



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
ECONÓMICAS Y EMPRESARIALES**

**LA EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD TOTAL DE LOS FACTORES DE LAS
TERMINALES DE CONTENEDORES EN LOS PUERTOS DE AMÉRICA DEL
NORTE, 2005-2016: UN ESTUDIO A PARTIR DEL ANÁLISIS DE LA
ENVOLVENTE DE DATOS**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS EN
NEGOCIOS INTERNACIONALES**

PRESENTA:

TSITSI ANAID HERNÁNDEZ DUARTE

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ CÉSAR LENIN NAVARRO CHÁVEZ

MORELIA MICHOACÁN, ABRIL DEL 2018

ÍNDICE

RELACIÓN DE TABLAS, GRÁFICAS Y FIGURAS	4
GLOSARIO	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO 1	15
LOS SISTEMAS PORTUARIOS Y EL COMERCIO	15
MARÍTIMO EN AMÉRICA DEL NORTE	15
1.1. Sistemas Portuarios y el Transporte Marítimo	15
1.1.2 Estructura portuaria	17
1.1.3 Clasificación de los puertos	20
1.1.4 Clasificación de las terminales portuarias	22
1.1.5 Las terminales de contenedores	23
1.1.5.1 Características de TEU	24
1.1.5.2 Áreas Funcionales de operaciones de una terminal de contenedores	25
1.1.5.3 Elementos de la terminal de contenedores	26
1.1.5.4 Sistema operativo	28
1.1.5.5 Operación portuaria	30
1.2 Los Puertos Marítimos y su Importancia con el Comercio Internacional	31
1.2.1 Los puertos en América del Norte	35
CAPÍTULO 2	38
LA EFICIENCIA EN LOS MÉTODOS NO PARAMÉTRICOS Y PARAMÉTRICOS: UNA RETROSPECTIVA TEÓRICA	38
2.1 Productividad y Eficiencia	38
2.1.1 Concepto de productividad	38
2.1.1.1 Productividad total de los factores	42
2.1.2 Conceptos de eficiencia	44
2.1.2.1 Eficiencia global	46
2.1.2.2 Eficiencia técnica	49
2.1.2.3 Eficiencia asignativa	53
2.2 Métodos No Paramétricos y Paramétricos	55
2.3 Métodos No Paramétricos	57
2.3.1 Métodos DEA	57
2.3.1.1 Antecedentes	57

2.3.1.2 Fundamentos teóricos y metodológicos de los modelos DEA	59
2.3.1.3 Modelo DEA-CCR	61
Modelo DEA-CCR fraccional	62
Modelo DEA-CCR en su forma multiplicativa	63
Modelo DEA-CCR en su forma envolvente	64
2.3.1.4 Modelo DEA-BCC	64
Modelo DEA-BCC fraccional	66
Modelo DEA-BCC en su forma multiplicativa	67
Modelo DEA-BCC en su forma envolvente	67
2.3.1.5 Orientación del modelo	68
2.4.1.6 Análisis Slacks	69
2.3.1.7 Benchmarking	70
2.3.1.8 Ventajas y desventajas en la utilización de los modelos DEA	72
2.3.2 Modelo FDH	73
2.3.2.1 Introducción al modelo FDH	73
2.3.2.2 Fundamentos del modelo FDH	74
2.4 Métodos Paramétricos	76
2.4.1 Método SFA	76
2.4.1.1 Antecedentes	77
2.4.1.2 Aspectos teóricos	77
2.4.1.3 Mínimos cuadrados clásicos modificados	81
2.4.1.4 Máxima verosimilitud	82
CAPÍTULO 3	84
LA EFICIENCIA Y LA PRODUCTIVIDAD EN LAS TERMINALES DE CONTENEDORES EN AMÉRICA DEL NORTE: ELEMENTOS METODOLÓGICOS	84
3.1 El Modelo del Análisis de la Envolvente de Datos (DEA)	84
3.2 La Productividad Total de los Factores a través del Índice Malmquist	86
3.3 Selección de DMU's, <i>Inputs</i> y <i>Outputs</i>	91
3.3.1 Correlación de Pearson y análisis factorial	95
3.4 Bases Estadísticas	98
3.4 Bases Estadísticas	99
CAPÍTULO 4	100
LA EFICIENCIA Y LA PRODUCTIVIDAD EN LOS PUERTOS DE AMÉRICA DEL NORTE: UN ANÁLISIS A TRAVÉS DEL <i>DATA ENVELOPMENT ANALYSIS</i> (DEA)	100
4.1 Eficiencia a partir del Modelo DEA-BCC	100
4.1.1 Análisis <i>benchmarking</i> con rendimientos variables a escala	103

4.1.2 Análisis <i>slack</i> con rendimientos variables a escala	105
4.2 Productividad Total de los Factores a partir del Índice Malmquist	109
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
BIBLIOGRAFÍA	118
ANEXO 1: MATRIZ DE CONGRUENCIA	131
ANEXO 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA PARA LA MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA PORTUARIA	132
ANEXO 3: FRECUENCIA DE VARIABLES INCIDENTES EN LA MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA PORTUARIA	139

RELACIÓN DE TABLAS, GRÁFICAS Y FIGURAS

TABLAS

Tabla 1. Medias <i>Twenty-foot Equivalent Unit</i> (TEU)	24
Tabla 2. Características de Método SFA	78
Tabla 3. Puertos en la región de América del Norte	92
Tabla 4. Puertos con terminales de contenedores sujetos a análisis	92
Tabla 5. Frecuencia de variables que inciden en la eficiencia portuaria	94
Tabla 6. Variables, Inputs y Outputs de la investigación	94
Tabla 7. Correlaciones Pearson	96
Tabla 8. Prueba de KMO y Bartlett	97
Tabla 9. Comunalidades	97
Tabla 10. Varianza total explicada	98
Tabla 11. Matriz de componente	98
Tabla 12. Eficiencia Técnica con Rendimientos Variables a Escala en los Puertos de América del Norte, 2005-2016.	102
Tabla 13. Análisis Benchmarking con rendimientos variables a escala en los Puertos de América del Norte, 2005-2016.	103
Tabla 14. Análisis <i>Slacks</i> con Rendimientos Variables a Escala en los Puertos de América del Norte, 2005.	105
Tabla 15. Análisis <i>Slacks</i> con Rendimientos Variables a Escala en los Puertos de América del Norte, 2008.	106
Tabla 16. Análisis <i>Slacks</i> con Rendimientos Variables a Escala en los Puertos de América del Norte, 2012.	107
Tabla 17. Análisis <i>Slacks</i> con rendimientos variables a escala de los Puertos en América del Norte, 2016.	108

