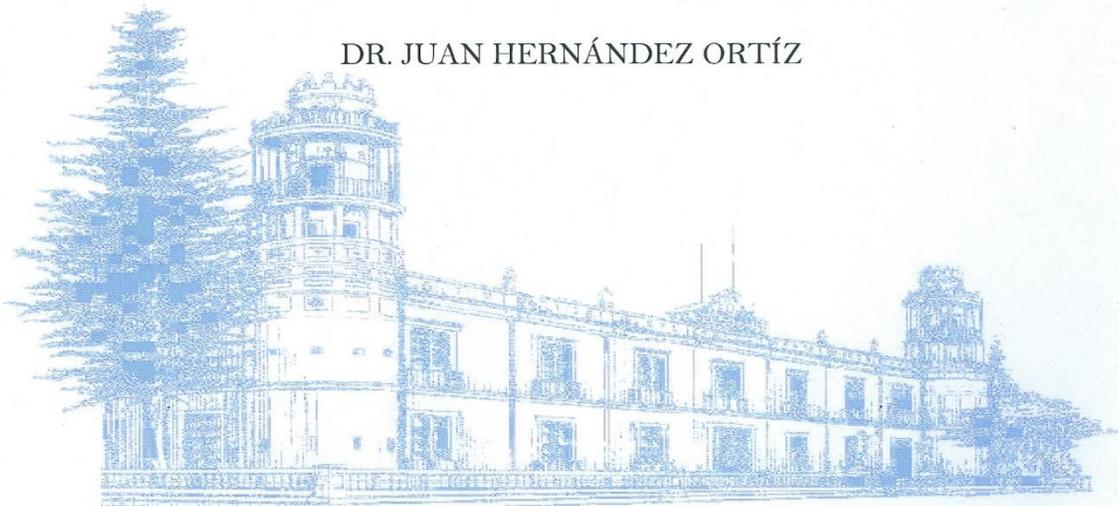
JUAN SALVADOR VAZQUEZ MUÑOZ

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DR. JUAN HERNÁNDEZ ORTÍZ



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

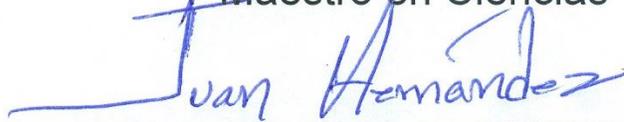


CHAPINGO, EDO. DE MÉXICO, JULIO DE 2019

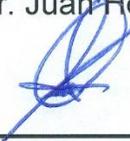
Determinación no paramétrica de la eficiencia de escala y de los retornos a escala de los ingenios azucareros de México

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

Maestro en Ciencias



Director: Dr. Juan Hernández Ortíz



Codirector: Dr. Fermín Sandoval Romero



Asesor: Dr. Ramón Valdivia Alcalá



Asesor: Dr. Cristóbal Martín Cuevas Alvarado

AGRADECIMIENTOS

A DIOS POR SU BONDAD.

*AL CONACYT POR SU APOYO Y FINANCIAMIENTO PARA REALIZAR ESTE
ESTUDIO DE POSGRADO.*

*A LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO Y SU POSGRADO EN ECONOMIA
QUE ME DIERON LAS HERRAMIENTAS Y UNA FORMACIÓN INTEGRAL.*

*A TODOS LOS CATEDRÁTICOS POR SU ENORME DEDICACION, POR TRANSMITIR
LO MAS VALIOSO SU TIEMPO, CONOCIMIENTO Y EXPERIENCIA.*

*EN ESPECIAL AL DR. RAMON VALDIVIA ALCALA POR TODO EL APOYO
BRINDADO PARA LA REALIZACION DE ESTA TESIS.*

*AL DR. FERMIN SANDOVAL ROMERO POR LOS ANIMOS Y PALABRAS DE
ALIENTO EN CADA MOMENTO CUANDO LAS NECESITABA.*

AL DR. JUAN HERNANDEZ ORTIZ POR SER EL GUIA EN LA INVESTIGACION.

*AL DR. CRISTOBAL MARTIN CUEVAS ALVARO QUE SIN EL Y SUS
CONOCIMIENTOS NO SE UBIESE TENIDO EL ÉXITO EN ESTA INVESTIGACION.*

DEDICATORIA

A mi madre, por ser el ángel que guio mi camino en cada momento, ayudándome a crear esas alas para volar tan alto y sin miedo a nada, pero también a ser humilde y agradecido.

A mis hermanitas gemelas Linda y Betty por todo su amor, admiración palabras de aliento y apoyo incondicional.

A mis amigos de la maestría que siempre estuvimos apoyándonos en todo momento, Jesdel, Pablito, Ilich, Chuy, Brenda, Rebeca, Yira, Iván, David
A mis Toros de toda la vida que entregue todo en ese campo de los sueños el “Palomo Ruiz Tapia”.

A la Ing. Fabiola Jerónimo, Carlos Iván Villanueva, Xóchitl Villanueva por su apoyo incondicional.

A todos aquellos que contribuyen a ser de mí una mejor persona.

DATOS BIOGRAFICOS



Nació en Cuernavaca, Morelos un 16 de noviembre de 1993. Fue el primero de tres hermanos, es hijo del Ing. Víctor Vázquez Vega y C. Rosalinda Muñoz Tafolla. Asistió a la primaria Miguel Hidalgo ubicada en Puente de Ixtla, Morelos. En agosto de 2006 ingresó a la Secundaria Técnica #3 en Amacuzac, Morelos. Posteriormente, ingresó al nivel medio superior en la Universidad Autónoma Chapingo en el año 2009.

En julio del 2012 eligió la carrera de licenciado en comercio internacional en la misma casa de estudios.

En el 2015 llevó a cabo un estudio socioeconómico que reflejaba el impacto económico en las familias de la región causado por la empresa FACES en Culiacán, Sinaloa.

En el periodo Enero–Julio del 2016 realizó su servicio social en el H. ayuntamiento de Texcoco, edo. de México dando capacitación a productores de la región.

Realizó sus prácticas pre-profesionales en São Paulo Brasil. Donde tomo clases afines a su carrera comercio internacional que en la universidad paulista (UNICID) tenía el nombre de comercio exterior. En el año 2017 obtiene el grado de Licenciado en Comercio Internacional.

En agosto del 2017 se integra a la comunidad de la División de Ciencias Económico Administrativas como alumno del Posgrado de Economía en la Universidad Autónoma Chapingo. En año 2018 fue elegido como capitán con el jersey #18 del equipo representativo de la universidad toros salvajes y con el distintivo de seleccionado nacional.

Índice general

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN | 2 |
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 3 |
| <i>Objetivos</i> | 5 |
| <i>Hipótesis de trabajo</i> | 6 |
| 1.2. ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN | 6 |
| CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO | 8 |
| 2.1. LA FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN EN EL CORTO PLAZO | 8 |
| 2.2. PRODUCTO PROMEDIO, PRODUCTO MARGINAL Y PRODUCTO TOTAL | 9 |
| 2.3. RENDIMIENTOS A ESCALA EN LA FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN NEOCLÁSICA | 12 |
| 2.4. ECONOMÍAS DE ESCALA Y ECONOMÍAS DE TAMAÑO | 14 |
| 2.5. ECONOMÍAS DE TAMAÑO | 14 |
| 2.6. ECONOMÍAS DE ESCALA | 18 |
| 2.7. FUNCIONES DE PRODUCCIÓN HOMOGÉNEAS | 18 |
| 2.8. LA ESCALA DE PRODUCCIÓN | 19 |
| 2.9. LA EFICIENCIA DE ESCALA EN EL ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS | 20 |
| 2.10. EL CONCEPTO DE EFICIENCIA CON LA METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS (DEA) | 24 |
| 2.11. EL MODELO CHARNES, COOPER Y RHODES (CCR) EN FORMA DE PROGRAMACIÓN LINEAL | 27 |
| CAPÍTULO III. REVISIÓN DE LITERATURA..... | 32 |
| CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA | 42 |
| 4.1. LOCALIZACIÓN DE LOS INGENIOS AZUCAREROS EN MÉXICO | 42 |
| 4.2. FUENTES DE INFORMACIÓN | 43 |
| 4.3. VARIABLES UTILIZADAS EN EL ESTUDIO | 43 |
| 4.4. DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES | 44 |
| 4.5. FORMACIÓN DE GRUPOS DE INGENIOS POR CUARTILES | 45 |
| 4.6. SOTWARE UTILIZADO EN LA ESTIMACIÓN DE LOS ÍNDICES | 46 |
| CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 47 |
| 5.1. RELACIÓN TAMAÑO DE SUPERFICIE Y PRODUCTIVIDAD | 47 |
| 5.2. AGRUPAMIENTO DE INGENIOS POR CUARTILES | 48 |
| 5.2.1. <i>Grupo 1 de ingenios</i> | 49 |
| 5.2.2. <i>Grupo 2 de ingenios</i> | 50 |
| 5.2.3. <i>Grupo 3 de ingenios</i> | 50 |
| 5.2.4. <i>Grupo 4 de ingenios</i> | 51 |
| 5.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS | 52 |
| 5.4. ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS | 52 |
| 5.4. EFICIENCIA TÉCNICA BAJO RETORNOS CONSTANTES Y RETORNOS VARIABLES A ESCALA | 53 |
| 5.5. INTERPRETACIÓN DE LOS ÍNDICES DE EFICIENCIA POR GRUPO | 56 |
| 5.5.1. <i>Ingenios operando en su escala óptima</i> | 56 |
| 5.5.2. <i>Ingenios operando con ineficiencia total e ineficiencia de escala</i> | 57 |
| 5.5.3. <i>Ingenios operando con ineficiencia pura e ineficiencia de escala</i> | 58 |
| 5.6. IDENTIFICACIÓN DE LA NATURALEZA DE LOS RENDIMIENTOS A ESCALA POR INGENIO | 59 |
| 5.7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 61 |
| CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 62 |

| | |
|---|-----------|
| 5.1. CONCLUSIONES | 62 |
| 5.2. RECOMENDACIONES | 63 |
| BIBLIOGRAFÍA | 65 |
| ANEXO 1. ESTIMACIÓN DE LA VARIABLE ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA..... | 70 |

Índice de cuadros

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Eficiencia técnica y de escala de las granjas lecheras de Nueva Zelanda..... | 37 |
| Cuadro 2. Localización de los ingenios cañeros de México | 42 |
| Cuadro 3. Información contenida en CONADESUCA 2017..... | 43 |
| Cuadro 4. Definición de las variables utilizadas..... | 44 |
| Cuadro 5. Límites de los cuartiles por rendimiento de caña | 48 |
| Cuadro 6. Relación tamaño de explotación y productividad (Cuartil I) | 49 |
| Cuadro 7. Relación tamaño de explotación y productividad (Cuartil II) | 50 |
| Cuadro 8. Relación tamaño de explotación y productividad (Cuartil III) | 51 |
| Cuadro 9. Relación tamaño de explotación y productividad (Cuartil IV)..... | 51 |
| Cuadro 10. Estadísticas descriptivas de las variables utilizadas..... | 52 |
| Cuadro 11. Eficiencia y retornos a escala de las DMU cañeras en la zafra 2010/11 | 54 |
| Cuadro 12. Ingenios azucareros operando en la escala óptima 2010/11..... | 56 |
| Cuadro 13. Ingenios azucareros operando con ineficiencia total y escala 2010/11 | 57 |
| Cuadro 14. Ingenios azucareros con ineficiencia pura y de escala 2010/11..... | 58 |
| Cuadro 15. Ingenios cañeros con rendimientos crecientes a escala 2010/11 | 59 |
| Cuadro 16. Ingenios cañeros con rendimientos decrecientes a escala 2010/11 | 61 |
| Cuadro 17. Conversión de energía eléctrica a megajoules | 70 |
| Cuadro 18. Conversión de petróleo a megajoules..... | 71 |
| Cuadro 19. Conversión de bagazo a megajoules | 71 |
| Cuadro 20. Energía total consumida en la zafra 2006/07 | 72 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. La función de producción neoclásica y las etapas de la producción..... | 11 |
| Figura 2. Deducción de las curvas de costo de largo plazo (1) | 16 |
| Figura 3. Deducción de las curvas de costo de largo plazo (2) | 17 |
| Figura 4. Escalas de producción de una función cúbica | 20 |
| Figura 5. Eficiencia de escala con Retornos Variables a Escala..... | 22 |
| Figura 7. Comparación de la DEA y la regresión | 25 |
| Figura 8. Relación tamaño de superficie y rendimiento de caña..... | 48 |

Siglas y abreviaturas

| | | |
|------------|---|--|
| CCR | = | Modelo de Análisis Envolvente de Datos tipo Charnes-Cooper-Rhodes |
| CFE | = | Comisión Federal de Electricidad |
| CONADESUCA | = | Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar |
| CRAN-R | = | Comprehensive R Archive Network - R |
| CRS | = | Retornos Constantes a Escala (Constant Returns to Scale) |
| CSR | = | Retornos Constantes a Escala (Constant Scale Return) |
| DEA | = | Análisis Envolvente de Datos (Data Envelopment Analysis) |
| DMU | = | Unidades de Toma de Decisiones |
| DOF | = | Diario Oficial de la Federación |
| FIRA | = | Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura |
| IV | = | Insumos Variables |
| LRAV | = | Costo Medio de Largo Plazo |
| LRMC | = | Costo Marginal de Largo Plazo |
| LRTC | = | Costo Total de Largo Plazo |
| MPSS | = | Tamaño de Escala más Productivo (Most Productive Scale Size) |
| NIRS | = | Retornos a Escala No Crecientes |
| OTE | = | Eficiencia Técnica Global |
| PM | = | Producto Marginal |
| PP | = | Producto Promedio |
| RPD | = | Punto de Retornos Promedios Decrecientes |
| RTD | = | Punto de Retornos totales Decrecientes |
| SAGARPA | = | Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación |
| SE | = | Eficiencia de Escala (Scale Efficiency) |
| SFA | = | Análisis Estocástico de Frontera (Stochastic Frontier Analysis) |
| SIAP | = | Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera |
| SRAC | = | Costo Medio de corto Plazo |
| SRMC | = | Costo Marginal de Corto Plazo |
| SRTC | = | Costo Total de corto Plazo |
| UNC - CNPR | = | Unión Nacional de Cañeros – Confederación Nacional de Propietarios Rurales |
| UNPCA- CNC | = | Unión Nacional de Productores de Caña de Azúcar – Confederación Nacional Campesina |
| VRS | = | Retornos Variables a Escala |
| VRS | = | Retornos Variables a Escala (Variable Returns to Scale) |
| VRTS | = | Modelo de Retornos Variables a Escala tipo CCR |

Nota: CRAN-R es un sitio web donde están disponibles los cientos de paquetes producidos por usuarios del software R.

Determinación de la eficiencia de escala y de los retornos a escala de los ingenios azucareros de México

Juan Salvador Vázquez Muñoz ¹, Juan Hernández Ortiz ²

Resumen

En México la agroindustria de la caña de azúcar es importante por impactar 25 entidades federativas y 267 municipios. En la zafra 2017/18 el valor de la producción de la caña de azúcar representó el 6.8% respecto del valor total de la producción agrícola y además operaron 51 ingenios azucareros. No obstante en la zafra 1995/96 operaron 61 de estas plantas, por lo que en un periodo de 19 años cerraron o pararon 10 ingenios azucareros lo que representa un 16.4% de la infraestructura de molienda de la agroindustria cañera. Las causas, aunque son de naturaleza múltiple, desde el punto de vista técnico existen una serie de ineficiencias en sus parámetros que pudieron haber influido en su cierre o paro. La presente investigación tuvo como objetivos analizar la supuesta relación inversa entre la escala o tamaño de la superficie de caña molida neta y la productividad por hectárea así como determinar el tipo de escala y naturaleza de los rendimientos a escala con que operan los ingenios azucareros en México. El estudio se realizó para la zafra 2010/1 por ser de la que se disponía información completa de las variables utilizadas. La metodología utilizada fue la clasificación de los ingenios por cuartiles según su tamaño y rendimientos de caña molida neta por hectárea así como la metodología del análisis de datos envolventes (DEA) basada en la programación lineal. Los resultados muestran que se verifica para México la hipótesis de la relación inversa entre el tamaño de la superficie cosechada de los ingenios azucareros y la productividad, pues a mayor superficie menor rendimiento de caña molida neta por hectárea, destacándose el ingenio de San Cristóbal, el cual con la mayor proporción de superficie cosechada (6.1%) tuvo en más bajo rendimiento en la zafra de estudio (54.2 ton/ha). La metodología DEA permitió identificar que 23 ingenios operan en su escala óptima, nueve ingenios que operan bajo ineficiencia total y de escala y un tercer grupo que opera con ineficiencia pura e ineficiencia de escala. La DEA también permitió identificar que 23 ingenios operaron con rendimientos constantes a escala, 29 con rendimientos crecientes a escala y solo dos ingenios con rendimientos decrecientes a escala. La principal conclusión es que la agroindustria de la caña de azúcar tiene un margen importante para mejorar su eficiencia y desempeño.

Palabras clave: análisis de datos envolventes, eficiencia total, eficiencia pura, retornos a escala no crecientes.

Estudiante del Programa de Postgrado de la División de Ciencias Económico Administrativas (DICEA) de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH).

² Profesor Investigador de la UACH.

Determination of scale efficiency and returns to scale of Mexican sugar mills

Summary

In Mexico, the sugarcane agroindustry is important because it impacts 25 states and 267 municipalities. In the 2017/18 harvest, the value of production represented the 6.8% respecto to the total value of agricultural production. Furthermore, also 51 sugar mills operated in that time. However, in the 1995/96 harvest, 61 of these plants operated, so in a period of 19 years, 10 sugar mills closed down or stopped, representing 16.4% of the milling infrastructure of the sugarcane agroindustry. Although the causes are of multiple nature, from the technical point of view there are a series of inefficiencies in their parameters that could have influenced their closure or stoppage. The objective of this research was to analyze the assumed inverse relationship between the scale or size of the area of net ground cane and the productivity per hectare, as well as to determine the type of scale and nature of the yields at scale with which the sugar mills operate in Mexico. The study was carried out for the 2010/1 harvest because it provided complete information on the variables used. The methodology used was the classification of the mills by quartiles according to their size and yields of net milled cane per hectare as well as the methodology of the data envelopment analysis (DEA) based on linear programming. The results show that for Mexico the hypothesis of the inverse relationship between the size of the surface harvested from the sugar mills and the productivity is verified, because the greater the area, the lower the yield of net ground cane per hectare, with the San Cristóbal mill standing out with the highest proportion of harvested area (6.1%) had the lowest yield in the study harvest (54.2 ton / ha). The DEA methodology allowed the identification of 23 mills operating at their optimum scale, nine mills operating under full scale inefficiency and a third group operating with pure inefficiency and scale inefficiency. The DEA also allowed to identify that 23 mills operated with constant returns to scale, 29 with increasing returns to scale and only two mills with decreasing returns to scale. The main conclusion is that the sugarcane agroindustry has an important margin to improve its efficiency and performance.

Key word: data envelopment analysis, total efficiency, pure efficiency, non increasing returns to scale

Capítulo I. Introducción

La caña de azúcar en México es importante porque la agroindustria de dicho cultivo tiene presencia en 15 entidades federativas y 267 municipios. De acuerdo con el CONADESUCA (2018) en la zafra 2017/2018 se cosecharon 784,661 hectáreas de caña de azúcar con un rendimiento neto de 65.3 toneladas por hectárea, un precio promedio de pago por tonelada de caña neta de \$851.017 por tonelada de caña neta. El valor de la producción fue de esta manera de \$43,587,729,113 que habría representado aproximadamente el 6.8% del valor total de la producción agrícola de 2018. La producción de caña molida neta fue de 51,218,400 toneladas producida en 51 ingenios que operaron en la referida zafra.

El cultivo de la caña de azúcar es el único cultivo que cuenta con una norma que regula las relaciones entre los ingenios cañeros y los abastecedores del insumo fundamental de estas unidades de toma de decisiones y varios aspectos más de este. Esta norma es la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar publicada en el Diario Oficial de la Federación en agosto de 2005 y junto con el Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña (PRONAC 2014 - 2018) son los instrumentos normativos y que dan directrices para la planeación, modernización y mejora de competitividad vía la investigación. No obstante, aunque se cuenta tal programa específico para la agroindustria; en la práctica, la operatividad, rentabilidad y el impulso a la capacidad fabril de la agroindustria presenta enormes desafíos emanados de la casi permanente crisis estructural. No obstante, han sido dos los momentos en que la situación de los ingenios azucareros ha hecho crisis que han obligado a acciones por parte del sector público. Entre la segunda década del siglo XX y 1980 los ingenios azucareros fueron manejados por el Estado, por lo que tal agroindustria estaba altamente subsidiada y la política era errática. La situación empeoró entre 1988 y 1990 pues los grandes volúmenes de importaciones de azúcar causó un exceso de oferta, existía sobreendeudamiento y cartera vencida de los ingenios, limitado acceso a créditos, incremento en los costos de producción y la fijación de precios era castigada hasta con un 15% por debajo del precio concertado. Además, existía estancamiento en la productividad de los campos cañeros e ingenios con pérdida de rentabilidad, lo que dificultó el pago de deudas, por lo que varios ingenios cerraron definitivamente. En este contexto es que el gobierno de Salinas de Gortari tomó la decisión de vender los ingenios a un reducido grupo

de empresarios, entre los que se encontraban socios de las compañías refresqueras, bajo el argumento de la modernización de la agroindustria (Molina, 2019)

El segundo momento de la intervención del sector público en la agroindustria cañera se suscitó en el gobierno de Vicente Fox. De acuerdo con Molina (2019), el gobierno en turno decidió estatizar 27 ingenios en 2001 con costo al erario público bajo el supuesto de paliar la crisis que en ese momento sufrían los ingenios, que arrastraban deudas de deudas fiscales, de seguridad social, deudas por créditos, así como aquellas contraídas con productores y jornaleros, que ascendían a más de 3 mil millones de dólares.

El corolario de tales crisis son una 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

De acuerdo con la UNC (1996) la superficie de caña industrializada en la zafra 1995/96 fue de 577,106 hectáreas con un rendimiento de 69.63 toneladas por hectárea y producción de caña molida neta de 39,415,468 toneladas producida en 61 ingenios azucareros y un precio por tonelada de caña de \$153.705. De esta manera el valor de la producción fue de \$6,058,354,509; lo que represento el 5.2% del valor de la producción agrícola de 1996.

Al comparar en el periodo 1996 a 2015, o sea en 19 años, el número de ingenios azucareros que han operado en la respectiva zafra, se encuentra que han dejado de operar 10 ingenios azucareros de la agroindustria cañera mexicana; es decir, en promedio, aproximadamente cada dos años ha dejado de funcionar un ingenio azucarero.

Ahora bien, el análisis de una serie de indicadores de la productividad de la agroindustria cañera muestra que ésta ha tenido una serie de ineficiencias y atrasos tecnológicos que han repercutido en su rentabilidad y probablemente influir en el cierre del 22% de los ingenios existentes en un periodo de 19 años. De acuerdo con FIRA (2014) la caña de azúcar es un insumo que podría generar productos como biofertilizantes, biocombustibles, bonos de carbono por la reducción de emisiones contaminantes, etc. Esto podría generar ingresos adicionales y mejoraría la posición de rentabilidad de los ingenios. No obstante, la

agroindustria esta poco diversificada y además muestra ineficiencias en varios parámetros técnicos. Entre las principales se tiene:

- Las plantas industriales sólo están aprovechando el 39% del contenido calórico total de una tonelada de caña (1.2 millones de kilocalorías).
- Considerando a todos los ingenios, el promedio de petróleo consumido por tonelada de azúcar producida son 33.7 litros; no obstante, al eliminar del grupo de 18 ingenios que han dejado de consumir petróleo, el promedio se eleva a 51.3 litros de petróleo por tonelada de azúcar producida.
- La agroindustria de la caña de azúcar compra aproximadamente el 6.3% de energía eléctrica a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para poder realizar la molienda de la caña de azúcar, lo que eleva sus costos de operación. Es decir la agroindustria cañera no es autosuficiente en la generación de energía eléctrica para autoconsumo, aun cuando el marco legal existente le permite generar excedentes mediante cogeneración y venderlo a la CFE, lo que podría llegar a constituir una fuente de ingresos que mejoren sus balances financieros¹.
- El tiempo perdido promedio por zafra en el periodo 2005 a 2016 del total de horas de zafra por año (209,818 horas) es del 19.1%. Este 19.1% se distribuye como sigue: 3.3% a campo, 8.9% a fábrica, 0.4% por días festivos, 5.4% por lluvias y 1.1% por personal. Es decir, la mayor parte del tiempo perdido total corresponde al ingenio como tal debido a la escasez de mantenimiento de la planta y de sustitución del equipo problemático u obsoleto.
- En el periodo 2005 a 2016 la agroindustria de la caña de azúcar ha pagado en promedio 118.28 kilogramos de azúcar por tonelada de caña molida neta a los productores; no obstante, los kilos de azúcar realmente obtenidos en promedio por tonelada de caña molida neta fueron 117.38 kilogramos. Es decir, el ingenio no está alcanzando la eficiencia señalada en la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar para el

¹ La cogeneración es procesos en el cual simultáneamente se obtiene energía eléctrica y energía térmica (calor) a partir de la energía primaria. Esta energía primaria se suele obtener mediante la combustión de combustibles fósiles y en el caso de los ingenios también mediante la quema de biomasa como lo es el bagazo.

pago de la caña en base al precio de referencia determinado por CONADESUCA. Esto implica que el ingenio está pagando un sobre costo de 0.765 kilogramos por tonelada de caña de azúcar que en términos monetarios ha significado una erogación de 3,044,740 millones de pesos.

- Un parámetro que muestra el atraso tecnológico de los equipos físicos de los ingenios se reflejan en el llamado consumo específico de vapor de la caña de azúcar. De acuerdo con FIRA (2014) en la zafra 2008/2009 éste parámetro fue de 18.5 y el mayor de 87, cuando el parámetro óptimo se encuentra en un rango de 4 a 6. Lo anterior, implica una utilización totalmente ineficiente del bagazo de caña y del petróleo, por el uso de calderas y turbogeneradores que operan a muy bajas presiones y bajas temperaturas de vapor, la configuración típica de cogeneración actual en los Ingenios es de 17.5 kg/cm² y 240° C. Esto implica una obsolescencia tecnológica de calderas y equipo físico.

Resumiendo, en el periodo 1995/1996 operaron 61 ingenios azucareros mientras que en la zafra 2015/2016 solo lo hicieron 51; es decir, en un periodo de 19 años cerraron 10 ingenios, lo que ha representado el 19.6% de estas unidades de toma de decisiones existentes por lo que resulta urgente el análisis de las causas tanto estructurales de toda la agroindustria como propias de cada unidad de toma de decisiones.

Una forma de generar información cuantitativa que ayuden a dilucidar de una forma general cual es el desempeño de los ingenios y por lo tanto encontrar cuál o cuáles ingenios pueden dejar de operar es determinar su escala de operación y tipo de rendimientos a escala que tiene, para lo cual la presente investigación persigue los objetivos que se enuncian a continuación.

Objetivos

- Determinar la eficiencia de escala y los rendimientos a escala a que operaron los ingenios de la agroindustria de la caña de azúcar en México en la zafra 2010/2011.

- Determinar la relación que existe entre el tamaño de la superficie cosechada de los ingenios azucareros y su productividad.
- Determinar la eficiencia técnica a la que operaron los ingenios azucareros en la zafra 2010/2011 bajo el supuesto de retornos constantes a escala y con orientación al insumo.
- Determinar la escala de operación de los ingenios azucareros en la zafra 2010/2011 bajo el supuesto de retornos variables a escala y con orientación al producto.
- Determinar los rendimientos a escala de los ingenios azucareros de México en la zafra 2010/2011.

Hipótesis de trabajo

- Existen varios grupos de ingenios azucareros en México: aquellos que no tienen ninguna fuente de ineficiencias pues si realizan las mejores prácticas de manejo y administración de sus insumos en el proceso productivo y operan en su escala óptima y aquellos ingenios azucareros que tiene como fuentes de ineficiencia el mal manejo y administración de sus recursos e insumos y/o la ineficiencia por el hecho de trabajar a un tamaño menor o mayor al óptimo.

1.2. Estructura de la investigación

La presente investigación se compone seis capítulos y los Anexos respectivos. El primer capítulo corresponde a la introducción donde se expone la importancia de la caña de azúcar en México y hace una reseña de los indicadores de la zafra 1995/95 contra los de la zafra 2017/18, resaltando el hecho que en un periodo de 19 años han dejado de operar 11 ingenios azucareros, es decir casi un ingenio cada dos años. En el segundo capítulo se desarrolla el marco teórico de la investigación. Al respecto vale la pena comentar que la metodología se basa en el análisis de datos envolvente, pero la misma es solo el soporte para determinar la escala de operación y la naturaleza de los rendimientos a escala que presentan los ingenios azucareros en la zafra 2010/11, pues el tema de operación de escala de unidades económicas y naturaleza de los rendimientos a escala son tópicos avanzados pues van más allá de la mera determinación de la mera eficiencia técnica, cambio tecnológico o la productividad total de los factores. No obstante, dichas temáticas están estrechamente vinculadas. En el tercer capítulo se realiza la revisión de trabajos de investigación que utilicen la misma metodología que la usada en éste trabajo. Se revisa

también un artículo que analiza la hipótesis de la relación inversa entre la escala de la superficie cosechada de la caña de azúcar y la productividad por hectárea. En el cuarto capítulo se expone la metodología utilizada en este trabajo. Se destaca el hecho que existen software proporcionan directamente las eficiencias de escala y la naturaleza de los rendimientos a escala que presenta cada unidad de toma de decisiones y que ya no es necesario que el usuario de software antiguos, como el DEAP 2.1, los determine a partir de la eficiencia técnica bajo los supuestos de rendimientos constantes, eficiencia técnica bajo rendimientos variables a escala y la eficiencia técnica bajo rendimientos no crecientes a escala. En el capítulo cinco se exponen los resultados de la investigación y una breve discusión de los mismos. En el capítulo seis se enuncian conclusiones y recomendaciones. Finalmente se incluye un apartado de referencias bibliográficas y otro apartado para Anexos, los cuales apoyan fundamentalmente al capítulo de metodología y de resultados.

Capítulo II. Marco teórico

De acuerdo con Rasmusen (2011), la teoría económica en gran medida habla sobre el dinero, costos, precios, mercados, rentabilidad de la inversión, ganancias y conceptos económicos similares, lo cual es también el caso de la teoría de la economía de la producción. No obstante, la teoría de la economía de la producción es especial porque los límites del comportamiento económico se definen por las posibilidades técnicas de producción. La tecnología de producción es el factor decisivo con respecto a la cantidad producida y cómo se puede producir. Por lo tanto, una parte muy importante de la teoría de la economía de la producción consiste en describir la tecnología de producción que define el marco para el comportamiento económico. La descripción de la tecnología producción es tradicionalmente basada en la función de producción. En el apartado que siguen se expone la función de producción y otros conceptos relacionados con la tecnología de la producción.

De acuerdo con Devertin (2002) la producción es una serie de actividades por las cuales los insumos o recursos utilizados (materia prima, mano de obra, capital, tierra y talento empresario) son transformados en un determinado período de tiempo en productos (bienes o servicios). Los economistas usan el término función producción para referirse a la relación física entre los insumos utilizados por la empresa y sus productos (bienes o servicios) por unidad de tiempo. Simbólicamente la función de producción suele representarse como:

$$Q = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

donde Q representa la cantidad de producto total por período de tiempo a partir de combinaciones específicas de estos insumos, X_1 , X_2 y X_n representan cantidades de distintos tipos de insumos e f implica una función que hace operativo el concepto teórico especificando una forma funcional de las relaciones técnicas entre la producción Q y los distintos tipos de insumos X_1 , X_2 y X_n ; pudiendo ser una relación polinomial, logarítmica, etc.

2.1. La función de producción en el corto plazo

En la microeconomía se hacen una serie de definiciones para poder aterrizar el concepto de función de producción en el corto plazo.

La definición de insumo fijo implica a aquél cuya cantidad no puede ser cambiada en el corto plazo, como respuesta al deseo de una empresa de cambiar su nivel de producción. Como ejemplo de insumo fijo se tienen piezas de equipos o maquinaria, espacio disponible para la producción, personal directivo, etc. (Nicholson, 2007).

Un insumo variable es uno que se puede alterar muy fácilmente en cantidad como respuesta al deseo de elevar o disminuir el nivel de producción. Ejemplo de esta clase de insumos se tiene a la energía eléctrica, materias primas, mano de obra directa, etc. Debe destacarse que en ocasiones los insumos variables están limitados en su variación debido a contratos (e. g., oferta fija de materia prima) o leyes (e. g., leyes laborales), en tales casos se puede hablar de insumos semivariables (Nicholson, 2007).

El corto plazo se define como el periodo en el que la empresa no puede variar sus insumos fijos. El corto plazo es adecuadamente largo como para permitir la variación de los insumos variables. El largo plazo se define como un periodo de tiempo suficientemente largo como para permitir la variación de todos los insumos; ningún insumo está fijo, incluyendo la tecnología. A manera de ejemplo, mientras que en el corto plazo una empresa puede aumentar su producción laborando horas extras, en el largo plazo puede construir y expandir su superficie de producción para instalar maquinaria intensiva en capital y evitar sobretornos (Zugarramurdi y Parin, 1998).

De acuerdo con Zugarramurdi y Parin (1998) la cantidad de insumos fijos de una planta es factor determinante de la escala de operaciones. La escala de una planta determina a su vez el límite máximo de producto por unidad de tiempo, que esa empresa es capaz de producir en el corto plazo. La producción puede ser variada, en el corto plazo, disminuyendo o aumentando el uso de insumos variables en relación con la cantidad de insumos fijos. En el largo plazo, la producción puede ser aumentada o disminuida cambiando la escala de producción, la tecnología utilizada y el uso de todos o cualquiera de los insumos.

2.2. Producto promedio, producto marginal y producto total

Siguiendo Zugarramurdi y Parin (1998) el producto promedio (PP) que es la producción total por unidad de insumo utilizado y el producto marginal (PM) que es el cambio en la cantidad producida por unidad de tiempo resultante de un cambio unitario en la cantidad del insumo

variable. La forma de las curvas de PP y PM se determinan por la forma de la correspondiente función producción (PT). La función de producción utilizada para explicar relaciones importantes y conceptos básicos relacionados con ella ha sido la forma funcional cúbica (Nicholson, 2007).

Ahora bien, el principio de los rendimientos marginales decrecientes, se relaciona con las cantidades de producto que pueden obtenerse, cuando cantidades crecientes de insumos variables, por unidad de tiempo, son incorporados al proceso productivo y combinadas con una cantidad constante de insumo fijo. El principio puede enunciarse diciendo que se encontrará un punto donde los incrementos de producto total obtenido resulta cada vez menor. Cuando el producto promedio está aumentando, el producto marginal es mayor que el promedio; cuando el promedio alcanza su máximo, éste iguala al producto marginal.

En la Figura 1 puede observarse que antes de alcanzar el inevitable punto de rendimientos marginales decrecientes la cantidad de producto final obtenida puede aumentar de forma creciente. Por encima del punto de inflexión de la función producción, un mayor uso del insumo variable provoca una disminución del producto marginal. Una función producción y las curvas de PP y PM asociadas pueden dividirse en 3 etapas, como puede verse también en el panel inferior de la Figura 1.