Tabla 18. Índice Malmquist de los puertos en América del Norte, 2005-2016.	110
Tabla 19. Productividad de los puertos en América del Norte, 2005-2016.	111

GRÁFICAS

Gráfica 1. Comercio marítimo en toneladas métricas en millones, 1970-2015.	33
Gráfica 2. Tráfico marítimo de contenedores en la región de América del Norte, 2000-2014.	36
Gráfica 3. Eficiencia Técnica con Rendimientos Variables a Escala en los Puertos de América del Norte, 2005-2016.	101
Gráfica 4. Cambio en la productividad de los puertos en América del Norte, 2005-2016.	112

FIGURAS

Figura 1. Eficiencia Global	48
Figura 2. Componentes de la Eficiencia Global	48
Figura 3. Eficiencia Técnica	50
Figura 4. Eficiencia <i>Asignativa</i>	54
Figura 5. Eficiencia técnica y <i>asignativa</i> en el modelo de Farrell	59
Figura 6. Frontera de producción del modelo CCR	65
Figura 7. Frontera de producción del modelo BCC	66
Figura 8. Orientaciones en modelos DEA	69
Figura 9. Frontera de posibilidades de producción FDH	74
Figura 10. Asimetría del término compuesto	80

GLOSARIO

Análisis Slacks. Proporciona la dirección en la cual habrán de mejorarse los niveles de eficiencia de las llamadas unidades de toma de decisión -DMUs- (Lo, et al., 2001).

Benchmarking. Se puede definir como la medida de una actuación en comparación con la de las mejores compañías de su clase, determina cómo la mejor de ellas ha logrado estos niveles de actuación y utiliza la información como base para los objetivos, estrategias y aplicación de la propia compañía (Bemowski, 1991).

DEA. Método que permite evaluar la eficiencia relativa de unidades homogéneas en presencia de múltiples *inputs* y *outputs* (Guaita et. al. 2016).

Eficiencia. El logro de las metas con la menor cantidad de recursos (Koontz y Weihrich, 2001).

Eficiencia Asignativa. Se refiere a que el gasto monetario total en insumos utilizados para producir una cantidad dada de bienes sea el mínimo posible de acuerdo a los precios de los insumos (Alé Yarad, 1990).

Eficiencia Económica. Logro de la máxima producción al menor costo posible (Pinzón, 2003).

Eficiencia Técnica. Consiste en obtener la máxima producción física factible, dada la tecnología existente, a partir de una cierta cantidad de insumos (Alé Yarad, 1990).

Eficiencia Técnica Global. Es el producto de la eficiencia técnica pura y la eficiencia de escala (Alé Yarad, 1990).

Productividad. Relación entre la producción obtenida por un sistema de producción o servicios y los recursos utilizados para obtenerla» (Prokopenko, 1997).

RESUMEN

Dentro de este trabajo se presenta un análisis de la medición de la eficiencia a través de la metodología del Análisis de la Envolvente de Datos (DEA por sus siglas en inglés), además se estudia el cambio de la Productividad total de los Factores (PTF) de las terminales de contenedores en los puertos de América del Norte, durante el periodo 2008-2016. Los objetivos de la investigación son: a.) Definir cuáles fueron los factores que determinaron la eficiencia de las terminales de contenedores en los puertos de América del Norte durante el periodo 2005-2016 y b.) determinar cuál fue el factor que determinó la Productividad Total de los Factores de las terminales de contenedores en los puertos de América del Norte durante el periodo 2005-2016. En la obtención de la eficiencia se propone la utilización de un modelo DEA-BCC, que considera los rendimientos variables a escala, mientras que para el análisis de la PTF se propone la elaboración del índice de *Malmquist*, el cual el cual descompone el cambio de la productividad en dos factores, cambio en eficiencia y cambio tecnológico. Se utilizan *inputs* la longitud del muelle, el área de la terminal y el número de grúas pórtico, como *outputs* la movilización de TEUs anual. Los resultados muestran que, de manera global los puertos seleccionados no fueron eficientes para el periodo de estudio, además de que hubo de manera global una disminución en la productividad.

Palabras clave: Eficiencia, Productividad, Puertos, DEA, Índice Malmquist.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of the measurement of efficiency through the methodology of the Data Envelopment Analysis (DEA), in addition to studying the change in the Total Productivity of Factors (TPF) of container terminals in the ports of North America, during the period 2008-2016. The objectives of the research are: a.) To define the factors that determined the efficiency of container terminals in North American ports during the period 2005-2016 and b.) To determine what was the factor that determined Productivity Total Factors for container terminals in the ports of North America during the period 2005-2016. In obtaining the efficiency, the use of a DEA-BCC model is proposed, which considers the variable returns to scale, while for the analysis of the TFP the Malmquist index is proposed, which decomposes the change of productivity in two factors, change in efficiency and technological change. The inputs are the length of the pier, the area of the terminal and the number of gantry cranes, as outputs the mobilization of annual TEUs. The results show that, overall, the selected ports were not efficient for the study period, and there was a global decrease in productivity.

INTRODUCCIÓN

Ningún país puede pensar en su progreso económico sin el desarrollo de una infraestructura de transporte eficiente. Desde sus inicios el transporte ha facilitado la compra y venta de mercancía, materias primas y diferentes componentes en diversas partes del mundo, este movimiento de mercadería utiliza fundamentalmente, dos modos de transporte: aéreo y marítimo. En los últimos tiempos el tráfico marítimo de mercancías se ha incrementado de manera exponencial. Este crecimiento es logrado tanto por el transporte marítimo, como así también por la infraestructura que lo sirve (Deshmukh, 2003).