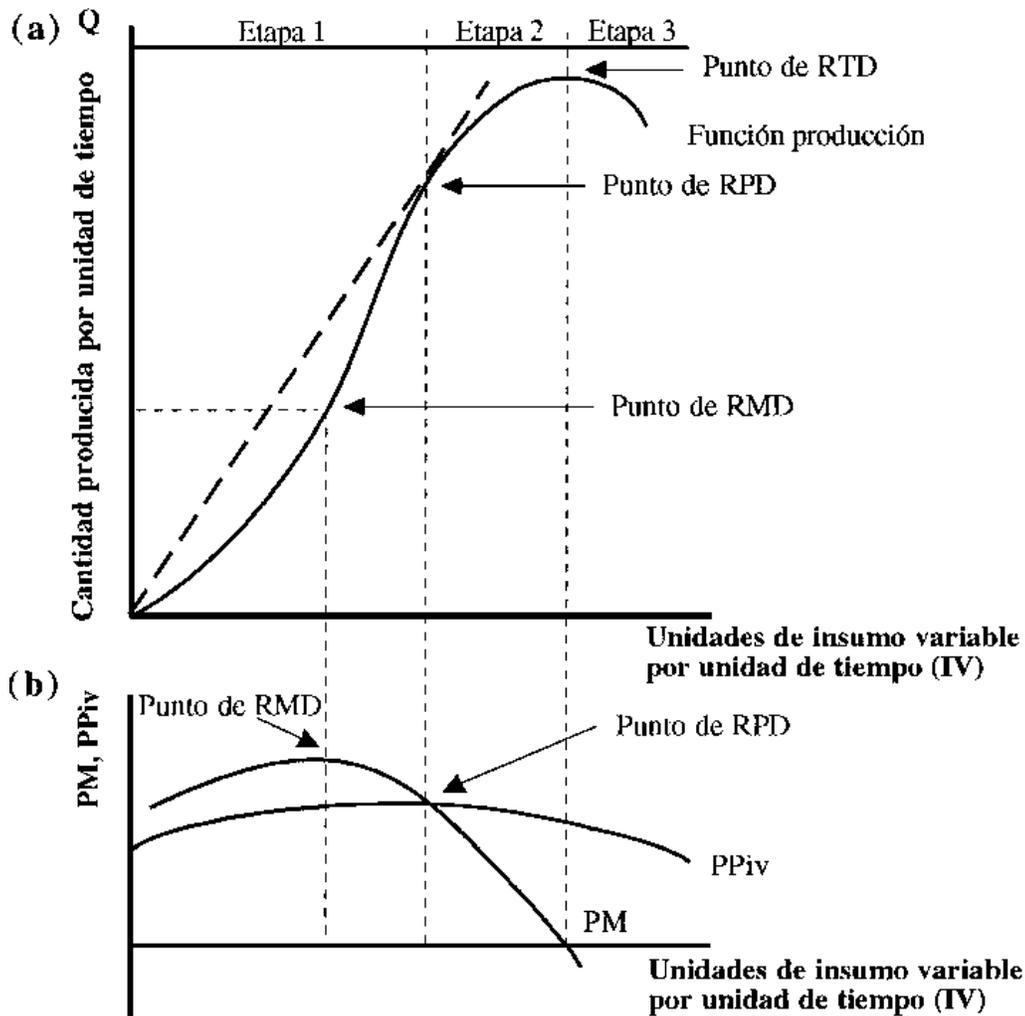


Figura 1. La función de producción neoclásica y las etapas de la producción
 Fuente: Zugarramurdi y Parin (1998).

La etapa 1 se extiende desde cero unidades de insumos variables (IV) hasta el punto donde el PP_{IV} es máximo (Punto de Retornos Promedios Decrecientes, RPD). La etapa 2 se extiende desde el máximo de PP hasta el punto donde la cantidad de producto es máximo y el PM es cero (Punto de Retornos Totales Decrecientes, RTD). La etapa 3 coincide con el rango de IV, donde el producto total está disminuyendo y el PM es negativo (Nicholson, 2007).

Las etapas tienen un significado especial para analizar la eficiencia con la que son utilizados los recursos. El máximo de (PM) versus (unidades de IV) define el punto de RMD a partir del cual un aumento en el IV significará una disminución en el (PM). La primera etapa

corresponde al rango en el cual el PP está aumentando como resultado de la utilización de cantidades crecientes de insumos variables (materia prima, mano de obra, etc.).

Un productor racional no operaría en este rango debido a que los insumos fijos, (IF) (equipos) están siendo subutilizados. Esto es, la producción esperada por la utilización de más horas-hombre, por ejemplo, está aumentando a través de la etapa 1, lo que indica que la misma producción podría ser obtenida con una cantidad menor de insumo fijo. En la etapa 3 tampoco es conveniente la producción. Unidades adicionales de IV realmente reducen la producción total.

Si la eficiencia del proceso productivo es medida por el producto promedio ya que el mismo indica la cantidad de producto obtenida por unidad de insumo, la discusión anterior pone de manifiesto que la etapa 2 es la mejor desde el punto de vista de la eficiencia. En la etapa 1, los (IV) están siendo usados en muy pequeña proporción comparados con los (IF). Las consideraciones de eficiencia llevarán a la empresa a producir, por lo menos, en el límite de las etapas 1 y 2.

2.3. Rendimientos a escala en la función de producción neoclásica

La teoría microeconómica y la economía de la producción, al lado de la función de producción teórica, que es la que presenta las llamadas tres etapas de la producción como se ha visto, analizan los llamados rendimientos a escala (Zugarramurdi y Parin, 1998).

Como se ha visto el análisis de la función producción de la empresa en el corto plazo, implica que una porción de los recursos de la misma son fijos. Éste análisis es muy ilustrativo para el caso donde se tiene un solo insumos y un solo producto.

El concepto de rendimientos de escala aparece cuando la empresa está en producción durante un período de tiempo lo suficientemente largo como para permitir cambios en cualesquiera y todos sus insumos, en especial, aquéllos que son típicamente fijos en el corto plazo. Para esto asumen al menos dos insumos.

Los rendimientos de escala se definen para el caso en que todos los insumos son cambiados en iguales proporciones. Si se considera una empresa que utilizando X_1

unidades de mano de obra en combinación con X_2 unidades de capital, obtiene Q unidades de producto, se pueden escribir:

$$X_1 + X_2 = Q$$

Si se asume que las cantidades X_1 y X_2 son variadas en la proporción λ (Nicholson, 2007). Es obvio que la producción Q cambiara. La pregunta es ¿en qué proporción? Si se designa esta proporción como γ se tendrá:

$$\lambda X_1 + \lambda X_2 = \gamma Q$$

1. Si el cambio en la producción es más que proporcional al cambio en los insumos ($\lambda > \gamma$) se dice que existen rendimientos crecientes de escala.
2. Si $\lambda = \gamma$ se dice que existen rendimientos constantes a escala.
3. Si $\lambda < \gamma$ se dice que existen rendimientos decrecientes a escala.

Para una misma tecnología es generalmente cierto que al expandir la escala de la operación, la empresa pasará sucesivamente por:

1. Un período corto de rendimientos crecientes de escala.
2. Un largo período de rendimientos constantes, y
3. Un período de rendimientos decrecientes.

Por lo tanto, una empresa puede incrementar el uso de sus insumos hasta el punto de máxima producción; aumentos posteriores de insumos podrían producir una etapa de rendimientos negativos donde la producción realmente disminuye. Sin embargo, si el concepto de rendimientos de escala es utilizado para permitir cambios en la capacidad técnica de la firma, y su tamaño aumenta, las empresas pueden ser (y ciertamente lo son) capaces de aplicar todas sus herramientas y nuevas tecnologías para expandir su escala de operaciones sin encontrar nunca el punto de rendimientos decrecientes.

Las empresas con un prolongado período de rendimientos constantes son las más observadas en los casos reales de plantas productoras de alimentos y plantas pesqueras (Zugarramurdi y Parin, 1998).

2.4. Economías de escala y economías de tamaño

Los conceptos de economías de escala y economías de tamaño describen lo que pasa a la producción o a los costos cuando el tamaño de la empresa se incrementa. Las economías de escala describen cuanto se incrementa la producción cuando la empresa incrementa su escala de producción; es decir, cuando se incrementan tanto los insumos fijos como los variables. Por un factor de proporcionalidad común. Las economías de tamaño describen lo que pasa al costo por unidad de producto cuando la producción se incrementa en la forma de minimización de costos.

Los conceptos de economías de escala y de tamaño están muy relacionados y muchos autores no distinguen entre ambas. Es importante distinguir entre ambos conceptos porque economías de escala es un término técnico que describe las propiedades de la función de producción. En cambio, el concepto de economías de tamaño es un término económico que describe el comportamiento de la función de costos de largo plazo.

2.5. Economías de tamaño

Las posibilidades que tiene la empresa para variar su producción en el largo plazo pueden ser descritas con varias curvas de costo como se muestra en la Figura 2.

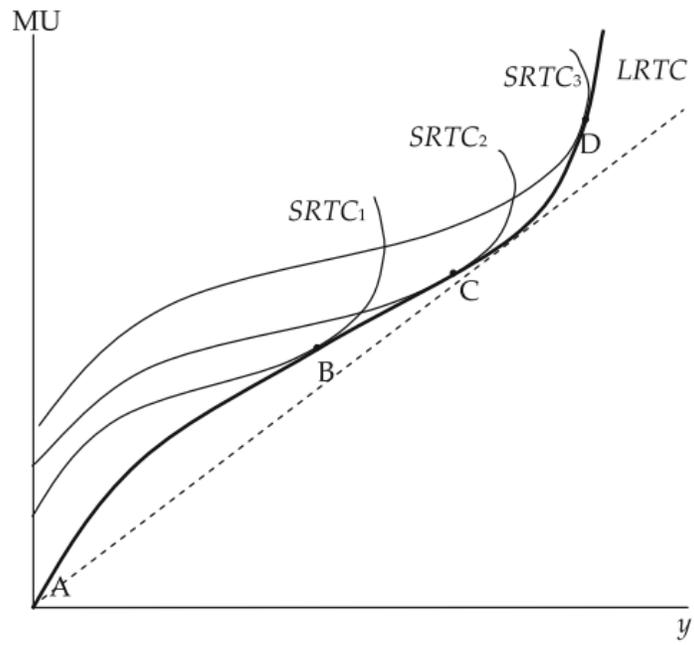
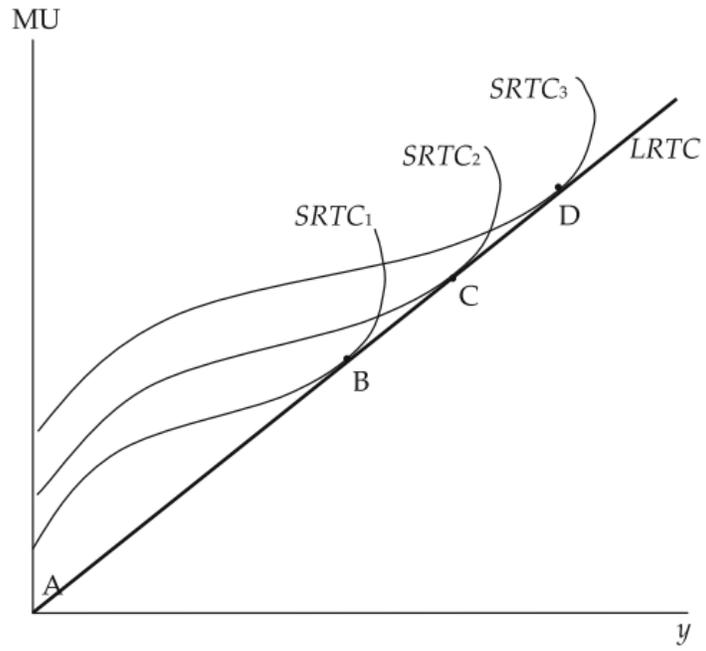


Figura 2. Deducción de las curvas de costo de largo plazo (1)

Fuente: adaptado de Rasmusen (2011).

En la figura solo se muestran tres curvas de costo de corto plazo, correspondientes a tres diferentes tamaños de plantas. Estas curvas son referidas como *SRTC* para denotar que se refieren a las curvas de costo total de corto plazo².

La empresa en el largo plazo puede tener cualquier tamaño, por lo que cualquier tamaño de planta podría ser elegido, por lo que la curva de largo plazo de costo total podría ser dibujada como la curva envolvente para todas las curvas posibles de costo total de corto plazo. En el panel superior de la Figura 3 tal curva corresponde a la curva resaltada en negro y como se ve tal línea representa una tecnología que en largo plazo se incrementa linealmente. En la parte inferior del panel muestra una curva para la cual los costos de largo plazo están incrementándose de forma regresivamente (hasta después del punto C) y entonces se incrementan progresivamente.

² En las gráficas se conservan las iniciales para las curvas de costo y algunos conceptos más. El Costo Total de Corto Plazo se identifica como Short Run Total Cost (*SRTC*), el Costo Total de Largo Plazo como Long Run Total Cost (*LRTC*), el Costo Marginal de Largo Plazo como Long Run Marginal Cost (*LRMC*), el Costo Medio de Largo Plazo como Long Run Average Cost (*LRAC*).

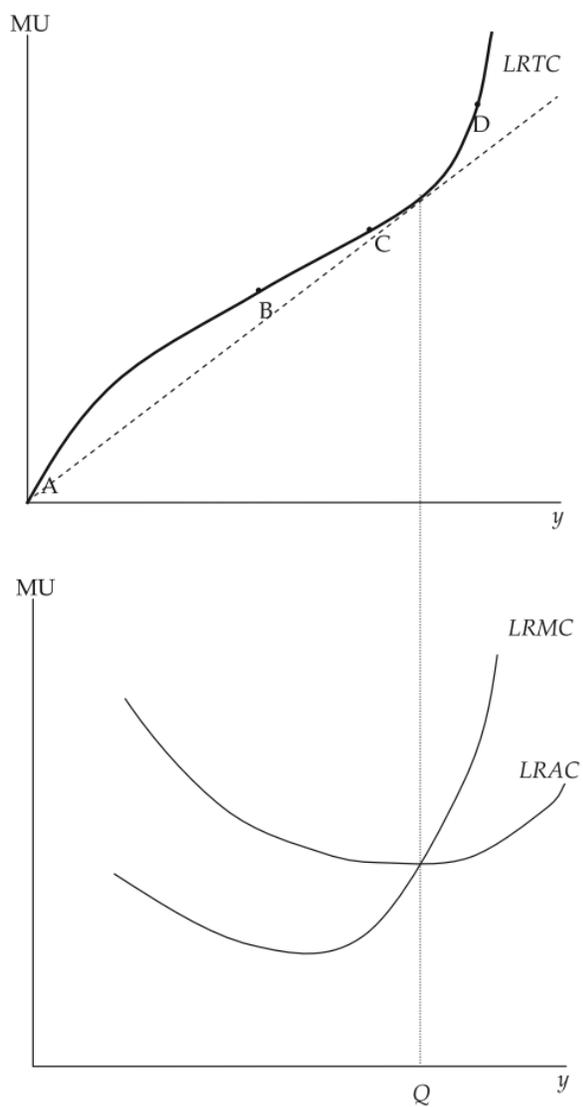


Figura 3. Dedución de las curvas de costo de largo plazo (2)

Fuente: adaptado de Rasmusen (2011).

En el panel superior de la Figura 3 se repiten las *LRTC* de la figura anterior. En la parte inferior de esta última figura se dibujan las curvas de largo plazo del costo promedio (*LRAC*) y del costo marginal de largo plazo (*LRMC*). Como se puede ver, el mínimo del costo promedio de largo plazo se encuentra en una producción de Q unidades.

De esta manera las economías de escala se definen en tanto el costo promedio de largo plazo (*LRAC*) está decreciendo (a la izquierda del punto Q). De manera análoga, las deseconomías de tamaño son definidas en tanto la curva de costo promedio de largo plazo (*LRAC*) está incrementándose (a la derecha del punto Q).

De esta manera, el término economía de tamaño es usado para describir una situación en la cual el costo total por unidad de producto disminuye cuando una firma expande su producción. El término deseconomía de tamaño es usada para describir una situación en la cual el costo total por unidad de producto se incrementa cuando la firma expande su producción.

2.6. Economías de escala

Contrario al concepto de economías de tamaño, el concepto de economías de escala es un término puramente técnico. El término de economías de escala se refiere a lo que pasa a la cantidad de producto si todos los insumos se incrementan proporcionalmente. De esta forma, si el producto se incrementa más que los insumos, entonces existen rendimientos crecientes a escala. Si el producto se incrementa menos que los insumos, entonces hay rendimientos decrecientes a escala y si la producción se incrementa en la misma proporción que los insumos entonces se está en presencia de rendimientos constantes a escala. Este hecho es una propiedad de la función de producción no un término económico como tal (Debertin, 2002).

2.7. Funciones de producción homogéneas

De acuerdo con Debertin (2002, p. 174), el término economía de escala o deseconomía de escala puede ser confuso al manejarse. Por esta razón algunos economistas definen el término con referencia a una clase particular de funciones, conocidas como funciones de producción homogéneas. Se dice que una función de producción es homogénea de grado n si cuando cada insumo se multiplica por cualquier número t , el producto se incrementa por

el factor t^n . Si se asume que el periodo de tiempo es suficientemente largo para que todos los insumos pueden ser tratados como variables y ser incluidos en la función de producción entonces el exponente n , el grado de homogeneidad se refiere a los retornos a escala (Nicholson, 2007).

Se dice que una función homogénea de grado 1 tiene retornos constantes a escala y no tener ni economía de escala ni una diseconomía de escala. Por otro lado, una función homogénea de un grado mayor que 1 es una función con retornos crecientes a escala o lo que es lo mismo una función con economías de escala. Una función homogénea de grado menor que la unidad tiene retornos decrecientes a escala y se dice que tiene diseconomías a escala (Debertin, 2002; p. 161).

Mientras hay varios tipos de funciones de producción, solo cierta clase de funciones de producción son homogéneas. En general, las funciones homogéneas son multiplicativas más que aditivas, aunque existen ciertas excepciones.

2.8. La escala de producción

De acuerdo con Rasmussen (2011) la escala de producción identifica el punto sobre la función de producción donde la producción tiene lugar. El punto esencial en este contexto es si la producción tiene lugar en el área de la función de producción donde hay retornos crecientes a escala, retornos decrecientes a escala o retornos constantes a escala. Estos conceptos se ilustran en la Figura 4.

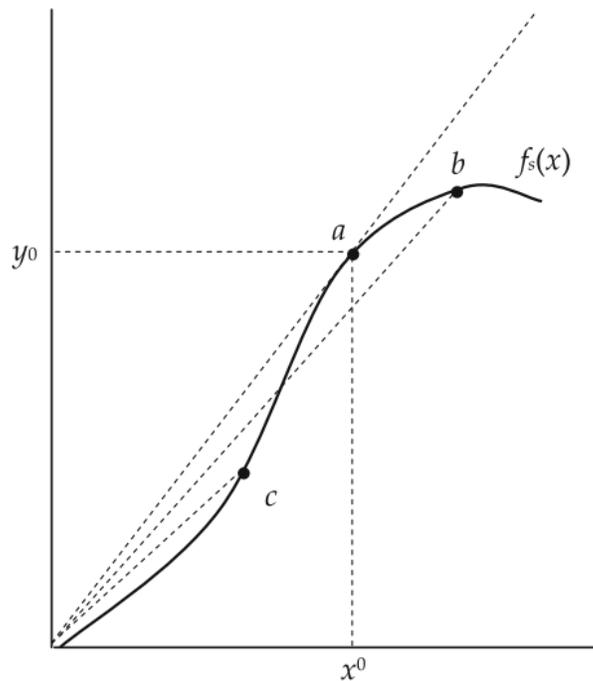


Figura 4, Escalas de producción de una función cúbica
 Fuente: Adaptada de Rasmusen (2011).

En el punto c se tienen retornos crecientes a escala, cuando la elasticidad de producción es mayor que la unidad. Está elasticidad es calculada como

$$\varepsilon = \frac{\frac{\partial y}{\partial x} x}{y} = \frac{\frac{\partial y}{\partial x} x}{\frac{\partial y}{\partial x} y} = \frac{MPP}{APP}$$

y la pendiente de la función de producción (MPP) alrededor del punto c es más grande que la pendiente de la línea que parte del origen (APP) en un ángulo de 45 grados. Los retornos a escala alrededor del punto b son, por otro lado, decrecientes cuando la pendiente de la curva (MPP) en ese punto es menor que la pendiente de la línea que parte del origen (APP). Finalmente, los retornos a escala alrededor del punto a son constantes e igual a la unidad cuando MPP y APP son iguales (Nicholson, 2007).

2.9. La eficiencia de escala en el análisis envolvente de datos

En un modelo de retornos constantes a escala, y en algún grado en los modelos de retornos decrecientes a escala y retornos crecientes a escala, se asume que las propiedades de los retornos a escala son fijos. Esto no es el caso para el modelo de retornos variables a escala y por lo tanto es de interés el desear conocer qué pasa si se reescala ligeramente una firma.

Una posibilidad es que los insumos y los productos serán escalados al alza (o a la baja) en la misma proporción. Esto corresponde a retornos constantes a escala locales. Otra posibilidad es que la firma se reescale hacia arriba ligeramente pero no hacia abajo basado en retornos a escala locales. La última posibilidad es que se puede reescalar la firma ligeramente hacia arriba pero no hacia abajo; es decir podría haber retornos crecientes a escala locales.

En un modelo de retornos variables a escala con un producto único y un insumo único, es fácil ver que, si hay movimiento a lo largo de la frontera desde las cantidades más pequeñas de insumos hasta las más grandes, los retornos a escala entonces primero son crecientes, entonces constantes y finalmente decrecientes. Geométricamente esto significa que desde una línea desde el origen (0,0) a un punto en la frontera tiene una pendiente que primero se incrementa, luego se estanca y finalmente decrece. En términos económicos esto significa que el producto medio, es decir el número de productos por unidad de insumo, primero se incrementa, luego es constante y finalmente cae. Al nivel de insumos en el cual se tienen retornos constantes a escala se la llama el tamaño de escala más productivo (Most Productive Scale Size, MPSS). En el tamaño de escala más productivo, producto medio es máximo y en un modelo de costo de un solo insumo, el costo promedio es mínimo. Si fuera posible, todas empresas deberían operar en este punto.

En el caso de múltiples productos y múltiples productos, se tiene un patrón similar en tanto se atravesase la frontera eficiente en una dirección dada en el espacio insumo – producto, es decir, cuando se tiene el punto $(tx, F(tx, y)y)$ cuando t se incrementa.

Ahora, para medir la pérdida de no operar en el tamaño de escala óptimo, se utiliza la noción de *eficiencia de escala* (Scale Efficiency, SE). Esto medida se calcula como el cociente de la eficiencia del insumo en un modelo de retornos constantes a escala entre la eficiencia del insumo en un modelo de retornos variables a escala. Es decir:

$$SE(x^0, y^0) = \frac{E(x^0, y^0; crs)}{E(x^0, y^0; vrs)}$$

Se puede ver que esta medida nunca es más grande que 1 y que es precisamente 1 cuando las tecnologías con VRS (Variable Return of Sacale) y CRS (Constant Return, Scale)

coinciden; es decir, cuando las firmas están operando en el tamaño de escala óptimo. Entre más pequeño el valor de la eficiencia de escala, mayor es la pérdida de no tener el más alto producto medio que se tendría en el tamaño de escala más productivo (Nicholson, 2007).

Para un mejor entendimiento de la eficiencia de escala SE, se puede escribir la definición anterior como:

$$E(x^0, y^0; crs) = E(x^0, y^0; vrs) * SE(x^0, y^0)$$

Esto quiere decir que la eficiencia (relacionada a una tecnología de CRS) se puede descomponer en dos componentes: 1) eficiencia técnica (pura) midiendo la habilidad para usar las mejores prácticas en la tecnología de VRS y en 2) la eficiencia de escala midiendo la habilidad para operar donde la dotación de productos medios por la dotación de insumos es máxima. Gráficamente esta situación se puede ver en la Figura 5.

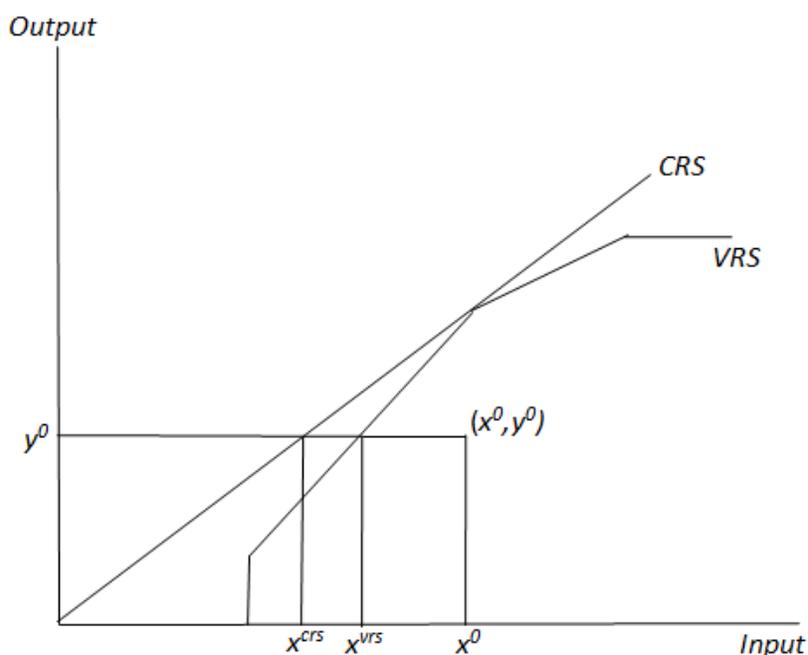


Figura 5. Eficiencia de escala con Retornos Variables a Escala

Fuente: elaborado en base a Rasmusen (2011).

De la gráfica es posible ver que el tamaño de la SE puede ser calculada al comparar los insumos necesarios sobre la frontera eficiente con VRS y los insumos necesarios sobre la frontera con CRS. También se puede ver que el tamaño de la SE puede ser calculada

comparando los insumos necesarios sobre la frontera eficiente con VRS y los insumos necesarios sobre la frontera con CRS, de la siguiente manera (Nicholson, 2007):

$$E(x^0, y^0; crs) = \frac{\|x^{crs}\|}{\|x^0\|} = \frac{\|x^{crs}\| \|x^{vrs}\|}{\|x^{vrs}\| \|x^0\|} = SE(x^0, y^0) \bullet E(x^0, y^0; vrs)$$

La eficiencia de escala expresa que tan cerca está la firma a su tamaño óptimo de escala: entre más grande la SE , más cerca está la firma a su escala óptima. Esta es información de interés porque ello indica las probables ganancias de ajustar la escala de la firma. Desafortunadamente, ello no informa hasta qué grado una eficiencia de escala menor que 1 es debido a que la firma sea demasiado pequeña o demasiado grande. Sin embargo, esto es fácil determinar al calcular también la eficiencia bajo rendimientos decrecientes a escala. Entonces, si $E(x^0, y^0; drs) = E(x^0, y^0; crs)$, la firma está abajo el tamaño de escala óptimo porque aquí los rendimientos a escala decrecientes y los rendimientos constantes a escala coinciden. Alternativamente, si $E(x^0, y^0; drs) = E(x^0, y^0; vrs)$, la firma está arriba de su tamaño de escala óptimo. Esta prueba también puede arreglarse en diferentes formas. Si esté es 0, la firma está sobre o arriba el tamaño de escala óptimo y si ello es igual a 0 la firma está sobre o abajo el tamaño de escala óptimo. Un enfoque alternativo es mirar a $\sum_k \lambda^k$, Si esta suma es menor que 1, la firma está debajo de su tamaño de escala óptimo, y si está arriba de 1, la firma está arriba el tamaño de escala óptimo.

La idea de analizar la eficiencia de escala es atractiva porque provee una medida que lo que podría ser ganado al ajustar el tamaño de la firma. En una firma esto podría delinear el proceso de planeación estratégica y ayudar a las firmas decidir si elegir una estrategia de expansión o de contracción. Para un regulador o investigador, ello puede indicar la eficiencia estructural de la industria, es decir, hasta qué grado se tiene el número correcto de firmas del tamaño correcto.

No obstante, deben tenerse en cuenta algunas consideraciones. Primero, la idea de ajustar el tamaño de escala puede no trabajar en la realidad porque los mercados no son competitivos y algunas firmas podrían por razones naturales ser incapaz de cambiar su escala de operación: por ejemplo, si ellas dan servicio a un área aislada geográficamente de tamaño sub-óptimo. Segundo, el tamaño de escala óptimo depende de la exacta

dirección en el espacio insumo-producto. Sin embargo, no es fácil derivar lineamientos simples sobre este tema. Por ejemplo, usualmente el tamaño óptimo de una granja no puede ser resumido en una medida simple como la cantidad de acres o el número de vacas puesto que ello varía con la exacta composición de insumos y productos. Una granja especializada en la producción de un cultivo podría necesitar ser de un tamaño que minimice su costo promedio, mientras una granja mixta con ganado y cultivos puede que deba ser de otro tamaño.

2.10. El concepto de eficiencia con la metodología del análisis envolvente de datos (DEA)

El concepto de eficiencia técnica, en el contexto del análisis envolvente de datos, empieza con la publicación por primera de un trabajo introduciendo tal metodología en el *European Journal of Operations Research* en Charnes, Cooper, and Rhodes en 1978 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*, 1994, pp. 1-3). El resultado de aquel trabajo fue la formulación del llamado modelo Charnes- Cooper-Rhodes (CCR) del DEA en forma de un cociente.

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). La Figura 7 es una adaptación de dicha figura de Charnes *et al* (1994).

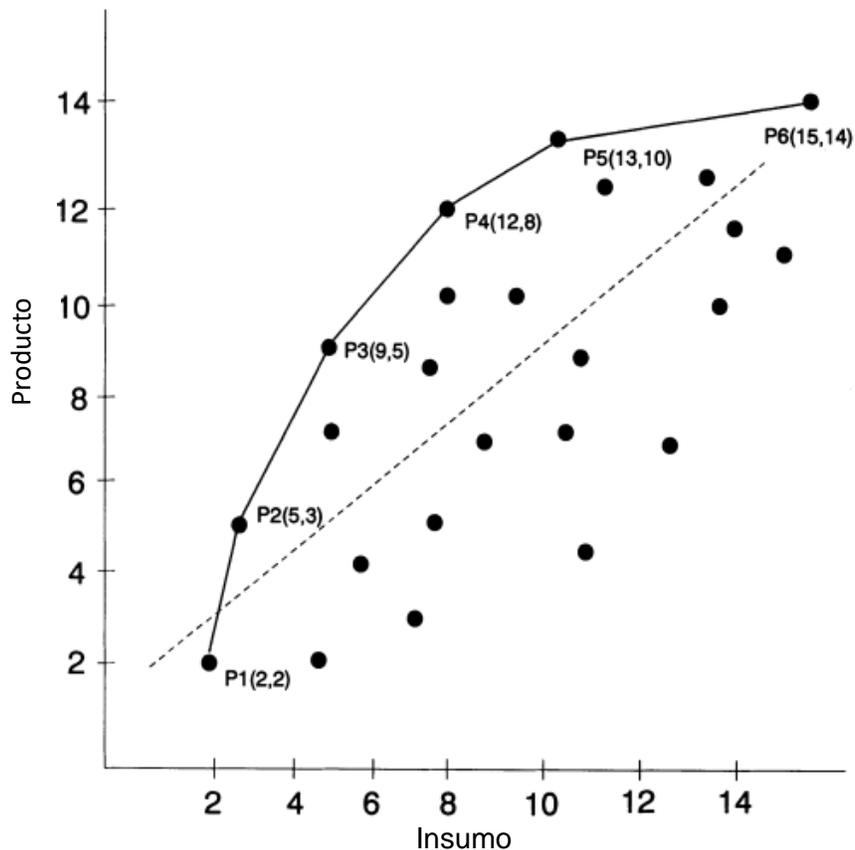


Figura 6. Comparación del DEA y la regresión

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 discretas (piecewise) determinada por el conjunto de las 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.

2.11. 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, la transcendental logarítmica (Translog) y la de elasticidad de sustitución constante. El procedimiento de estimación es análogo a la estimación por mínimos cuadrados excepto que el termino 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 utilizó 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 utilizado. Los dos modelos comúnmente utilizados son el llamado modelo CCR (Charnes, Cooper y Rodes, 1978) y el modelo BCC (Banker, Charnes y Cooper, 1984). 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 Farrel (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 una ratio de insumos ponderados entre insumos ponderadas, sujeto a que las 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 técnica de la firma k que usa k insumos para producir s productos; y además

| | | |
|----------|---|---|
| y_{rk} | = | cantidad de producto r producido por la firma k |
| x_{ik} | = | cantidad de insumo i consumido por la firma 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

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

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

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

Modelo CRS insumo orientado

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

Sujeto a

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

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

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

Utilizando 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

Ecuación dual

Maximize ϕ_k

Sujeto a

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

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

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

Modelo CRS insumo orientado

Ecuación dual

Minimize θ_k

Sujeto a

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

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

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

Capítulo III. Revisión de Literatura

Jaforullah y Whiteman (1999) buscan medir la eficiencia de escala de la industria lechera de Nueva Zelanda y examinar la relación entre el tamaño de la granja y la eficiencia técnica utilizando la metodóloga del análisis envolvente de datos. Este trabajo es extenso y se compone de ocho numerales. Para propósitos de la presente investigación se resaltan los incisos metodológicos principalmente.

En el numeral introductorio se resalta la tendencia de largo plazo del incremento en el tamaño de las granjas lecheras pues en 1980 el tamaño promedio era de 89 hectáreas, pero en 1995 de 107 hectáreas. Se argumentan varias razones económicas que explican tal tendencia en dicho país, así como la reconversión de granjas tradicionales a granjas de mayor tamaño explotando ovejas y bovinos. Los investigadores buscan también explicar si dicho incremento en el tamaño de las granjas mejora la eficiencia de producción de lácteos.

Jaforullah y Whiteman (1999) citan a Jaforullah and Devlin (1996) quienes persiguiendo el mismo objetivo utilizaron el enfoque paramétrico de la frontera estocástica. Destacan que dicha investigación no encontró una relación significativa entre tamaño de granja y eficiencia y que el enfoque de la frontera estocástica tiene fallas en manejar la naturaleza multiproducto de la industria lechera. Ante tal falla los investigadores intentan cumplir su objetivo utilizando el enfoque no paramétrico del análisis envolvente de datos, pues dicha metodología si permite manejar la naturaleza multiproducto de industrias como la lechera. Para dicho propósito usan la misma base de datos de Jaforullah and Devlin (1996).

En el segundo numeral del trabajo se explica el papel de la DEA como herramienta de evaluación comparativa (benchmarking), una detallada especificación de la metodología de la DEA para medir la eficiencia técnica y varios conceptos relacionados con esta categoría de análisis.

El procedimiento utilizado para medir la eficiencia productiva y la eficiencia de escala en la industria de lácteos es el de Farel *et al* (2018). Para obtener estimaciones separadas de eficiencia técnica y eficiencia de escala, se especifican las medidas de eficiencia técnica orientadas a los insumos que satisfacen tres tipos diferentes de comportamiento de escala y se aplican a los datos de las granjas lecheras de Nueva Zelanda.

Con el propósito de obtener estimados separados de la eficiencia técnica y eficiencia de escala, las medidas de la eficiencia técnica orientada los insumos deben satisfacer tres tipos diferentes de comportamiento de escala. Estos tres tipos de comportamiento son: retoños constantes a escala (CRS), retornos a escala no crecientes (NRS) y retornos variables a escala (VRS). Los tres ejercicios DEA de programación lineal se especifican en el artículo y cada ejercicio de programación lineal se debe resolver separadamente para cada granja lechera en la base de datos respectiva. El procedimiento metodológico se desarrolla a continuación.

Se supone que Y es una matriz ($M \times N$) de productos de las granjas lecheras de Nueva Zelanda con elementos representando el i -ésimo producto de la j -ésima granja lechera. Igualmente, sea X una ($P \times N$) matriz de insumos con elementos representando el k -ésimo insumo de la j -ésima granja lechera y z un vector ($N \times 1$) de pesos a ser definidos. El vector y^j es el vector ($M \times 1$) de productos y x^j es un vector ($P \times 1$) de insumos de la j -ésima granja lechera.

La medida orientada al insumo con CRS de la eficiencia técnica para la j -ésima granja lechera de Nueva Zelanda es calculada como la solución del siguiente problema de programación lineal:

$$\begin{aligned} \lambda_c^j &= \min_{\lambda, z} \lambda \\ \text{s.t.} \quad y^j &\leq Yz \\ Xz &\leq \lambda x^j \\ z &\in R_+^N \end{aligned}$$

El valor escalar λ representa una reducción proporcional en todos los insumos tal que $0 \leq \lambda \leq 1$, y λ_c^j es el valor mínimo de λ para que $\lambda_c^j \bullet x^j$ representa el vector de los insumos eficientes técnicamente para la j -ésima granja lechera.

La eficiencia técnica máxima se consigue cuando λ_c^j es igual a la unidad. En otras palabras, acuerdo a los resultados de la DEA, cuando λ_c^j es igual a la unidad, una granja esta

operando con la mejor practica y no puede, dado el conjunto de observaciones mejoras sobre este desempeño. Cuando λ_c^j es menor que la unidad, los resultados de la DEA implican que una granja esta operando debbajo de la frontera de las mejores prácticas y puede, dado el conjunto de observaciones existentes, mejorar la productividad de sus insumos al hacer una evaluación comparativa con otras granjas lecheras y emulando sus mejores prácticas de éstas.