Los puertos marítimos de un país constituyen uno de sus activos logísticos estratégicos más relevantes, dada su participación en el intercambio internacional de bienes. De acuerdo con estadísticas de la Organización Marítima Internacional (IMO, 2014) la mayoría de las mercancías que se comercializan en el mundo se mueven por vía marítima, siendo los puertos los nodos que permiten operar dicho intercambio. Quizá el modo de transporte que más impacto ha tenido por la globalización en los últimos 20 años ha sido precisamente el marítimo, considerando su amplia cobertura geográfica, los grandes volúmenes que se pueden desplazar por este medio y el alto nivel de eficiencia con el que esto se logra, así pues, los puertos son considerados la columna vertebral del comercio internacional (CILTEC, 2015).

La perspectiva actual y la globalización cada vez mayor de las economías, exigen un incremento en la eficiencia de todos los actores del sector de transporte, especialmente los puertos, donde hay un aporte público masivo en sus procesos de producción. Las autoridades portuarias se ven cada vez más presionadas para mejorar la eficiencia garantizando que los servicios se presten sobre una base internacionalmente competitiva. La eficiencia de los puertos es un indicador del desarrollo económico de un país (Liu, 2008), por lo que monitorear y compararlos en términos de eficiencia se ha convertido en parte esencial de los programas de reforma microeconómica en muchos países (Jiang y Li, 2009).

El 90% de la carga marítima se transporta en contenedores esto confirma la importancia de éstos en el comercio marítimo (Cho, 2014). Por lo tanto, se necesitan mejoras en la eficiencia de los puertos que utilicen este medio. Un sistema operacional eficiente puede ayudar significativamente a hacer el mejor uso de los recursos e infraestructura de los puertos. La eficiencia desempeña un papel clave en la competencia portuaria de contenedores, por lo que el análisis de la eficiencia de los puertos que los utilizan es importante para la supervivencia y competitividad de la industria (Cullinane y Wang, 2006).

El beneficio de contar con puertos eficientes va más allá de aumentar el volumen de tráfico, tiene efectos directos e indirectos sobre otras actividades relacionadas, como aseguradoras, finanzas y servicios logísticos, debido a su posición estratégica en la cadena de transporte. Asimismo, se crea un valor añadido que impacta directamente en la generación del empleo, propiciando un crecimiento regional y urbano. Por tal razón, se han realizado diversos estudios sobre eficiencia y productividad en los puertos y han ido aumentando enormemente en los últimos 20 años, utilizando diversas metodologías (Merk y Dang, 2012).

Tradicionalmente los puertos han sido lugares de resguardo de las embarcaciones en los que se podían desarrollar con facilidad las operaciones de carga, descarga, embarque y desembarque. De hecho, el crecimiento y desarrollo de algunas ciudades se ha debido en gran medida a la existencia de un puerto junto a ellas en los que estas actividades se han podido llevar a cabo en condiciones idóneas (Rúa, 2006).

El análisis de eficiencia de los puertos o terminales de contenedores tiene una importante implicación tanto para el gobierno como para los operadores del puerto. Basado en la medición de la eficiencia, el gobierno es capaz de la colocación de los recursos en la costa y ofrecer fondos para mejorar la competencia total. Los operadores del puerto quieren evaluar y comparar sus propios puertos contra otros para asegurar la competitividad (Liu et al, 2008).

Es importante recalcar que los puertos constituyen un enlace relevante en la cadena de transporte, por lo que si actúan de forma eficiente se consiguen menores precios de exportación, lo que a su vez favorece la competitividad de los productos en los mercados internacionales (González, 2014).

Debido a la creciente apertura comercial que se ha vivido en los últimos años, es de vital importancia tener estudios para poder medir y comprender aquellos factores que hacen a un país productivo y eficiente. Con el desarrollo de dicha investigación se busca identificar y compilar aquellas teorías que sustenten una base sólida para impulsar la eficiencia y así poder conocer en mayor medida el comportamiento de los factores incidentes en la misma. Se pretende aportar una forma de analizar la relación que existe entre los factores que afectan la eficiencia portuaria.

El reciente crecimiento en la demanda de los puertos se ha acelerado debido a la economía globalizada, ningún país puede pensar en su progreso económico sin el desarrollo de una infraestructura de transporte eficiente (Deshmukh, 2003). La industria del transporte marítimo es de suma importancia para el mundo moderno, ya que tiene gran influencia en cuestiones de desarrollo social y económico, como así también es generadora de fuente de empleos, ya que millones de personas en el mundo trabajan en actividades directa o indirectamente relacionadas con los océanos y mares.

Es relevante destacar que los puertos son sitios en los cuales se realizan importaciones y exportaciones de mercancías utilizando como medio de transporte el barco o buque, el cual a diferencia de los otros medios de transporte permite llegar a diversos destinos, siendo en algunos casos, la manera más económica. Los puertos marítimos están inmersos en la dinámica del comercio internacional y forman una parte esencial, en materia económica de una nación (CILTEC, 2015).

Así pues, consciente de la relevancia que hoy tienen los temas relacionados con la medición de la eficiencia y la productividad en los puertos para incrementar la competitividad a nivel mundial, con el desarrollo de dicha investigación se pretende proporcionar información valiosa que servirá como guía y acción sobre qué hacer y

cómo generar estrategias inclinadas a incrementar el grado de eficiencia en los puertos, además se pretende que la iniciativa privada tenga al alcance un estudio crítico para basar su criterio de inversión en los puertos mexicanos y se incentive de manera positiva y así poder generar más fuentes de empleos.

En este contexto, este análisis no sólo puede formar una poderosa herramienta de gestión para los operadores de puertos de contenedores, sino que también constituye un insumo importante para informar sobre la planificación y el funcionamiento de los puertos de contenedores regionales y nacionales. Este estudio contribuye al campo de la economía del transporte proporcionando evidencia empírica sobre la eficiencia terminal de contenedores en la región de América del Norte, durante el periodo 2008-2016, dentro de este periodo se contrasta la situación de los puertos durante la crisis y su evolución en años posteriores, además es la información que estaba disponible para cada uno de los puertos objeto de estudio, cabe destacar que la elección de puertos se basó en el *ranking* que la *American Association of Port Authorities* elabora cada año, donde posiciona a los cincuenta puertos que movilizan más contenedores en la región.

Enfatizando que en 2015 el valor de las exportaciones de América del Norte fue de 2,093,311 millones de dólares (Banco Mundial, 2016), además de que es la segunda región que más moviliza mercancía (UNCTAD, 2015), lo que resalta la importancia que tienen los puertos en América del Norte, ya que tan solo Estados Unidos de América se cataloga como el segundo exportador de carga contenerizada, mientras que Canadá se localiza en el lugar 17, así mismo la ruta marítima Asia- América del Norte es la principal ruta a nivel mundial que moviliza más contenedores (WSC, 2015).

Se plantean las preguntas que delimitarán esta investigación: a) ¿Cuáles fueron los principales factores que determinaron la eficiencia de las terminales de contenedores en los puertos de América del Norte durante el periodo 2005-2016? y b) ¿Cuál fue el factor que determinó la Productividad Total de los Factores de las terminales de contenedores en los puertos de América del Norte durante el periodo 2005-2016?

Los objetivos de la investigación son: a) Definir cuáles fueron los factores que determinaron la eficiencia de las terminales de contenedores en los puertos de América del Norte durante el periodo 2005-2016; y b) Determinar cuál fue el factor que determinó la Productividad Total de los Factores de las terminales de contenedores en los puertos de América del Norte durante el periodo 2005-2016.

Las hipótesis de investigación quedan definidas de la siguiente manera: a) La longitud del muelle, la superficie de la terminal y el número de grúas pórtico, fueron los principales factores que determinaron la eficiencia de las terminales de contenedores en los puertos de América del Norte durante el periodo 2005-2016; y b.) El cambio tecnológico antes que la eficiencia técnica fue quien determinó la Productividad Total de los Factores de las terminales de contenedores en los puertos de América del Norte durante el periodo 2005-2016.

El trabajo de investigación está estructurado de la siguiente manera: En el capítulo uno se describe la composición del sistema portuario, describiéndose cada uno de sus elementos, además se puntualiza la importancia de los puertos en el comercio de la región de América del Norte

El capítulo dos contiene información relacionada con los fundamentos teóricos de la eficiencia, productividad y de los modelos DEA, los cuales respaldan esta investigación. Se puede observar desde la idea del concepto de eficiencia y sus diferentes tipos, naciendo de desde el punto de vista de los modelos de frontera para continuar con su evolución hasta generarse un instrumento de medición de la eficiencia y de la productividad.

Dentro del capítulo tres se describe los aspectos metodológicos del modelo a utilizar, se describen las variables utilizadas en la medición y el respaldo de las mismas a través de la revisión de la literatura. Además, se muestra cada uno de los puertos seleccionados para llevar a cabo esta investigación, tomando en cuenta datos característicos tales como su dinámica comercial y el tamaño.

Por último, el capítulo cuatro contiene los resultados que se obtuvieron de la eficiencia de cada uno de los puertos para los años 2005, 2008, 2012 y 2016, al

haber aplicado los modelos DEA-BCC, así como el análisis *benchmarking* de cada uno de los puertos objeto de estudio y el análisis *slacks*. Dentro de este capítulo se muestran, además, los resultados acerca de la productividad, mediante el cálculo del índice *Malmquist*.

CAPÍTULO 1

LOS SISTEMAS PORTUARIOS Y EL COMERCIO MARÍTIMO EN AMÉRICA DEL NORTE

El presente capítulo habla acerca de la estructura de los sistemas portuarios y sus componentes, con el fin de conocer su funcionamiento y así poder identificar la escala de operación y de qué manera consumen sus recursos para así identificar cuáles son los parámetros que los hacen eficientes. Además, se menciona la importancia de los puertos en el comercio internacional y en particular en la región de América del Norte.

1.1. Sistemas Portuarios y el Transporte Marítimo

El sistema portuario es un elemento esencial para las actividades comerciales entre economías, lo cual permite que las operaciones de transporte marítimo tengan un curso organizado y controlado. A medida que los puertos se desarrollen de manera integral con los otros medios de transporte generan mayor dinamismo económico y facilitan las actividades logísticas de las exportaciones e importaciones (Delfín y Navarro, 2014).

Un sistema portuario es un conjunto de elementos interrelacionados, cada uno con una o varias funciones, cuyos objetivos son participar en el desarrollo y aprovechamiento del litoral de una región o de un país, apoyar a la industria y/o servir como vínculo entre los transportes marítimos y terrestres (López, 1999).

Los puertos son organizaciones complejas, donde se dan cita operadores que desarrollan actividades de diversa naturaleza, tienen objetivos diferentes y están sujetos a competencia y regulación dispares (González y Trujillo, 2006).

La Unión Europea define un puerto como:

“Una zona de tierra y agua dotada de unas obras y equipo que permitan principalmente la recepción de buques, su carga y descarga, y el almacenamiento, recepción y entrega de mercancías, así como el embarco y desembarco de pasajeros”.

Tradicionalmente los puertos han sido lugares de resguardo de las embarcaciones en los que se podían desarrollar con facilidad las operaciones de carga, descarga, embarque y desembarque.

Para Rúa (2006) las funciones típicas que desarrolla un puerto incluyen además de la carga y descarga de la mercancía de los buques y el embarque y desembarque de pasajeros la manipulación de mercancías, su depósito y almacenaje, la inspección y el control de la mercancía por parte de las administraciones públicas, así como la consolidación y desconsolidación de cargas, los servicios de apoyo a los buques, servicios de valor añadido y de gestión de la información que se intercambia entre los diferentes agentes que intervienen en todas estas actividades.