La metodología de la DEA un conjunto de comparación o referencia con las mejores prácticas para cada granja j a partir del vector z y los valores de sus elementos son determinados cuando el anterior problema de programación lineal es resuelto. El i -ésimo elemnto z_i del vector z indica la contribución de la i -ésima granja al conjunto de referencia con las mejores prácticas de la granja j . La mayoría de los elementos del vector z son cero. Los elementos distintos de cero (es decir, los $z_i > 0$) muestran la composición del grupo de referencia con las mejores prácticas.

La medida resultante de la eficiencia técnica λ_c^j es usualmente llamada la medida global de la eficiencia técnica. Esto es porque el residual, la ineficiencia técnica global, incluye todas las fuentes de ineficiencias tanto las controlables como las no controlables. La estimación de la ineficiencia técnica global incluirá ineficiencias debido a el tamaño de la granja (escala), ineficiencia debido al pobre manejo de la granja, a la calidad de los suelos, genética animal, clima y otras variables no especificadas incluyendo los errores de medida. Con el propósito de separar las ineficiencias debidas al tamaño de la granja e identificar la escala óptima para las granjas lecheras se deben resolver otros dos ejercicios de DEA.

Los rendimientos no crecientes a escala de la eficiencia técnica para la j -ésima granja lechera de Nueva Zelanda se calculan como la solución al siguiente problema de programación matemática:

La eficiencia de escala en la industria lechera de Nueva Zelanda:

$$\begin{aligned} \lambda_n^j &= \min_{\lambda, z} \lambda \\ \text{s.t. } y^j &\leq Yz \\ Xz &\leq \lambda x^j \\ lz &\leq 1 \\ z &\in R_+^N \end{aligned}$$

donde l es un vector de unos ($1 \times N$).

Igualmente, la eficiencia técnica con retornos variables a escala para la j -ésima granja lechera de Nueva Zelanda se calcula como:

$$\begin{aligned} \lambda_v^j &= \min_{\lambda, z} \lambda \\ \text{s.t. } y^j &\leq Yz \\ Xz &\leq \lambda x^j \\ lz &= 1 \\ z &\in R_+^N \end{aligned}$$

Dados estos tres estimados de la eficiencia técnica, la medida de la eficiencia de escala orientada al insumo para la j -ésima granja es calculada como el cociente de la eficiencia técnica global con retornos variables y la eficiencia técnica de escala:

$$S^j = \frac{\lambda_c^j}{\lambda_v^j}$$

Si el valor de este ratio es igual a la unidad, entonces la granja lechera es eficiente en escala. Esto significa que la granja está operando en su tamaño óptimo y por lo tanto la productividad de los insumos no puede ser mejorada incrementando o disminuyendo el tamaño de la granja lechera.

Si el valor del ratio es menor que la unidad, $S^j < 1$, entonces los resultados de la DEA indican que la granja no está operando en su tamaño óptimo. Si $S^j < 1$ y $\lambda_c^j = \lambda_n^j$, entonces

los resultados de la DEA sugieren que la ineficiencia de escala es debida a los rendimientos crecientes a escala. Esto significa que, si se incrementa el tamaño de la granja lechera, el granjero puede mejorar la productividad de los insumos y por lo tanto reducir sus costos unitarios. $S^j < 1$ y $\lambda_c^j < \lambda_n^j$, los resultados de la DEA sugieren que la ineficiencia de escala es debida a los rendimientos decrecientes a escala,. Esto implica que la granja lechera es demasiado grande y que el granjero puede mejorar la productividad de los insumos y por lo tanto reducir los costos unitarios reduciendo el tamaño de la granja.

Si se arregla la ecuación $S^j = \frac{\lambda_c^j}{\lambda_v^j}$ se puede ver que la eficiencia técnica global es el producto de la eficiencia técnica con retornos variables a escala y la eficiencia de escala:

$$\lambda_c^j = \lambda_v^j \bullet S^j$$

λ_v^j es también llamada eficiencia técnica pura, es decir, la eficiencia técnica de la j -ésima granja lechera, libre de ineficiencias debido a la escala.

De la ecuación $\lambda_c^j = \lambda_v^j \bullet S^j$ es posible ver que hay dos fuentes de ineficiencias. La primera es la ineficiencia de escala $(1 - S^j)$. La segunda es la ineficiencia pura de escala $(1 - \lambda_v^j)$. En la ausencia de diferencias ambientales (es decir, diferencias en calidad del suelo, genética animal, clima y otras variables no especificadas) y errores en la medición de productos e insumos, la ineficiencia técnica pura La ineficiencia técnica pura reflejaría las desviaciones causadas por el manejo de las mejores prácticas agrícolas. La forma de eliminar esta última fuente de ineficiencia sería formar un grupo de referencia de las granjas con las mejores de mejores prácticas con el fin de identificar y luego emular sus prácticas de administración y manejo de granjas. Por lo tanto, el resultado de la DEA incluye las medidas de la eficiencia de escala de cada granja, eficiencia técnica pura, eficiencia técnica general e identificación de su punto de referencia de mejores prácticas. Este último identifica las posibles granjas de referencia junto con sus respectivas contribuciones a las mejores prácticas de referencia.

Los resultados promedio para las 264 granjas lecheras del estudio se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Eficiencia técnica y de escala de las granjas lecheras de Nueva Zelanda

| Indicador | Eficiencia técnica global (%) | Eficiencia de escala (%) | Eficiencia técnica pura (%) |
|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Promedio | 83 | 94 | 89 |
| Desviación estándar | 14 | 10 | 13 |
| Mínimo | 39 | 45 | 42 |
| No. de granjas eficientes | 50 | 50 | 104 |

Fuente: Jaforullah y Whiteman (1999).

El promedio de la eficiencia técnica global para las granjas de Nueva Zelanda se estimó en 83%. Como se mencionó, la eficiencia técnica global de una granja lechera es el producto de su eficiencia de escala y su eficiencia técnica pura. La eficiencia de escala estimada fue de 94% mientras la eficiencia técnica pura promedio. El nivel promedio de la ineficiencia técnica global para las granjas lecheras se estimó en 17%. Esto implica que las granjas lecheras pueden, en promedio, reducir sus insumos hasta por el 17% y operar en las escalas óptimas al eliminar las ineficiencias técnicas puras a través de la adopción de las mejores prácticas de las granjas lecheras eficientes. De esta manera, la ineficiencia técnica pura explica el 11% de la ineficiencia, la ineficiencia de escala el 6% de la ineficiencia técnica global de las granjas lecheras de Nueva Zelanda.

Tetteh *et al* (2016) hacen una evaluación de la eficiencia técnica y la eficiencia de escala de los productores de arroz de pequeña escala en el norte de Gana así como del efecto del tamaño de la granja sobre la eficiencia. Utilizando una muestra de 300 granjas agrícolas el estudio emplea el análisis envolvente de datos para medir la eficiencia. El artículo es también extenso y al igual que el anterior se destaca la metodología por revestir gran interés la investigación.

En el inciso de la introducción se destacan las características de los hogares agrícolas de los países en desarrollo como lo es Ghana como lo es la predominancia del cultivo de pequeñas áreas de tierra de 1.2 hectáreas en ese país, pero en dichas explotaciones produce el 80% de la producción total de alimentos, lo cual tiene implicaciones en el desempeño de las granjas agrícolas. No obstante, se precisa que un estimado del 10% de los pequeños hogares agrícolas que cultivan el arroz poseen una extensión de 0.4 hectáreas por lo que la producción de arroz en Ghana es una actividad de pequeña escala.

Tetteh *et al* (2016) señalan que, desde una perspectiva económica neoclásica, los agricultores pueden aprovechar la escala de producción para mejorar su eficiencia productiva y de escala. Sin embargo, una granja puede ser técnicamente eficiente pero no eficiente en escala. Esto significa que una granja puede utilizar la mejor práctica pero no aprovechar las economías de escala. El concepto de eficiencia de escala es, por lo tanto, importante en la agricultura a pequeña escala donde las granjas son generalmente pequeñas y puede existir la posibilidad de obtener ganancias de economías de escala.

En la parte metodológica se señala que el enfoque DEA genera una superficie envolvente de datos al vincular los puntos en el espacio insumo-producto salida de una manera que ya no permite la producción de más producto utilizando el mismo nivel de insumo o la producción del mismo producto utilizando menos insumos. La superficie de envoltura de datos sirve como punto de referencia para medir la eficiencia relativa del resto de empresas debajo de la superficie de envoltura. Todas las granjas eficientes en una muestra están unidas por un continuo para formar una frontera eficiente en la cual el puntaje de eficiencia para cada unidad de toma de decisiones se mide por lo lejos que se desvía de la frontera eficiente. La frontera en el caso de los rendimientos constantes a escala es lineal, mientras que para los rendimientos variables a escala es una envoltura por piezas convexa.

Es posible descomponer el análisis de eficiencia en tres dimensiones para comprender las posibles fuentes de ineficiencia. La primera dimensión se relaciona con la eficiencia técnica global, la segunda se relaciona con la eficiencia técnica pura, mientras que la tercera se relaciona con la eficiencia de escala. La estimación de la eficiencia técnica global implica medir la relación entre la distancia entre puntos ineficientes y la frontera eficiente de retornos a escala (CRS), mientras que la estimación de la eficiencia técnica pura implica medir la relación entre la distancia entre puntos ineficientes y la frontera eficiente bajo rendimientos variables a escala (VRS). La eficiencia de escala (SE) es la relación entre la eficiencia técnica global (OTE) y la eficiencia técnica pura (PTE). El estudio emplea la orientación al insumo en la estimación porque los productores tienen más control sobre los insumos que sobre la producción.

La formulación y solución del problema DEA se hace a través de la minimización de la función objetivo siguiendo a Coelli *et al* (2005). De esta manera Tetteh *et al* (2016) hace la

disposición del problema considerando que los datos cobren N granjas o unidades de tomas de decisiones (DMUs), K insumos y M productos. Las DMU individuales se representan por los vectores x_i y q_i , respectivamente. Para todas las DMU, X representa la matriz ($K \times N$) de insumos y Q la ($M \times N$) matriz de productos. Entonces la expresión de la formulación de la minimización y bajo el supuesto de retornos constantes a escala (CRS) de acuerdo a Coelli (2005) es:

$$\begin{aligned} \min_{(\theta, \lambda)} \quad & \theta \\ \text{s.t.} \quad & -q_i + Q\lambda \geq 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \\ & \theta x_i - X\lambda \geq 0 \\ & \lambda \geq 0 \end{aligned}$$

donde θ representa al puntaje (score) de la eficiencia para la i -ésima granja, q representa un vector columna de productos, Q es una matriz ($M \times N$) de productos, x es un vector columna de insumos, X es una ($K \times N$) matriz de insumos para todas las DMUs y λ es un vector ($N \times 1$) de constantes (coeficientes de ponderación). El valor de θ va de 0 a 1 donde 1 indica una DMU operando de manera eficiente técnicamente sobre la frontera eficiente. Valores de menores que 1 implican que la DMU está operando debajo de la frontera eficiente.

El planteamiento del problema de programación lineal con retornos variables a escala se realiza agregando la restricción de convexidad a la especificación de VRS como sigue:

$$\begin{aligned} \min_{(\theta, \lambda)} \quad & \theta \\ \text{s.t.} \quad & -q_i + Q\lambda \geq 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \\ & \theta x_i - X\lambda \geq 0 \\ & N1' \lambda = 1 \\ & \lambda \geq 0 \end{aligned}$$

donde $N1$ representa un vector de unos ($N \times 1$) y el resto de las variables mantienen sus definiciones previas.

La eficiencia de escala se deriva como sigue:

$$SE = \frac{CRS_{DEA}}{VRS_{DEA}}$$

donde CRS_{DEA} representa el puntaje obtenido del supuesto de CRS y VRS_{DEA} es el puntaje del modelo DEA con VRS.

Para determinar si una DMU está operando en un área de rendimientos a escala crecientes, decrecientes o constantes, se impone el supuesto de retornos a escala no crecientes (NIRS) como sigue:

$$\begin{aligned} \min_{(\theta, \lambda)} \quad & \theta \\ \text{s.t.} \quad & -q_i + Q\lambda \geq 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \\ & \theta x_i - X\lambda \geq 0 \\ & N1' \lambda \leq 1 \\ & \lambda \geq 0 \end{aligned}$$

Los resultados de la investigación indican que la eficiencia técnica de las granjas arroceras de Ghana fue de 46.6%, la eficiencia técnica pura de 65.1% y la eficiencia de escala de 69-5%. La mayoría de las granjas operaba con retornos crecientes a escala.

Campos y Oviedo (2015) destacan que la prevalencia de pequeñas unidades minifundistas es una característica estructural del campo mexicano y esto influencia el desarrollo del sector agrícola en el sentido de limitar la productividad y unidades de autoconsumo. El objetivo de la investigación es estudiar la relación entre el tamaño promedio de los lotes cañeros que abastecen a cada ingenio y su productividad (azúcar por hectárea). En el apartado de revisión de literatura de Campo y Oviedo (2015) se señala que el debate acerca del tamaño de los predios explotados y su productividad se remonta a varias décadas atrás. Se menciona que el trabajo de Sen (1962) es el trabajo seminal sobre el tema y es quien propone la relación inversa entre las granjas de la India y su productividad. De acuerdo con Sen (1962) dicha relación se debe al uso más intensivo de mano de obra en las granjas pequeñas, donde hay mayor disponibilidad de mano de obra de familiares. La hipótesis de la relación inversa tamaño de explotación-productividad y su causa ha estado sometida a intensa verificación empírica en Africa, America Latina y Africa. Dicha hipótesis ha encontrado soporte empírico pues la evidencia muestra que los pequeños agricultores son más productivos, lo cual se explica por el uso intensivo de la tierra, mano de obra e imperfecciones de los mercados de la tierra, trabajo y seguro y crédito. No obstante, también otro grupo de investigadores refutan la hipótesis de Sen (1962). Se argumenta que la

relación inversa es causada por la omisión de variables en el modelo, por ejemplo, la fertilidad del suelo, de la tecnología, fertilizantes y otros insumos intensivos en capital.

Campos y Oviedo (2015) destacan el trabajo de Pérez-Zamorano (2007) realizado en el valle de Matamoros, Puebla. La principal hipótesis de este trabajo es que la atomización de las parcelas cañeras socaba la productividad debido a que limita: financiamiento de la compra de insumos, maquinaria, equipos, renovación de plantaciones, entre otros; la administración de recursos acuíferos; y la utilización eficiente de la mano de obra.

El principal resultado de Campos y Oviedo es el hallazgo de encontrar que la relación entre tamaño de predio explotado y la producción de azúcar por hectárea gráficamente tiene una forma de U y determinar el punto crítico a partir del cual la relación inversa pasa a ser una relación directa o positiva. Dicho valor corresponde al valor de un tamaño del predio de 8.3 hectáreas. Es decir, a partir de un tamaño de 8.3 hectáreas de un predio que explota caña de azúcar, tendremos que, a mayor tamaño de parcela, mayor cantidad de azúcar por hectárea.

Capítulo IV. Metodología

4.1. Localización de los ingenios azucareros en México

De acuerdo con el CONADESUCA (2017) en la zafra 2015/2016 la agroindustria de la caña de azúcar en México operó con 51 ingenios cañeros. La distribución por entidad federativa donde operaron se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. 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 | | San Miguel del Naranjo |
| 3 | | Pujilic | 29 | Tabasco | 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 (35.3%), Jalisco con 6 ingenios azucareros (11.8%) y San Luis Potosí con 4 ingenios azucareros (7.8%), Michoacán con tres ingenios (5.9%) y también Oaxaca con tres ingenios (5.9%). Estas cinco entidades agrupan al 66.7% de la agroindustria de la caña de azúcar en México.

4.2. Fuentes de información

Al igual para otras investigaciones, la principal fuente de información para alimentar los modelos de programación en los que está basado el método del análisis envolvente de datos ha sido el “Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México Zafra 2006-2007/2015-2016, publicado por el CONADESUCA en 2017. Este documento contiene abundante información de la caña de azúcar tanto en campo como en fábrica. También se utilizó la publicación de la Unión Nacional de Cañeros que forma parte de la Confederación Nacional de Propietarios Rurales (UNC, A. C. – CNPR, 2017) llamada “Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2007-2016”. La UNC (2017) es una de las dos organizaciones abastecedoras de materia prima para los ingenios azucareros y representa a los pequeños propietarios que cultivan la caña de azúcar. La otra organización que abastece a la agroindustria de la caña es la Unión Nacional de Productores de Caña de Azúcar. A. C. vinculada a la Confederación Nacional Campesina (UNPCA - CNC, A. C.).

El reporte estadístico del CONADESUCA (2017) representa la información oficial sobre el sector cañero, contiene una mayor cantidad de variables que la publicación de la UNC (2017); aunque esta última publicación incluye estadísticas de la azúcar refinada a granel en los mercados internacionales y en las centrales de abasto de México.

En la publicación del CONADESUCA (2017) se encuentran tabulados, históricos de 10 años, de los conceptos generales mostrados en el Cuadro 3.

| 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: elaborado en base a CONADESUCA (2017).

4.3. Variables utilizadas en el estudio

Las variables utilizadas para correr el modelo de programación lineal, calcular la eficiencia técnica de las unidades de toma de decisiones bajo retornos constantes a escala, retornos variables a escala y la eficiencia de escala se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Definición de las variables utilizadas

| Variable | Unidades | Tipo |
|-------------------------------|------------|--------|
| Azúcar producida por hectárea | Toneladas | Output |
| Cachaza | Toneladas | Output |
| Energía total consumida | Kw-h | Input |
| Vehículos de acarreo | Unidades | Input |
| Caña molida neta | Toneladas | Input |
| Cortadores | Jornaleros | Input |
| Frentes de corte | Unidades | Input |
| Tiempo de zafra perdido | Horas | Input |

Fuente: adaptado de CONADESUCA (2017).

4.4. Definición de las variables

La definición de las variables que se realiza a continuación es la descrita en CONADESUCA (2017). La definición se realiza para fines operativos y prácticos más que con fines teóricos pues cada variable puede ser motivo análisis en la ingeniería de la caña como en Rein (2012).

Azúcar producida por hectárea. Es el resultado de dividir el azúcar producida total base estándar entre las hectáreas de la superficie cosechada de caña.

Cachaza. Se obtiene por la destilación del jugo de la caña de azúcar. La cachaza es un material esponjoso, de color oscuro a negro y el principal residuo de la industria del azúcar de caña. El porcentaje de pérdidas en cachaza es el resultado de dividir las toneladas de pérdidas en cachaza entre las toneladas de caña molida bruta multiplicada por cien.