La definición que da la United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD por sus siglas en inglés) muestra claramente este carácter multifuncional, define a los puertos como interfaces entre los distintos modos de transporte y son típicamente centros de transporte combinado, así mismo son áreas multifuncionales, comerciales e industriales donde las mercancías no sólo están en tránsito, sino que también son manipuladas, manufacturadas y distribuidas.

Los puertos son sistemas multifuncionales, los cuales, para funcionar adecuadamente, deben ser integrados en la cadena logística global. Un puerto eficiente requiere no sólo infraestructura, superestructura y equipamiento adecuado, sino también buenas comunicaciones y, especialmente, un equipo de gestión dedicado y cualificado y con mano de obra motivada y entrenada (UNCTAD, 1999).

Los aspectos económicos que se identifican dentro de un puerto, tienen relación con las mercancías que una zona de influencia genera o requiera. Los aspectos políticos se relacionan íntimamente con los aspectos económicos, en la forma de producir según se trate de economías de mercado libre o centralizado. Los aspectos sociales nacen del hecho de que un puerto es un centro de trabajo, o bien del hecho de que un puerto es la base para establecer las corrientes migratorias intranacionales o internacionales (Ojeda, 2011).

Un puerto puede tener una o varias terminales dependiendo de la cantidad y tipo de carga que se manejen por él. La especialización de las terminales en el manejo de un producto en específico garantiza que la operación de carga y descarga sea rápida, segura y eficiente (López, 1999).

1.1.2 Estructura portuaria

Podemos distinguir en un puerto cuatro tipos de construcciones: obras exteriores o de abrigo, obras interiores de atraque, infraestructuras de acceso y construcciones o instalaciones complementarias (UNCTAD, 1992).

Las obras exteriores son las necesarias para proporcionar una superficie abrigada de aguas en las que puedan permanecer los buques. Su importancia depende del tipo de puerto y puede ser prácticamente nula en puertos con las condiciones naturales adecuadas o tener una gran importancia en aquellos casos en que los puertos se han ganado a aguas abiertas. Las infraestructuras de abrigo, al dibujar el perímetro exterior del puerto, son las que configuran su disposición en planta (Rúa, 2006).

En términos generales, puede hablarse de dos grandes tipos constructivos de diques de abrigo: los diques de escollera y los diques verticales. Los diques de escollera están formados por grandes piedras, naturales o artificiales, dispuestas en talud alrededor de un núcleo; funcionan por absorción, de tal manera que las olas

rompen contra la escollera cuyas piedras y los intersticios que quedan entre las mismas absorben la energía liberada, razón por la cual estos diques también reciben el nombre de rompeolas. Los diques verticales en cambio funcionan por reflexión, de tal manera que las olas no llegan a romper contra el dique, sino que son reflejadas por el mismo; para ello es necesario que el paramento vertical del dique esté cimentado a suficiente profundidad como para evitar que se produzca la rotura de la ola (Rúa, 2006).

Las infraestructuras de atraque son las que permiten la aproximación y amarre de los buques de tal manera que puedan llevarse a cabo las actividades de carga y descarga de estos. Los atraques pueden ser de dos grandes tipos, los destinados a un tráfico específico, en general dedicados a tráficos de gran volumen con ritmos de carga y descarga marcados por el proceso productivo que lo precisa y que en muchos casos son utilizados por un único receptor o cargador de la mercancía, como es el caso de los muelles para la carga de crudo, gases licuados, cemento, cereales, etc. y los destinados al tráfico comercial ordinario (UNCTAD, 1992).

Para Rúa (2006), las infraestructuras de acceso las forman, desde el frente marítimo, los canales de navegación, debidamente dragados para permitir el acceso de los buques y las ayudas a la navegación como los faros, balizas, rácones, entre otras. Desde el frente terrestre, estas infraestructuras las forman las carreteras y vías férreas que permiten la conexión del puerto con su área de influencia.

Son obras e instalaciones complementarias los almacenes, silos, depósitos, tinglados, edificios de servicios, las grúas y otros equipos de carga y descarga, varaderos, etc. Todos estos elementos forman lo que genéricamente se denomina superestructura del puerto (Rúa, 2006).

Desde el punto de vista de la función física de los puertos, cuyo objetivo es permitir la conectividad entre el medio marítimo y el terrestre, mediante la existencia de tres

zonas principales: la zona marítima o de acceso, la zona terrestre para maniobras y la zona de enlace con los modos terrestres (CILTEC, 2015).

La primera de ellas está constituida por las obras y el señalamiento marítimo que permite la entrada de las diferentes embarcaciones que arriban al puerto, a través del canal principal de acceso, la dársena de la ciaboga y los canales secundarios hacia sus distintas posiciones de atraque. Su capacidad está limitada, por una parte, al ancho de los canales y al diámetro de la dársena, así como a la profundidad mínima de sus aguas, que es conocida como el calado (CILTEC, 2015).

La denominada zona terrestre, está integrada principalmente por los muelles ubicados en las diferentes terminales con las que cuenta cada puerto comercial, con base en su vocación a los distintos tipos de mercancías (graneles, líquidos, vehículos, carga general, refrigerada y contenedores, entre otras) y al equipamiento de que disponen para efectuar las maniobras de carga y descarga de los buques. Cada terminal cuenta con cierto número de posiciones de atraque donde se atiende a los barcos en razón de su eslora (longitud) y del calado mínimo necesario de acuerdo con el tonelaje que transporten. Su capacidad está determinada por el largo de los muelles y por el rendimiento y productividad de su equipamiento, el cual comúnmente se mide por el número de operaciones realizadas o por las toneladas manejadas por hora (CILTEC, 2015).

Dentro de la zona de enlace, se encuentran las superficies e instalaciones que permiten el acceso, circulación, estacionamiento y operación de los modos de transporte terrestre de carga, así como las destinadas al almacenamiento de transferencia de las mercancías operadas, tanto de importación como de exportación. También comprende los circuitos de reconocimiento aduanero, bodegas fiscalizadas y las oficinas de las distintas autoridades, servicios y actores privados que actúan dentro del recinto portuario (CILTEC, 2015).

1.1.3 Clasificación de los puertos

Existen diferentes criterios para clasificar los puertos, dentro de los principales tenemos los siguientes de acuerdo con la UPC (2004):

- Clasificación funcional, los puertos pueden clasificarse en puertos pesqueros, de refugio, industriales, de pasajeros, comerciales, bases militares, deportivos, etc.
- Clasificación física, por la que cabe diferenciar los siguientes supuestos y condiciones decisivas del entorno portuario. Por su situación, un puerto puede ser exterior, interior o mixto. Así mismo se pueden clasificar por su acceso al mar, los hay que acceden por canales, ríos o bocanas.
- Clasificación por los servicios prestados, los puertos de hoy son el resultado del paso del tiempo, por lo que se destacan 4 etapas. La UNCTAD (1992) describe cada una de las cuatro generaciones de puertos, donde:

A. Primera generación: los puertos pertenecientes a dicha generación corresponden a la etapa previa de la década de los sesenta, teniendo como característica que los puertos simplemente eran interfaces para el transbordo de carga entre el transporte terrestre y marítimo.

B. Segunda generación: esta clasificación corresponde a los puertos que desempeñaban sus funciones de la década de los sesenta a la década de los ochenta. En esta etapa se tiene una visión más amplia de las funciones del puerto, ya que es visto como un centro de servicios de transportes y de servicios industriales y comerciales. Constituyen la idea más clara del inicio de la globalización del comercio mundial, dentro de la zona portuaria se construyen instalaciones industriales y como consecuencia su zona económica se amplía.

C. Tercera generación: estos puertos aparecen a partir de la década de los ochenta, y se caracterizan por comenzar a utilizar contenedores¹. En esta etapa se desarrollan los centros integrados de transporte y se crean las plataformas logísticas, de esta manera los puertos pertenecientes a esta

¹El contenedor es una caja de metal rígida, sellada y factible de ser usada muchas veces, que se llena con mercancías para (Bancomext, 2004).

generación se convierten en nodos dinámicos dentro de la compleja red de producción y distribución, además se especializan los servicios portuarios.

- D. Cuarta generación: se presentan a partir de la década del 2000 y denominados también puertos red, ya que se consideran como centros intermodales y plataformas logísticas. Constituyen redes de transporte multimodal, ya que interconectan los transportes marítimo, terrestre y ferroviario. Además, se caracterizan por tener una unidad comercial y de gestión muy desarrollada.

Los puertos que se encuentran en esta generación buscan ser puntos estratégicos en el sistema de producción, transporte y comercio mundial, jugando un papel clave en la economía mundial (UNCTAD, 2010).

De acuerdo con la UNCTAD (2010), existen zona de influencia regional que vuelven a los puertos un punto estratégico denominados *hinterlandy foreland*.

El *hinterland* es la región nacional o internacional que representa un área de influencia del puerto alrededor del mismo, en otras palabras, la zona en el interior del territorio del país al que pertenece y que incluso puede extenderse hacia otras naciones colindantes. Sus límites están condicionados a la existencia de infraestructura de conectividad terrestre. Se denomina *foreland* a la zona de influencia que tiene un puerto como origen o destino de mercancía de su *hinterland* es decir un área de influencia en el puerto a la cual se dirige la carga generada por su *hinterland*.

Existen además otras clasificaciones de los puertos por su navegación, instalaciones y servicios de acuerdo en lo estipulado en el artículo 9 de la Ley de Puertos de México (2016):

I. Por su navegación en:

- a) De altura, cuando atiendan embarcaciones, personas y bienes en navegación entre puertos o puntos nacionales e internacionales, y
- b) De cabotaje, cuando sólo atiendan embarcaciones, personas y bienes en navegación entre puertos o puntos nacionales.

II. Por sus instalaciones y servicios, enunciativamente, en:

- a) Comerciales, cuando se dediquen, preponderantemente, al manejo de mercancías o de pasajeros en tráfico marítimo;
- b) Industriales, cuando se dediquen, preponderantemente, al manejo de bienes relacionados con industrias establecidas en la zona del puerto o terminal;
- c) Pesqueros, cuando se dediquen, preponderantemente, al manejo de embarcaciones y productos específicos de la captura y del proceso de la industria pesquera, y
- d) Turísticos, cuando se dediquen, preponderantemente, a la actividad de cruceros turísticos y marinas.

1.1.4 Clasificación de las terminales portuarias

Las terminales portuarias, son unidades operativas de un puerto habilitadas para proporcionar intercambio modal y servicios portuarios; incluye la infraestructura, las áreas de depósito transitorio y las vías internas de transporte (CGPMM, 2014). La Ley de Puertos de México en su artículo 10 clasifica a las terminales en:

- I. Públicas, cuando se trata de terminales de contenedores y carga general o exista la obligación de ponerlas a disposición de cualquier solicitante, y
- II. Particulares, cuando el titular las destine para sus propios fines, y a los de terceros mediante un contrato, siempre y cuando los servicios y la carga de que se trate sean de naturaleza similar a los autorizados originalmente para la terminal.

Así mismo las terminales pueden clasificarse por el tipo de carga, según la Coordinación General de Puertos y Marina Mercante de México (2014) en:

- i. Terminal de carga general. Es aquella en la que se manejan toda clase de mercancías. En ellas se mueven tanto cargas de grandes volúmenes, de gran peso, como aquellas de poco peso y volumen. Además, se manejan cargas sueltas y unitizadas (SCT, 2014).
- ii. Terminal de carga a granel. Existen dos tipos de terminales para el manejo de mercancías a granel, así pues, se tienen terminales para el manejo a granel agrícola y terminales para el manejo de granel mineral.
- iii. Terminal de petróleo y derivados. Una terminal petrolera es aquella que recibe o envía crudo o sus derivados para ser procesados o distribuidos (CGPMM, 2008).
- iv. Terminales de contenedores. Es un núcleo del transporte en el que los medios de la transportación terrestre y marítima se interconectan para efectuar la transferencia de mercancías contenerizadas utilizando equipo mecánico para ello.