Energía total consumida. Esta es una variable no reportada directamente en las estadísticas del CONADESUCA (2017). No obstante, algunos ingenios azucareros queman petróleo, bagazo y otros compran energía eléctrica a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para generar la potencia necesaria para la molienda de caña. En los Anexos se presenta el procedimiento paso a paso para mostrar como obtener una variable unica que permite agregar bagazo, petroleo y electricidad en una sola variable en unidades comunes.

Vehículos de acarreo. Unidades utilizadas para transportar la caña cortada en campo a los patios del ingenio para ser molida. No se especifica tipo de unidades, potencias, capacidad, etc.

Caña molida neta. Volumen de caña que ingresa al ingenio para la producción de azúcar habiendo eliminado impurezas y materias extrañas.

Cortadores. Jornaleros que realizan el corte de la caña en la época de cosecha.

Frentes de corte. Grupo de jornaleros para realizar el corte de la caña de azúcar una vez que ha sido realizada la quema.

Tiempo de zafra perdido. El tiempo perdido total de las horas de zafra y es la sumatoria del tiempo perdido en fábrica, tiempo perdido por personal, tiempo perdido por días festivos, tiempo perdido en campo y el tiempo perdido por lluvias.

4.5. Formación de grupos de ingenios por cuartiles

En la estadística descriptiva las dos formas más comunes de analizar los conjuntos de datos es a través de las llamadas medidas de tendencia central (media, moda, mediana) y las medidas de dispersión (varianza, desviación estándar, rango). Una tercera forma de hacerlo es a través de las llamadas medidas de posición. Las medidas de posición dividen un conjunto de datos en grupos con el mismo número de individuos. Para calcular las medidas de posición es necesario que los datos estén ordenados de menor a mayor. Las medidas de posición relativa se llaman en general cuantiles y se pueden clasificar en cuatro: cuartiles, quintiles, deciles, percentiles. Los cuartiles son los tres valores de la variable de una distribución que la dividen en cuatro partes iguales, es decir, al 25%, 50% y 75%.

En éste trabajo para analizar la relación entre el tamaño de superficie cosechada de caña de azúcar y el rendimiento de caña por hectárea se utilizaron los cuartiles. Para calcular los límites de los cuartiles de la variable rendimientos se utilizó la función incorporada en MS Excel con dicho propósito.

Como paso previo al agrupamiento de los ingenios azucareros en los respectivos cuartiles se calculó la participación porcentual de la respectiva unidad de toma de decisiones en la superficie cosechada promedio total para el periodo 2007-2016. El rendimiento promedio

para cada ingenio de tomo como el promedio ponderado por la respectiva superficie de cada año. Posteriormente, los rendimientos las dos variables se ordenaron en forma descendente tomando como primer criterio la superficie cosechada.

4.6. Software utilizado en la estimación de los índices

Para la estimación de los índices de eficiencia técnica bajo retornos constantes a escala, retornos variables a escala y rendimientos no crecientes a escala se probaron varios software. Stata, en su versión 13, incorpora solo la metodología del análisis de frontera estocástica pero no el análisis envolvente de datos, aunque existen algunas aplicaciones desarrolladas como “complementos” de Stata desarrolladas por usuarios, pero presentan fallas o “bugs”. Se realizaron también corridas con el DEAP 2.1 de Coelli (1996). Este software proporciona varios índices de la eficiencia técnica bajo los dos tres tipos de supuestos, las DMU de referencia para cada una de las propias DMU, para las que se van realizando corridas según la cantidad de insumos y productos incluidos en el modelo. Se calcula también el índice de Malmquist que descompone la productividad total de los factores en el índice de cambio de la eficiencia técnica, el índice cambio del cambio tecnológico e innovación, el índice de cambio de la eficiencia de escala a la que operan las DMU, el índice de cambio en la eficiencia pura y el índice de cambio de la propia productividad total de los factores. El sufijo “cambio” denota el hecho de que el índice de Malmquist se calcula para conjuntos de datos de panel; es decir, de que los cálculos se hacen sobre cifras de año a año de cada una de las DMU. No obstante que el DEAP 2.1 es de gran ayuda para el análisis de la eficiencia utilizando el paradigma de la DEA, no proporciona en su salida una clasificación del tipo por lo tanto se optó por utilizar el CRAN-R que proporciona los tipos de rendimientos a escala de los ingenios.

Capítulo V. Resultados y discusión

En el presente capítulo se presentan los resultados del modelo DEA con datos de la zafra 2010/2011 para el cálculo de la eficiencia de escala y determinación de los retornos a escala de los ingenios de caña de azúcar. Los modelos se realizaron utilizando el software CRAN-R bajo su interfaz de RStudio y específicamente el paquete Benchmarking. El modelo incluyó finalmente dos productos y siete insumos. Se corrieron dos modelos necesarios para el cálculo de la eficiencia de escala. El primer modelo de análisis envolvente de datos (DEA) está orientado al insumo con el supuesto de retornos constantes a escala (CRS) y el segundo también está orientado al insumo, pero bajo el supuesto de retornos variables a escala (VRS). Al respecto es importante mencionar que las variables que finalmente se incluyeron en el modelo no se derivan directamente de la caña de azúcar como tal. Por ejemplo, se realizaron corridas incluyendo la sacarosa en caña, brix en jugo mezclado, el Karbe neto teórico, entre otras. La consecuencia de ello fue que los índices de eficiencia técnica igual a la unidad o muy cercanos a ella lo cual causa problemas en la interpretación de los índices. Esta situación no se observó o no fue evidente al incluir las seis variables incluidas como insumos (inputs) y los dos productos (outputs). Sin embargo, antes de presentar el análisis de los resultados formales de la investigación se hace un análisis preliminar sobre el tamaño de la superficie cosechada promedio de caña por ingenios azucarero en un periodo de 10 años (2007-2016) para tener idea de la escala de operación de los ingenios en campo.

5.1. Relación tamaño de superficie y productividad

Una de las formas más comunes de estudiar productividad en los procesos productivos es analizar la relación entre el tamaño de los predios explotados y los rendimientos por unidad de superficie. En el presente estudio se analizó de forma exploratoria y descriptiva el vínculo entre tamaño de la superficie cosechada de caña de azúcar bruta y el rendimiento asociado. En la Figura 5 se muestra la relación entre estas dos variables.

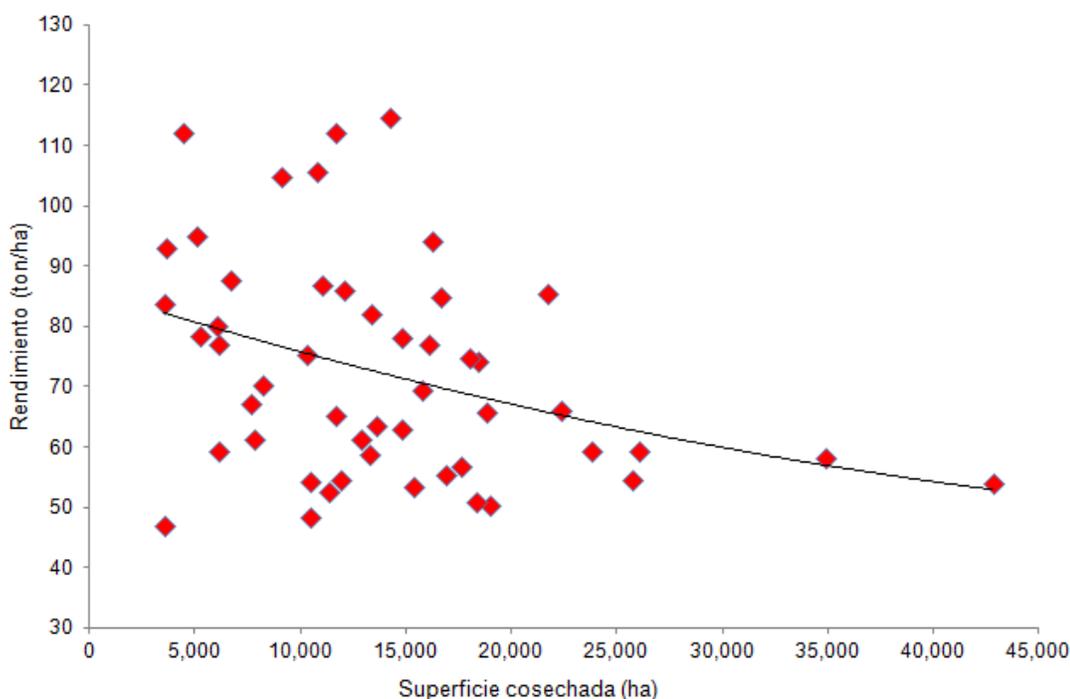


Figura 7. Relación tamaño de superficie y rendimiento de caña

Fuente: elaboración propia.

Al observar la relación entre rendimiento y tamaño de la superficie cosechada parece existir una relación inversa entre ambas variables. Esta es una regularidad encontrada en los estudios empíricos; es decir, a mayor extensión de superficie menor rendimiento de caña de azúcar.

5.2. Agrupamiento de ingenios por cuartiles

Para realizar el análisis de la relación tamaño de área cosechada de caña de azúcar y el rendimiento de esta gramínea, las unidades de toma de decisiones se agruparon por cuartiles. Tomando como criterio el rendimiento de caña por hectárea se clasificaron como se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Límites de los cuartiles por rendimiento de caña

| Cuartil | Límite inferior (ton/ha) | Límite superior (ton/ha) |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|
| I | 0 | < 58.5 |
| II | > 58.50 | ≤ 68.35 |
| III | > 68.35 | ≤ 84.75 |
| IV | > 84.75 | ≤ 114.80 |

Fuente: elaboración propia en base a (Watkins *et al*).

De esta manera, el Cuartil I corresponde al grupo de ingenios con más bajos rendimientos de caña de azúcar por hectárea y el Cuartil IV el grupo de ingenios con el más alto rendimiento.

En el caso del límite superior del cuartil I la leyenda “*No aplica*” significa que como el grupo corresponde a aquel en que los ingenios tienen un rendimiento exclusivamente menor de 58.50 toneladas por hectárea por lo que no tienen un límite superior.

5.2.1. Grupo 1 de ingenios

En el Cuadro 6 se muestra el primer cuartil que agrupó a 13 ingenios azucareros. En dicho grupo se muestra también la superficie cosechada promedio de caña de azúcar del año 2007-2016 y el porcentaje que dicha superficie respecto a la superficie total promedio que fue de 697,045 hectáreas.

Cuadro 6. Relación tamaño de explotación y productividad (Cuartil I)

| Ingenio | Superficie (ha) | Rendimiento (ton/ha) | Superficie (%) |
|--------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------|
| San Cristóbal | 42,842 | 54.2 | 6.1 |
| Tres Valles | 34,900 | 58.4 | 5.0 |
| San Rafael de Pucté | 25,769 | 54.8 | 3.7 |
| Presidente Benito Juárez | 19,000 | 50.6 | 2.7 |
| Alianza Popular | 18,351 | 51.1 | 2.6 |
| Plan de San Luis | 17,610 | 56.9 | 2.5 |
| Plan de Ayala | 16,919 | 55.5 | 2.4 |
| La Margarita | 15,404 | 53.7 | 2.2 |
| Central Progreso | 11,906 | 54.8 | 1.7 |
| Cuatotolapam | 11,370 | 52.7 | 1.6 |
| La Joya | 10,506 | 48.5 | 1.5 |
| Santa Rosalía | 10,480 | 54.5 | 1.5 |
| Azsuremex | 3,586 | 47.1 | 0.5 |

Fuente: elaboración propia.

En este grupo de ingenios se localizan los dos ingenios que tienen la mayor superficie de caña cosecha, pero el más bajo rendimiento por unidad de superficie. Estos ingenios son San Cristóbal, que ocupa la mayor superficie cosechada en diez años (2007-2016) pero también el más bajo rendimiento con 54.3 toneladas por hectárea y el ingenio Tres Valles con el 5.0% de la superficie cultivada y un rendimiento de 58.4 toneladas por hectárea. Este hecho constata empíricamente la aseveración del inciso anterior de que a mayor tamaño de explotación menor rendimiento por unidad de superficie.

5.2.2. Grupo 2 de ingenios

En el Cuadro 7 se muestra el grupo de 12 ingenios que tiene un rendimiento entre 58.50 y 68.35 toneladas de caña por hectárea, que puede considerarse también un rendimiento bajo.

Cuadro 7. Relación tamaño de explotación y productividad (Cuartil II)

| Ingenio | Superficie (ha) | Rendimiento (ton/ha) | Superficie (%) |
|------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------|
| Adolfo López Mateos | 26,050 | 59.5 | 3.7 |
| San Miguel del Naranjo | 23,817 | 59.4 | 3.4 |
| El Potrero | 22,388 | 66.3 | 3.2 |
| Central Motzorongo | 18,828 | 65.9 | 2.7 |
| San Pedro | 14,811 | 63.2 | 2.1 |
| El Mante | 13,631 | 63.8 | 2.0 |
| Constancia | 13,243 | 58.8 | 1.9 |
| Central La Providencia | 12,850 | 61.4 | 1.8 |
| San Nicolás | 11,689 | 65.3 | 1.7 |
| San José de Abajo | 7,796 | 61.4 | 1.1 |
| El Carmen | 7,680 | 67.2 | 1.1 |
| El Refugio | 6,143 | 59.6 | 0.9 |

Fuente: elaboración propia.

En este grupo se encuentra también uno de los ingenios con una de las mayores superficies cultivadas, que es el ingenio Adolfo López Mateos con una superficie del 3.7% respecto de la superficie total cosechada y con un rendimiento de 59.5 toneladas por hectárea de caña.

5.2.3. Grupo 3 de ingenios

En el tercer cuartil se localizan también 13 ingenios cuya participación porcentual en la superficie total va siendo menor pero también los rendimientos son más altos. Esto se puede observar en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Relación tamaño de explotación y productividad (Cuartil III)

| Ingenio | Superficie (ha) | Rendimiento (ton/ha) | Superficie (%) |
|--------------------|--------------------|-------------------------|-------------------|
| Puga | 18,395 | 74.4 | 2.6 |
| El Higo | 18,037 | 74.9 | 2.6 |
| Pánuco | 16,093 | 77.1 | 2.3 |
| Aarón Sáenz Garza | 15,762 | 69.5 | 2.3 |
| Quesería | 14,785 | 78.4 | 2.1 |
| Huixtla | 13,356 | 82.3 | 1.9 |
| El Molino | 10,292 | 75.5 | 1.5 |
| José María Morelos | 8,255 | 70.5 | 1.2 |
| San Miguelito | 6,120 | 77.3 | 0.9 |
| Bellavista | 6,031 | 80.2 | 0.9 |
| Mahuixtlán | 5,267 | 78.6 | 0.8 |
| Lázaro Cárdenas | 3,561 | 84.0 | 0.5 |

Fuente: elaboración propia.

Del Cuadro 8 es posible observar que el ingenio Lázaro Cárdenas tiene el rendimiento más alto del grupo y también el porcentaje más bajo de superficie (0.5%). El promedio nacional de rendimiento de caña por hectárea de ubica en éste cuartil con un rendimiento de 69.3 toneladas por hectárea.

5.2.4. Grupo 4 de ingenios

El cuarto grupo de plantas corresponde al grupo de ingenios con los más altos rendimientos y contiene también 13 ingenios azucareros (Cuadro 9).

Cuadro 9. Relación tamaño de explotación y productividad (Cuartil IV)

| Ingenio | Superficie (ha) | Rendimiento (ton/ha) | Superficie (%) |
|---------------------|--------------------|-------------------------|-------------------|
| Tala | 21,682 | 85.5 | 3.1 |
| La Gloria | 16,676 | 85 | 2.4 |
| Pujilic | 16,275 | 94.3 | 2.3 |
| Atencingo | 14,255 | 114.8 | 2.0 |
| San Francisco Ameca | 12,051 | 86.2 | 1.7 |
| Tamazula | 11,698 | 112.2 | 1.7 |
| El Modelo | 11,054 | 87 | 1.6 |
| Emiliano Zapata | 10,830 | 105.8 | 1.6 |
| Melchor Ocampo | 9,141 | 105.1 | 1.3 |
| Santa Clara | 6,727 | 87.7 | 1.0 |
| El Dorado | 5,059 | 95.2 | 0.7 |
| Central Casasano | 4,422 | 112.4 | 0.6 |
| Pedernales | 3,657 | 93.1 | 0.5 |

Fuente: elaboración propia.

En este cuadro es posible observar que algunos de los más altos rendimientos son obtenidos en ingenios como Central Casasano que ocupa el 0.5% de la superficie de caña cosecha en el periodo 2007-2016 pero un rendimiento de 112.4 toneladas por hectárea de caña de azúcar.

El hallazgo de esta relación inversa entre tamaño de la escala de operación y el rendimiento por unidad de superficie es una regularidad empírica verificada en, por ejemplo, Campos y Oviedo (2015). En su trabajo estudian la relación entre la extensión de las unidades de producción de caña de azúcar en México y sus rendimientos demuestran teórica y empíricamente, una asociación en forma de “U” entre estas dos variables. La Figura 5 muestra el tramo descendente de una “parábola que abre hacia arriba” por lo que estaría mostrando que en ese segmento se cumple la relación inversa entre tamaño de la superficie cosechada de caña de los ingenios y el rendimiento. Esta regularidad observada se verifica en los ingenios agrupados en los cuartiles I y IV.

5.3. Análisis de los resultados del análisis envolvente de datos

En este apartado se plasman los resultados obtenidos en la investigación utilizando el análisis de datos envolventes como ayuda para identificar la escala de operación de los ingenios azucareros y la naturaleza de sus rendimientos a escala.

5.4. Estadísticas descriptivas

Las estadísticas descriptivas de las variables utilizadas en la investigación para la zafra 2010/2011 se presentan en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Estadísticas descriptivas de las variables utilizadas

| Variable | Promedio | Valor máximo | Valor mínimo | Coefficiente de Variación (%) |
|-------------------------------|-------------|---------------|--------------|-------------------------------|
| Azúcar producida por hectárea | 97,465 | 228,998 | 10,482 | 57.5 |
| Cachaza | 112,029 | 290,372 | 15,458 | 68.6 |
| Energía total consumida | 496,066,300 | 1,181,558,548 | 87,691,047 | 54.3 |
| Vehículos de acarreo | 298 | 1,393 | 31 | 75.2 |
| Caña molida neta | 12,628 | 35,865 | 1,523 | 58.3 |
| Cortadores | 796,046 | 1,760,707 | 122,682 | 54.1 |
| Frentes de corte | 1,320 | 3,839 | 76 | 64.4 |
| Tiempo de zafra perdido | 3,427 | 5,616 | 1,087 | 25.3 |
| Azúcar producida por hectárea | 517 | 1,361 | 67 | 52.0 |

Fuente: elaborado a partir de CONADESUCA (2017).