1.1.5 Las terminales de contenedores

En 1955, Malcom Malean inventó el contenedor para el transporte marítimo. En 1966, *Sea-Land* fue el primer servicio transatlántico que utilizó los contenedores, cuyo uso mundial ha estado en continuo crecimiento desde entonces, este invento vino a revolucionar el transporte (Díaz, 2008).

Si hay algo que caracteriza al contenedor es su simplicidad. Una caja prismática que cumple la función de recipiente de carga. Tiene medidas estandarizadas, todos iguales, aún en cada rincón del planeta. La utilización del contenedor redujo los costos de transporte drásticamente, los tiempos de permanencia de la mercadería en un puerto también se minimizaron. Los volúmenes transportados también se multiplicaron y permitiendo mayores velocidades de viaje, el contenedor evita la manipulación de la mercadería propiamente dicha. Esto permite confianza y un mejor cuidado de la mercadería. El contenedor modificó el diseño y distribución de

los buques, el concepto de las Terminales Portuarias, las medidas de los acoplados terrestres, viales y ferroviarios, realmente revolucionó el transporte (Burns, 2012).

1.1.5.1 Características de TEU

El contenedor claramente fue evolucionando desde aquella primera idea de Mc Lean. Sus medidas cambiaron. Hoy en día, el contenedor más común es el TEU cuyas siglas significan *Twenty-Foot Equivalent Unit*. Los principales datos técnicos de este contenedor son:

Tabla 1. Medias *Twenty-foot Equivalent Unit* (TEU)

Característica	Medida
Largo	20´
Ancho	8´
Peso propio	2,300 kg
Peso carga máxima	28,180 kg
Peso bruto	30,480 kg
Volumen	32.6 m ³

Fuente: Elaboración propia con base en Burns, 2012.

Los contenedores pueden utilizarse para el transporte de una amplia gama de productos comprendidos en la categoría de carga seca. Desde objetos pequeños en cajas hasta objetos voluminosos y/o pesados como ser motores, maquinaria, pequeños vehículos, etc. Se puede transportar también mercancía en pallets. Menos frecuentes son aquellos contenedores que transportan carga a granel. Las dimensiones del contenedor se encuentran normalizadas para facilitar su manipulación. Aquí radica la importancia del mismo, que ha permitido a lo largo de las últimas décadas, hacer el transporte mucho más ágil, rápido y, en definitiva, más económico. Los contenedores son fabricados principalmente de acero corten, pero también los hay de aluminio. Esta característica es muy importante ya que permite

evitar la rotura de carga durante el transporte de la misma. Otra característica fundamental de los contenedores es la existencia, en cada una de sus esquinas, de alojamientos para los cierres de giro que les permiten ser enganchados por grúas especiales. También sirven para ser fijados sobre buques y camiones. Cabe aclarar que los contenedores no sólo son utilizados en el transporte marítimo, sino que también en el fluvial, terrestre y multimodal (Burns, 2012).

1.1.5.2 Áreas Funcionales de operaciones de una terminal de contenedores

De modo general, podemos decir que toda terminal de contenedores tiene tres áreas principales de operación (Saurí, 2002):

- Área entre muelle (*quay wall*) y playa de acopio de contenedores (*container yard*).
- Playa de acopio de contenedores (*container yard*).
- Área de operaciones terrestres (*landside operations area*), también conocida como zona de transferencia intermodal.

El diseño de la terminal y la elección de los equipos a utilizar para estas áreas y sus interfaces, dependerá de (Burns, 2012):

- Volumen de contenedores a manipular.
- Área disponible.
- Tipo de transporte del hinterland.

El sistema de operación, según Burns (2012), adoptado por una terminal es la combinación entre los equipos utilizados:

- Para la carga y descarga de la nave.
- Para los movimientos (transporte horizontal) entre muelle y playa de contenedores.
- Para el acopio de contenedores.

- Para los movimientos entre la playa de acopio y el área de operaciones terrestres.
- Para las operaciones terrestres propiamente dichas.

En terminales de mediana y gran capacidad, la descarga de los contenedores se realiza con las grúas pórtico buque-costera (STS por sus siglas en inglés). Los buques de contenedores pueden ser cargados y descargados al mismo tiempo. El sistema elevador va hacia tierra, descarga un contenedor, agarra otro contenedor, y lo lleva hacia el buque. Así sucesivamente. El contenedor, una vez en tierra se dirige hacia el área de acopio de contenedores donde permanece un par de horas o varias semanas, según hacia donde se dirija (Saurí, 2002).

La distribución del área de acopio de contenedores dependerá del tipo de equipo de playa elegido. El acopio puede realizarse en bloques donde los contenedores se apilan de manera compacta, sin espacio libre entre ellos, ocupando relativamente poca superficie. Para este caso, se utilizan las grúas pórtico. Un segundo tipo de acopio es de tipo lineal, este se realiza con una carretilla pórtico. Este tipo de acopio requiere espacio entre las filas de contenedores y calles de rodaje relativamente anchas. Cabe mencionar que las navieras facturan sólo cuando sus buques están en viaje, por lo que el tiempo de un buque en la terminal debe ser tan corto como sea posible. Las navieras exigen por ende a las terminales, la capacidad de realizar una determinada cantidad de movimientos por hora. Se suele medir movimientos de forma genérica, que implica carga y descarga por parte de las grúas pórtico (Burns, 2012).

1.1.5.3 Elementos de la terminal de contenedores

Para que una terminal de contenedores pueda realizar apropiadamente sus funciones requiere de los siguientes elementos (Hernández de Labra, 1998):

- a) Muelle, generalmente es marginal y más largo que los especializados en carga general. La longitud del mismo dependerá de los barcos que vayan a

hacer uso de la terminal, así pues, la regla para un dimensionamiento racional es el de dar una longitud igual a la eslora del barco más grande que arribará al puerto, más una manga para una mayor seguridad. El muelle debe de ser diseñado para soportar pesos del orden de las mil toneladas, con alturas que llegan a los 80 metros con el brazo levantado, sin descuidar otras fuerzas y movimientos producidos por el viento. Los muelles se protegen con defensas y se les proporcionan bitas para el amarre de los buques, así como los servicios de combustible y agua.