El estadístico descriptivo de mayor interés es el coeficiente de variación. Este indicador expresa la desviación estándar como porcentaje respecto de la media representando la dispersión porcentual de los datos respecto éste indicador descriptivo y convencionalmente se dice que si el coeficiente de variación es menor de 20% significa que el promedio es representativo del conjunto de datos, por ende, el conjunto de datos es homogéneo. Por el contrario, si el coeficiente de variación de supera al 20%, el promedio no será representativo del conjunto de datos, por lo que resultará heterogéneo (Watkins *et al*, 2007; Moore, 2011).

De acuerdo a la definición anterior todas las variables utilizadas en la corrida de los modelos de programación lineal DEA presentan un coeficiente de variación mayor al 20%, es decir tienen una gran heterogeneidad, lo que hace que los promedios no sean representativos del conjunto de datos de la respectiva variable.

No obstante, el resultado obtenido a través del coeficiente de variación, dada la imposibilidad de implementar una encuesta probabilística para obtener información a nivel de productor cañero, la corrida de los modelos DEA utilizando la información de fuentes secundarias permitió obtener los resultados que se exponen en el resto del capítulo.

5.4. Eficiencia técnica bajo retornos constantes y retornos variables a escala

Una vez que se realizó un análisis exploratorio de los datos y analizando los estadísticos descriptivos para detectar observaciones que podrían distorsionar el análisis, se corrió el modelo DEA para el cálculo de la eficiencia técnica bajo el supuesto de retornos constantes a escala, el modelo DEA bajo el supuesto de retornos variables a escala utilizando el paquete Benchmarking (Bogetoft y Otto, 2011). Como se mencionó en el marco teórico y revisión de literatura, la eficiencia de escala se obtiene como el cociente de la eficiencia técnica (bajo el supuesto de retornos constantes a escala) sobre la eficiencia técnica bajo el supuesto de retornos variables a escala. La eficiencia técnica total, la eficiencia técnica pura, la eficiencia de escala y la naturaleza de los rendimientos a escala se presentan en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Eficiencia y retornos a escala de las DMU cañeras en la zafra 2010/11

| No. | Ingenio | Eficiencia | | | Naturaleza de los rendimientos a escala | |
|-----|--------------------------|------------|----------|-----------|---|--------------|
| | | Bajo CRS | Bajo VRS | De escala | | |
| 1 | Adolfo López Mateos | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 2 | Alianza Popular | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 3 | Atencingo | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 4 | Central Casasano | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 5 | Central Motzorongo | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 6 | El Higo | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 7 | El Molino | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 8 | El Potrero | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 9 | El Dorado | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 10 | Emiliano Zapata | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 11 | La Gloria | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 12 | Los Mochis | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 13 | Melchor Ocampo | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 14 | Nuevo San Francisco | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 15 | La Margarita | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 16 | Plan de San Luis | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 17 | Puga | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 18 | Pujilic | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 19 | San Cristóbal | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 20 | San Miguel del Naranjo | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 21 | Tala | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 22 | Tamazula | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 23 | Tres Valles | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | Constantes |
| 24 | Pánuco | 0.9675 | 0.9680 | 0.9995 | 0.9680 | Decrecientes |
| 25 | Quesería | 0.9208 | 0.9216 | 0.9991 | 0.9208 | Crecientes |
| 26 | Aarón Sáenz Garza | 0.9667 | 0.9690 | 0.9976 | 0.9667 | Crecientes |
| 27 | Plan De Ayala | 0.9735 | 0.9784 | 0.9950 | 0.9735 | Crecientes |
| 28 | San Nicolás | 0.8943 | 0.9008 | 0.9929 | 0.8943 | Crecientes |
| 29 | El Mante | 0.9328 | 0.9412 | 0.9911 | 0.9328 | Crecientes |
| 30 | Central Progreso | 0.9350 | 0.9449 | 0.9895 | 0.9350 | Crecientes |
| 31 | Constancia | 0.9082 | 0.9194 | 0.9878 | 0.9082 | Crecientes |
| 32 | San Rafael de Pucté | 0.9005 | 0.9117 | 0.9877 | 0.9005 | Crecientes |
| 33 | Central La Providencia | 0.9170 | 0.9433 | 0.9721 | 0.9170 | Crecientes |
| 34 | Presidente Benito Juárez | 0.8246 | 0.8486 | 0.9717 | 0.8246 | Crecientes |
| 35 | La Joya | 0.8975 | 0.9386 | 0.9562 | 0.8975 | Crecientes |

(continua...)

Cuadro 11. Eficiencia y retornos a escala de las DMU cañeras en la zafra 2010/11
(continuación...)

| No. | Ingenio | Eficiencia | | | Naturaleza de los rendimientos a escala | |
|-----|---------------------|------------|----------|-----------|---|--------------|
| | | Bajo CRS | Bajo VRS | De escala | | |
| 36 | El Modelo | 0.8971 | 0.9401 | 0.9543 | 0.8971 | Crecientes |
| 37 | San Francisco Ameca | 0.9523 | 1.0000 | 0.9523 | 0.9523 | Crecientes |
| 38 | Huixtla | 0.8319 | 0.8799 | 0.9455 | 0.8319 | Crecientes |
| 39 | Mahuixtlán | 0.9033 | 0.9558 | 0.9451 | 0.9033 | Crecientes |
| 40 | San José de Abajo | 0.8849 | 0.9379 | 0.9434 | 0.8849 | Crecientes |
| 41 | El Refugio | 0.9409 | 0.9989 | 0.9419 | 0.9409 | Crecientes |
| 42 | Santa Rosalía | 0.7868 | 0.8367 | 0.9404 | 0.7868 | Crecientes |
| 43 | José María Morelos | 0.9383 | 1.0000 | 0.9383 | 0.9383 | Crecientes |
| 44 | Cuatotolapam | 0.8211 | 0.8792 | 0.9339 | 0.8211 | Crecientes |
| 45 | Lázaro Cárdenas | 0.9336 | 1.0000 | 0.9336 | 0.9336 | Crecientes |
| 46 | San Pedro | 0.8436 | 0.9152 | 0.9218 | 0.8436 | Crecientes |
| 47 | Pedernales | 0.9129 | 1.0000 | 0.9129 | 0.9129 | Crecientes |
| 48 | Nacional | 0.9128 | 1.0000 | 0.9128 | 1.0000 | Decrecientes |
| 49 | San Miguelito | 0.8836 | 0.9684 | 0.9124 | 0.8836 | Crecientes |
| 50 | El Carmen | 0.8185 | 0.9062 | 0.9032 | 0.8185 | Crecientes |
| 51 | Bellavista | 0.8531 | 1.0000 | 0.8531 | 0.8531 | Crecientes |
| 52 | Santa Clara | 0.8384 | 1.0000 | 0.8384 | 0.8384 | Crecientes |
| 53 | Calipam | 0.8178 | 1.0000 | 0.8178 | 0.8178 | Crecientes |
| 54 | Azsuremex | 0.6482 | 1.0000 | 0.6482 | 0.6482 | Crecientes |

Nota: Los acrónimos CRS se refiere a rendimientos constantes a escala, VRS a rendimientos variables a escala y NIRS a rendimientos a escala no crecientes.

Fuente: elaborado a partir de las salidas de las corridas en el paquete Benchmarking CRAN-R (Bogetoft and Otto, 2011).

Al inspeccionar el Cuadro 11, resulta evidente que la eficiencia de escala es el cociente de la eficiencia técnica bajo rendimientos a escala y la eficiencia técnica bajo rendimientos variables a escala; por lo tanto, cuando estos dos índices son iguales, la eficiencia de escala será igual a la unidad y por lo tanto los rendimientos a escala con los que opera el ingenio son constantes. Los otros posibles resultados requieren de un análisis más detallado y se realiza a continuación.

Antes de proceder con el análisis es necesario mencionar que a la eficiencia obtenida bajo rendimientos constantes a escala se le llama eficiencia total, a la eficiencia obtenida bajo rendimientos variables a escala se le denomina eficiencia pura (Coelli *et al*, 1998; Coelli *et al*, 2005; Zhu, 2013).

5.5. Interpretación de los índices de eficiencia por grupo

En este numeral se presentan las agrupaciones de los ingenios azucareros según si están operando de forma óptima o con pérdidas provenientes de las economías de escala o de la eficiencia pura.

5.5.1. Ingenios operando en su escala óptima

En el Cuadro 12 se localizan los ingenios cuya eficiencia bajo retornos constantes a escala y bajo retornos variables son iguales a la unidad y por lo tanto también su eficiencia de escala es igual a la unidad.

Cuadro 12. Ingenios azucareros operando en la escala optima 2010/11

| Ingenio | Eficiencia | | |
|---------------------------|------------|----------|-----------|
| | Bajo CRS | Bajo VRS | De Escala |
| 1 Adolfo López Mateos | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 2 Alianza Popular | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 3 Atencingo | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 4 Central Casasano | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 5 Central Motzorongo | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 6 El Higo | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 7 El Molino | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 8 El Potrero | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 9 El Dorado | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 10 Emiliano Zapata | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 11 La Gloria | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 12 Los Mochis | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 13 Melchor Ocampo | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 14 Nuevo San Francisco | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 15 La Margarita | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 16 Plan de San Luis | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 17 Puga | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 18 Pujiltic | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 19 San Cristóbal | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 20 San Miguel del Naranjo | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 21 Tala | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 22 Tamazula | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 23 Tres Valles | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |

Fuente: elaboración propia.

El grupo de 23 ingenios cuya eficiencia total y eficiencia pura es igual a la unidad y por lo tanto su eficiencia de escala también es igual a la unidad, se dice que las UDM están

operando de manera óptima. Esto enunciado de otra forma queda como sigue: dado que el ingenio tiene una eficiencia pura igual a la unidad esto significa que los insumos utilizados en el proceso productivo como tierra, unidades de acarreo, cortadores, horas de zafra, energía utilizada para generar potencia de la molienda, etc., están siendo manejados y administrados con las mejores prácticas productivas. Lo anterior también implica que las unidades azucareras están trabajando en su escala óptima; es decir que su tamaño es el correcto y por lo tanto no hay ineficiencia de escala.

5.5.2. Ingenios operando con ineficiencia total e ineficiencia de escala

El segundo grupo de ingenios se encuentran aquellas unidades de toma de decisiones que operan con una eficiencia de escala menor que la unidad. Este grupo se ubican nueve ingenios azucareros como se muestra en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Ingenios azucareros operando con ineficiencia total y escala 2010/11

| Ingenio | Eficiencia | | |
|-----------------------|------------|----------|-----------|
| | Bajo CRS | Bajo VRS | De Escala |
| 1 San Francisco Ameca | 0.9523 | 1.000 | 0.9523 |
| 2 José María Morelos | 0.9383 | 1.000 | 0.9383 |
| 3 Lázaro Cárdenas | 0.9336 | 1.000 | 0.9336 |
| 4 Pedernales | 0.9129 | 1.000 | 0.9129 |
| 5 Nacional | 0.9128 | 1.000 | 0.9128 |
| 6 Bellavista | 0.8531 | 1.000 | 0.8531 |
| 7 Santa Clara | 0.8384 | 1.000 | 0.8384 |
| 8 Calipam | 0.8178 | 1.000 | 0.8178 |
| 9 Azsuremex | 0.6482 | 1.000 | 0.6482 |

Fuente: elaboración propia.

En este segundo grupo de ingenios, los indicadores de eficiencia muestran lo siguiente: la eficiencia pura indica que los recursos e insumos utilizados son manejados y administrados con las mejores prácticas productivas. La fuente de ineficiencia de estos ingenios es su tamaño. Por lo tanto, si dichas UDM ampliaran su escala mejorarían su eficiencia y productividad. Destaca en este caso el ingenio Azsuremex, cuya eficiencia de escala es baja, por lo que ampliando su escala de operación mejoraría su eficiencia hasta casi un 35%.

Es importante mencionar que como se observa en este grupo se localiza el llamado ingenio nacional. Este “ingenio” representa el agregado de todas las unidades que operaron en la

zafra 2010/2001. De esta manera se observa que la agroindustria de la caña de azúcar podría, en promedio, mejorar su eficiencia en aproximadamente 8.7% si ampliara su escala de operación.

5.5.3. Ingenios operando con ineficiencia total y pura e ineficiencia de escala

En un tercer grupo de ingenios se identifican aquellas unidades de toma de decisiones cuyas ineficiencias provienen tanto de un mal manejo de los recursos e insumos que intervienen en el eslabón de campo como del proceso de molienda en el eslabón de fábrica, así como de la ineficiencia de escala; es decir, a causa del tamaño del ingenio. En este grupo encontramos a 22 ingenios según se muestra en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Ingenios azucareros con ineficiencia pura y de escala 2010/11

| Ingenio | Eficiencia | | |
|----------------------------|------------|----------|-----------|
| | Bajo CRS | Bajo VRS | De Escala |
| 1 Santa Rosalía | 0.7868 | 0.8367 | 0.9404 |
| 2 Presidente Benito Juárez | 0.8246 | 0.8486 | 0.9717 |
| 3 Cuatotolapam | 0.8211 | 0.8792 | 0.9339 |
| 4 Huixtla | 0.8319 | 0.8799 | 0.9455 |
| 5 San Nicolás | 0.8943 | 0.9008 | 0.9929 |
| 6 El Carmen | 0.8185 | 0.9062 | 0.9032 |
| 7 San Rafael de Pucté | 0.9005 | 0.9117 | 0.9877 |
| 8 San Pedro | 0.8436 | 0.9152 | 0.9218 |
| 9 Constanza | 0.9082 | 0.9194 | 0.9878 |
| 10 Quesería | 0.9208 | 0.9216 | 0.9991 |
| 11 San José de Abajo | 0.8849 | 0.9379 | 0.9434 |
| 12 La Joya | 0.8975 | 0.9386 | 0.9562 |
| 13 El Modelo | 0.8971 | 0.9401 | 0.9543 |
| 14 El Mante | 0.9328 | 0.9412 | 0.9911 |
| 15 Central La Providencia | 0.9170 | 0.9433 | 0.9721 |
| 16 Central Progreso | 0.9350 | 0.9449 | 0.9895 |
| 17 Mahuixtlán | 0.9033 | 0.9558 | 0.9451 |
| 18 Pánuco | 0.9675 | 0.9680 | 0.9995 |
| 19 San Miguelito | 0.8836 | 0.9684 | 0.9124 |
| 20 Aarón Sáenz Garza | 0.9667 | 0.9690 | 0.9976 |
| 21 Plan de Ayala | 0.9735 | 0.9784 | 0.9950 |
| 22 El Refugio | 0.9409 | 0.9989 | 0.9419 |

Fuente: elaboración propia.

En este grupo de ingenios destaca el caso de Santa Rosalía, que si bien es un ingenio que ya dejó de operar en la zafra, refleja su situación en la zafra 2010/2011. La ineficiencia mayor de éste ingenio se originaba por el mal manejo y administración de los recursos

productivos e ingenios, su ineficiencia pura fue del 16% mientras que su ineficiencia de escala era del 6%. Situación muy parecida tuvieron en aquella zafra los ingenios Presidente Benito Juárez, Cuatotolapam, entre otros.

5.6. Identificación de la naturaleza de los rendimientos a escala por ingenio

En la identificación de la naturaleza de los rendimientos a escala que tiene cada planta de la agroindustria azucarera nacional juega un papel relevante los llamados retornos a escala no crecientes. Este concepto por sí mismo es motivo de estudios completos. No obstante, dado que los software lo calculan automáticamente es común que se utilice conjuntamente con la eficiencia pura (o bajo retornos variables a escala) y la eficiencia total (o bajo retornos constantes a escala) para identificar qué tipo de rendimientos a escala tienen en este caso las plantas de la agroindustria de caña de azúcar en México. A partir de tres reglas es posible identificar la naturaleza de los rendimientos a escala:

1. Cuando la eficiencia pura es igual a la eficiencia total y estas son igual a la eficiencia bajo NIRS el ingenio está operando bajo rendimientos constantes a escala.
2. Cuando la eficiencia total es igual a la eficiencia bajo NIRS el ingenio está operando bajo rendimientos crecientes a escala.
3. Cuando la eficiencia pura es igual a la eficiencia bajo NIRS el ingenio opera bajo rendimientos decrecientes a escala.

El primer caso es trivial y corresponde al primer grupo de 23 ingenios que operan en la escala óptima; es decir, la eficiencia total, la eficiencia pura y por lo tanto la eficiencia de escala son iguales. Este grupo ya no se incluye en este apartado.

En el segundo caso en el caso, se identificaron 29 ingenios con rendimientos a escala tal como se muestra en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Ingenios cañeros con rendimientos crecientes a escala 2010/11

| No. | Ingenio | Eficiencia | | | Tipo de rendimientos a escala |
|-----|----------|------------------|-----------------|-----------|-------------------------------|
| | | Bajo CRS (total) | Bajo VRS (pura) | Bajo NIRS | |
| 1 | Quesería | 0.9208 | 0.9216 | 0.9208 | Crecientes |

| | | | | | |
|----|--------------------------|--------|--------|--------|------------|
| 2 | Aarón Sáenz Garza | 0.9667 | 0.9690 | 0.9667 | Crecientes |
| 3 | Plan De Ayala | 0.9735 | 0.9784 | 0.9735 | Crecientes |
| 4 | San Nicolás | 0.8943 | 0.9008 | 0.8943 | Crecientes |
| 5 | El Mante | 0.9328 | 0.9412 | 0.9328 | Crecientes |
| 6 | Central Progreso | 0.9350 | 0.9449 | 0.9350 | Crecientes |
| 7 | Constancia | 0.9082 | 0.9194 | 0.9082 | Crecientes |
| 8 | San Rafael de Pucté | 0.9005 | 0.9117 | 0.9005 | Crecientes |
| 9 | Central La Providencia | 0.9170 | 0.9433 | 0.9170 | Crecientes |
| 10 | Presidente Benito Juárez | 0.8246 | 0.8486 | 0.8246 | Crecientes |
| 11 | La Joya | 0.8975 | 0.9386 | 0.8975 | Crecientes |
| 12 | El Modelo | 0.8971 | 0.9401 | 0.8971 | Crecientes |
| 13 | San Francisco Ameca | 0.9523 | 1.0000 | 0.9523 | Crecientes |
| 14 | Huixtla | 0.8319 | 0.8799 | 0.8319 | Crecientes |
| 15 | Mahuixtlán | 0.9033 | 0.9558 | 0.9033 | Crecientes |
| 16 | San José de Abajo | 0.8849 | 0.9379 | 0.8849 | Crecientes |
| 17 | El Refugio | 0.9409 | 0.9989 | 0.9409 | Crecientes |
| 18 | Santa Rosalía | 0.7868 | 0.8367 | 0.7868 | Crecientes |
| 19 | José María Morelos | 0.9383 | 1.0000 | 0.9383 | Crecientes |
| 20 | Cuatotolapam | 0.8211 | 0.8792 | 0.8211 | Crecientes |
| 21 | Lázaro Cárdenas | 0.9336 | 1.0000 | 0.9336 | Crecientes |
| 22 | San Pedro | 0.8436 | 0.9152 | 0.8436 | Crecientes |
| 23 | Pedernales | 0.9129 | 1.0000 | 0.9129 | Crecientes |
| 24 | San Miguelito | 0.8836 | 0.9684 | 0.8836 | Crecientes |
| 25 | El Carmen | 0.8185 | 0.9062 | 0.8185 | Crecientes |
| 26 | Bellavista | 0.8531 | 1.0000 | 0.8531 | Crecientes |
| 27 | Santa Clara | 0.8384 | 1.0000 | 0.8384 | Crecientes |
| 28 | Calipam | 0.8178 | 1.0000 | 0.8178 | Crecientes |
| 29 | Azuremex | 0.6482 | 1.0000 | 0.6482 | Crecientes |

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, en el tercer grupo que corresponde a los ingenios con rendimientos decrecientes a escala se ubican dos ingenios azucareros tal como se muestra en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Ingenios cañeros con rendimientos decrecientes a escala 2010/11

| No. | Ingenio | Eficiencia | | | Naturaleza de los rendimientos a escala |
|-----|----------|---------------------|--------------------|-----------|---|
| | | Bajo CRS (total) | Bajo VRS (pura) | Bajo NIRS | |
| 1 | Pánuco | 0.9675 | 0.9680 | 0.9680 | Decrecientes |
| 2 | Nacional | 0.9128 | 1.0000 | 1.0000 | Decrecientes |

Fuente: elaboración propia.

5.7. Discusión de resultados

Al comparar los resultados de la presente investigación con otros trabajos, es solo posible hacerlos con otros estudios que utilizan la misma metodología para otras agroindustrias. En la revisión que se hizo de otras investigaciones sobre caña de azúcar y la descomposición de su eficiencia total en pura y de escala no se localizó alguno. Existen algunos trabajos sobre caña, pero solo calculan la eficiencia total pero no se investiga si la fuente de ineficiencia son las malas prácticas y administración o la ineficiencia de la escala de operación de los ingenios. De esta manera, por ejemplo, Jaforullab and Whiteman (1999) empíricamente descompusieron la eficiencia total en eficiencia pura y de escala en la agroindustria lechera de Nueva Zelanda utilizando una muestra de 264 granjas lecheras. Los resultados mostraron que 19% de las granjas están operando en su escala óptima, 28% están arriba de su escala óptima y 57% estaban por abajo de su escala óptima. Un resultado relevante también es que el tamaño de las explotaciones lecheras con el paso del tiempo, aumentan su tamaño, pero decrece su número. Es decir, se están concentrando los recursos, la tierra fundamentalmente en menos unidades lecheras, por lo que amplían su tamaño. En el presente trabajo también se verificó que con el paso del tiempo también los ingenios azucareros han cerrado concentrándose en menos ingenios que tienden a ser más grandes, pero también se vuelven ineficientes. Es decir, a mayor tamaño más ineficientes en su productividad.

Capítulo VI. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

En la actualidad, la agroindustria de la caña de azúcar en México por impactar directamente 15 entidades federativas y 267 municipios, tener una alta participación en el valor de la producción agrícola total (6.5%) con solo el 3.7% de la superficie cosechada; muy por arriba, en términos relativos, de otros cultivos agroindustriales como la café cereza o básicos como el maíz grano.

En el periodo 1996 a 2015, o sea en 19 años, han dejado de operar 10 ingenios azucareros, pues en la zafra 1995/1996 operaron 61 de éstos, mientras que en la zafra 2017/2018 lo hicieron solo 51, lo que representa el 16.4% de las plantas que han conformado la agroindustria cañera, pues en promedio ha dejado de operar un ingenio cada dos años.

Aun cuando las causas del cierre o paro de las plantas de molienda de la caña de azúcar pueden ser de distinto carácter, el mero análisis de los parámetros técnicos de la productividad de la agroindustria cañera muestra que ésta ha tenido una serie de ineficiencias y atrasos tecnológicos que han repercutido en su rentabilidad y probablemente influido en el cierre del 16.4% de los ingenios existentes en un periodo de 19 años.

El análisis de la relación entre tamaño de la extensión de superficie cosechada de caña molida neta y el rendimiento de éste insumo muestra que hay una relación inversa entre estas dos variables pues a mayor escala de operación, menor productividad.

El análisis de los resultados utilizando el análisis de datos envolventes permitió identificar un grupo de 23 ingenios que realizan las mejores prácticas de manejo y administración de los recursos del proceso productivo de la caña de azúcar en campo y fábrica y trabajan con el tamaño óptimo de planta; es decir, no hay ineficiencias de escala. En este grupo de 23 ingenios que no tienen fuentes de ineficiencia dado que su eficiencia pura es igual a su eficiencia de escala, es decir ambas iguales a la unidad, tales unidades de toma de decisiones operan bajo rendimientos constantes a escala.

Se identificó también un segundo grupo de nueve ingenios los cuales operan con ineficiencia total, pero con eficiencia pura, por lo que su ineficiencia de escala proviene de la mala gestión de los recursos de que dispone, sino del tamaño con que opera.

Se identificó también un tercer grupo de 22 ingenios cuya ineficiencia proviene de la mala gestión o manejo de los recursos que poseen estas unidades de toma de decisiones, así como del tamaño con que operan.

Finalmente, se encontró que en la agroindustria nacional 23 ingenios operan con rendimientos constantes a escala, 29 con rendimientos crecientes a escala y dos ingenios que operan con rendimientos decrecientes a escala.

5.2. Recomendaciones

Es necesario analizar con mayor detenimiento que implicaciones tiene el hecho de la mitad de plantas de la agroindustria nacional de caña de azúcar operen con rendimientos crecientes a escala o que dos de ellos operen con rendimientos decrecientes a escala; pues su análisis permitirá hacer prescripciones de política fundamentadas.

Se debe profundizar en el conocimiento de la ingeniería de la caña de azúcar para determinar hasta qué grado las variables técnicas como la sacarosa en caña, bagazo obtenido, fibra en caña, miel final 85° Brix por tonelada de caña, entre otras, influyen en la eficiencia relativa de los ingenios azucareros además de las variables no derivadas directamente de la propia caña de azúcar, por ejemplo la cantidad de petróleo o electricidad consumidos en el proceso productivo o las variables de administración y manejo como vehículos de acarreo, etc.

Es necesario realizar un análisis exploratorio de la información existente en las fuentes oficiales de la caña de azúcar para probar la veracidad de las estadísticas reportadas como oficiales por el CONADESUCA.

Se recomienda obtener intervalos de confianza para los estimadores del índice de la productividad de los factores, así como prueba de hipótesis para probar la significancia

estadística de los mismos para lo cual se recomienda utilizar el método de remuestreo bootstrap (resampling bootstrap).

Aun cuando se encontró una relación inversa entre tamaño de la superficie de caña cosechada y el rendimiento por hectárea, este hallazgo requiere un análisis más profundo con herramientas econométricas para verificar su significancia estadística y probar hipótesis estadísticas para aceptar o rechazar su existencia y en su caso determinar si es meramente una relación carente de validez estadística.

Bibliografía

Albino, O., T., B., Cezar, B., A., Ramos, S., S. de F., Wagner, de O., M. and Matos, D., A. (2012). The producción efficiency in sugarcane farms. In Rajiv Banker, Ali Emrouznejad, Ana Lúcia Miranda Lopes and Mariana Rodrigues de Almeida Editors: *Data Envelopment Analysis: Theory and Applications*. Proceedings of the 10th International Conference on DEA, pp. 268 – 276, Brazil.

Banker, R. D. (1984). Estimating most productive scale size using data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research* 17: 35-44.

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.

Banker, R. D., Charnes, A., and Cooper, W.W. (1984). Models for the estimation of technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science* 30: 1078 – 1092.

Banker, R.D. (1984). Estimating most productive scale size using data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research* 17, 35-44.

Banker, R.D., Charnes, A., and Cooper, W.W. (1984). Models for the estimation of technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science* 30: 1078-1092.

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://centroazucar.uclv.edu.cu/media/articulos/PDF/2007/4/1.pdf>.

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.

Bogetoft P. and Otto, L. (2011). Benchmark and frontier analysis using DEA. Package Benchmarking. Disponible en <https://rdr.io/cran/Benchmarking/>. Consultado 22 de abril 2019.

Bogetoft, P. and Otto, L. (2011). Benchmarking with DEA, SFA, and R. International Series in Operations Research & Management Science Volume 157. New York: Springer

Campos, O. F. y Oviedo, P. M. (2015). Extensión de los predios agrícolas y productividad. El caso del campo cañero en México. *El Trimestre Económico*. Vol LXXX(1), No. 325: 147-181.

Caves, Douglas W.; Christensen, Laurits R. and Diewert, W. Erwin (1982a). Multilateral comparisons of output, Input, and productivity using superlative index numbers. *Economic Journal* 92(365), pp. 73-86.

Caves, Douglas W.; Christensen, Laurits R. and Diewert, W. Erwin (1982b). The economic theory of index numbers and the measurement of input, output, and productivity. *Econometrica* 50(6), pp. 1393-1414.

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.

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.

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.

Charnes, A., Cooper, W. W., Rhodes, E. (1978). Measuring the Efficiency of Decision Making Units. *European Journal of Operational Research* (1978), 2(6): 429-444.

Charnes, A., Cooper, W.W., and Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research* 2/6: 429-444.

Coelli, T. (1996). A guide to DEAP. Version 2.1: a data envelopment analysis (computer) program. Centre for Efficiency and Productivity Analysis, University of New England, Australia.

Coelli, T. J., Pradasa Rao, D. S. P., O'Donnell, C. J., and Battese, G. E. (2005). An Introduction to efficiency and productivity analysis. 2nd Ed., Springer: New York, NY, USA.

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.

CONADESUCA (2016). Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México Zafras 2008-2009/2014-2015. Ciudad de México, México.

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.

Devertin, D. (2002). Agricultural production economics. Second edition. University of Kentocky, Lexington, Kentucky, USA.

Fare, R. and Grosskopf, S. (2000). Theory and applicatrions of directional distance functions. *Journal of Productivity Analysis* 13: 93–103, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, USA.

Fare, R., Grosskopf, S. and Whittaker, G. (2018). Distance functions with applications to DEA. In Emili Grifell Tatjé, Knox Lovell and Robin C. Sicides (Eds), pp. 139 – 152, *The Oxford Handbook of Productivity Analysis*. Oxford University Press, NY, USA.

Farrell, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society, Series A* 120, pp. 253-81.

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, Swiis.

Jaforullah, M. and Devlin, N.J. (1996). Technical efficiency in the New Zealand dairy industry: a frontier production function approach. *New Zealand Economic Papers* Vol. 30: 1-17.

Jaforullah, M. and Whiteman, J. (1999). Scale efficiency in the New Zealand dairy industry: a non-parametric approach. *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 43 (4): 523-541.

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.

Malmquist, S. (1953). Index numbers and indifference curves. *Trabajos de Estadística* 4(1), pp. 209-42.

Molina, E. I. (2019). Iniciativa que reforma diversas disposiciones de la ley de desarrollo sustentable de la caña de azúcar, a cargo del Diputado Irineo Molina Espinoza, del Grupo Parlamentario de Morena. Disponible en Sistema de Información Legislativa de la Secretaría de Gobernación: <http://si1.gobernacion.gob.mx/portal>. Consultado 9 de julio de 2019.

Moore, D. S., McCabe, G. P., Alwan, L. C., Craig, B. A., Duckworth, W. M. (2011). *The practice of statistics for business and economics*. Third edition, W.H. Freeman and Company. New, York, NY, USA.

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.

Nicholson, W. (2007). *Teoría microeconómica. Principios básicos y ampliaciones*. Cengage Learning, novena edición, Madrid, España.

Pérez Zamorano, A. (2007). *Tenencia de la tierra e industria azucarera*. México, Editorial Porrúa.

Rasmussen, S. (2011). *The basic theory of production optimization*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Rein, Peter (2012). *Ingeniería de la caña de azúcar*. Editado por Verlag Dr. Albert Bartens KG – Berlin.

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.

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.

Sen, A. (1962). An Aspect of Indian Agriculture. *Economic Weekly* 14: 243-246.

Sengupta, A. K. (1999). A dynamic efficiency model using data envelopment analysis. *International Journal of Production Economics* 62: 2009 – 2018.

Shephard, R. W. (1970). Theory of cost and production function. Princeton: Princeton University Press.

Tetteh, A., B., Backman, S. and Rezitis, A. (). Does farm size matter? Investigating scale efficiency of peasant rice farmers in northern Ghana

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

Unión Nacional de Cañeros (UNC A. C.- CNPR) (1996). Estadísticas de la agroindustria de la caña de azúcar 1996 – 2004. México, D. F.

Watkins, A. E., Scheaffer, R. L. and Cobb, G. W. (2007). Statistics in action. Understanding a world of data. Key Curriculum Press, Emeryville, California, USA.

Zugarramurdi, A. y Parin, M. A. (1998). Ingeniería Económica Aplicada a la Industria Pesquera. Documento técnico de pesca 351 de la FAO, Roma, Italia.

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

Anexo 1. Estimación de la variable energía total consumida

En el proceso de molienda de la caña de azúcar las tres fuentes de energía para generar la potencia han sido el petróleo, la energía eléctrica adquirida a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la quema de biomasa de bagazo. La variable energía consumida es un insumo importante para la obtención de azúcar base estándar por hectárea o del azúcar total base estándar. Por lo que se hizo necesario agregar el petróleo (litros), energía eléctrica (Kw-h) y bagazo (toneladas) en la variable energía consumida total (Kw-h). El procedimiento para convertir la electricidad, petróleo y bagazo a kilowatts por hora y finalmente agregarlas es un proceso que implica la utilización de factores de conversión y equivalencias entre medidas de energía del Sistema Métrico Internacional. El procedimiento para la obtención de la variable a utilizar se explica a continuación. El propósito del ejemplo es mostrar cómo se convierte el petróleo, electricidad y bagazo a una unidad de energía única, por lo que los datos corresponden a la zafra 2006/07.

Energía eléctrica

Un kilowatt por hora (kW-h) equivale a 3,600,000 joules. Como primer paso se convierte la energía eléctrica adquirida por los ingenios azucareros a la CFE de kW-h a joules y posteriormente a megajoules. A modo de ejemplo, en la zafra 2006/07 la agroindustria nacional de caña de azúcar consumió 52,213,045 kW-h de energía eléctrica a la CFE. Los pasos para la conversión se muestran en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Conversión de energía eléctrica a megajoules

| Energía consumida a CFE 2006/07 (kW-h) | Factor de conversión a joules | Energía consumida a CFE 2006/07 (joules) | Energía consumida a CFE 2006/07 (megajoules) |
|--|-------------------------------|--|--|
| 52,213,045 | 3,600,000 | 187,966,962,000,000 | 187,966,962 |

Fuente: elaboración propia en base a Rein (2012).

Petróleo

El procedimiento de la conversión de petróleo a megajoules se explica a continuación. La secuencia de pasos se muestra en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Conversión de petróleo a megajoules

| Petróleo consumido 2006/07 (litros) | Factor de conversión a barriles | Petróleo consumido 2006/07 (barriles) | Factor de conversión a kilocalorías | Petróleo consumido 2006/07 (kilocalorías) |
|--|---------------------------------|--|-------------------------------------|--|
| 404,428,679 | 158.9873 | 2543779.86 | 1,469,600 | 3,738,338,882,100.98 |

*continua...*Cuadro 18. Conversión de petróleo a megajoules (*continuación ...*)

| Factor de conversión kilocalorías a joules | Petróleo consumido 2006/07 (joules) | Petróleo consumido (megajoules) |
|--|--|------------------------------------|
| 4,184 | 15,641,209,882,706,300 | 15,641,209,883 |

Fuente: elaboración propia en base a Rein (2012).

Bagazo

En el supuesto de que todo el bagazo obtenido por el ingenio se quema para generar potencia para la molienda de la caña, la conversión a megajoules se muestra a continuación con el ejemplo de bagazo obtenido por la agroindustria nacional en la zafra 2006/07. El procedimiento se muestra en el Cuadro 19.

Cuadro 19. Conversión de bagazo a megajoules

| Bagazo quemado 2006/07 (toneladas) | Factor de conversión a kilocalorías de una ton de bagazo | Bagazo quemado 2006/07 (kilocalorías) | Factor de conversión de una kilocaloría a megajoules | Bagazo quemado 2006/07 (megajoules) |
|---------------------------------------|--|--|--|--|
| 14,112,069 | 1,684,990 | 23,778,695,144,310 | 0.0041868 | 99,556,640,830 |

Fuente: elaborado en base a Rein (2012).

La fuente para la equivalencia energética de una tonelada de bagazo de caña a 1,684,990 kilocalorías es el Diario Oficial de la Federación del 14 de enero de 2010.

Energía consumida zafra 2006/07

De esta manera y continuando con el ejemplo, al concentrar las tres fuentes de energía utilizadas en una unidad de energía (megajoules) que las haga comparables tenemos el siguiente resultado y finalmente se convierte la energía consumida a kW-h (Cuadro 20).

Cuadro 20. Energía total consumida en la zafra 2006/07

| Fuente de energía | Energía consumida 2006/07 (megajoules) | Factor de conversión 1 megajoule a kW-hora | Energía consumida 2006/07 (kW-hora) |
|-----------------------------------|---|--|--|
| Electricidad CFE | 187,966,962 | 0.277778 | 52,213,045 |
| Petróleo | 15,641,209,883 | 0.277778 | 4,344,780,523 |
| Bagazo | 99,556,640,830 | 0.277778 | 27,654,622,453 |
| Total de energía consumida | 99,744,608,685 | 0.277778 | 32,051,616,021 |

Fuente: elaborado en base a Reín (2012).