- b) Patio de contenedores, tiene la función de regular los flujos de contenedores tanto al buque como al exterior de la terminal. Los pavimentos se diseñan para que tengan suficiente resistencia y soporten las cargas inducidas por el equipo de carga y transporte, al manejar y seleccionar los contenedores en el patio.
- c) Dársenas, es la parte de un puerto resguardada artificialmente de las corrientes para que las embarcaciones puedan cargar y descargar. La profundidad de éstas varía entre 12 y 14 metros, mientras tanto la amplitud cuando se tienen dos remolcadores se requiere que sea de 280 metros y sin remolcadores de 350 a 460 metros.
- d) Bodega para la consolidación de carga, el transporte contenerizado se realiza con ventaja cuando se efectúa de puerta a puerta, sin embargo, es frecuente que en las terminales de contenedores se dé la consolidación de las mercancías en exportación o su desconsolidación para su clasificación según su destino. Este edificio sirve para acumular temporalmente la carga, en tanto es contenerizada, sirve como bodega de carga en tránsito. Generalmente son edificios de un solo piso con andenes en ambos costados y rampas de acceso en las cabeceras de las bodegas.
- e) Taller de mantenimiento, es el local en el que se efectúa el mantenimiento de los contenedores y del equipo de que se dispone en la terminal. El tamaño del taller varía con la cantidad del equipo disponible; a su vez la cantidad de equipo estará en función de la cantidad de contenedores que se manejen. Este edificio debe contar con una oficina de control administrativo, cuarto de

herramienta, almacén de partes y refacciones, con un cuarto para el transformador local y centros de distribución de fuerza y alumbrado.

- f) Oficinas generales de la terminal, se localizan generalmente cerca del acceso principal, con el que mantienen una estrecha comunicación. En este edificio se alojan los departamentos encargados de la administración de la terminal.
- g) Acceso principal, es la puerta a través de la cual los contenedores entran y salen, en ella se recoge la documentación y se lleva a cabo el pesaje en las básculas que se instalan en los carriles.
- h) Sistema de energía eléctrica, el alumbrado es indispensable debido a que las maniobras se realizan las 24 horas del día, en las terminales es conveniente contar con instalaciones para suministrar energía eléctrica a aquellos contenedores que lo requieran.
- i) Instalaciones para combustible, consisten en tanques con capacidades suficientes para suministrar el combustible a los vehículos y equipos de la terminal.
- j) Suministro de combustible a las embarcaciones, puede efectuarse con las líneas del puerto, a pie de muelle o en las instalaciones especializadas.
- k) Almacén de artículos peligrosos, es aquel en el que se conservan el aceite para las máquinas, las pinturas, sustancias químicas necesarias en la terminal y que puedan ser inflamables.

1.1.5.4 Sistema operativo

El sistema operativo de la terminal de contenedores integra las maniobras de carga y descarga del buque, así como el acomodo de los contenedores, la entrega de la documentación para la liberación de la carga contenerizada y los flujos de los tractores para cada operación correspondiente. En la operación de una terminal de contenedores se toma en cuenta los siguientes tipos de movimientos generales de los contenedores (López, 1999):

- Operaciones asociadas directamente con la carga y descarga del barco.

- Operaciones terrestres, que comprende el resto de los movimientos, como las entradas y salidas de contenedores vía ferrocarril, movimientos entre patios de almacenamiento y la bodega de consolidación y desconsolidación o la aduana, cambios de posición de contenedores en el patio.
- a) Operaciones de carga y descarga: comprende el proceso de transferencia de los contenedores entre los patios de almacenamiento y las grúas de muelle para la carga del barco, o viceversa.
- El sentido del flujo de los contenedores viene determinado por el sentido del atraque de los barcos en el muelle, ya que en los barcos los contenedores deben estar orientados con las puertas hacia la popa (SCT, 2014).
- b) Operaciones terrestres: los movimientos que se realizan en el patio, las entradas y salidas terrestres, constituyen las operaciones terrestres. Dependiendo de la terminal se encontrarán diversos tipos de movimiento, pero los más comunes son:
- Salidas y llegadas de contenedores por medio de camiones.
 - Salidas y llegadas de contenedores por medio de ferrocarril.
 - Movimiento de contenedores entre distintas posiciones del patio.
 - Movimientos entre el patio y la aduana.
 - Movimientos entre el patio y el almacén.

Las operaciones terrestres realizan cuatro actividades principales dentro del puerto, las cuales son (López, 1999):

1. Operaciones de manejo de contenedores, consisten en una serie de distintas actividades interrelacionadas, que dependen de las características particulares del servicio contratado para el contenedor.
2. Operación del buque, consiste en la carga y descarga de contenedores entre el buque y el muelle. Puesto que todos los contenedores deben pasar por esta operación, esta actividad sin lugar a dudas, determina el ritmo de la operación de la terminal.

3. Operación de transferencia de muelle, son los movimientos entre el muelle y playa o área de almacenamiento, inciden directamente en el ritmo de carga y descarga del buque.
4. Operaciones de recepción y remisión, en esta actividad los contenedores son transportados entre la playa de contenedores y los puntos de intercambio (terrestre, ferroviario o fluvial), y en caso del transporte terrestre, a las casetas de control donde se cumplen las formalidades.

1.1.5.5 Operación portuaria

Se entiende por operación portuaria como el conjunto de actividades organizadas, estructurales y complementarias, realizadas por personas o grupos de personas, y que contribuyen a lo largo de los objetivos funcionales del puerto (UNCTAD, 2010).

Las actividades más importantes que constituyen la operación portuaria pueden clasificarse en tres grupos (CGPMM, 2008):

- a) Las destinadas a atender el barco.
- b) Las realizadas en la frontera tierra-mar.
- c) Las ejecutadas en tierra.

En la primera clasificación se encuentran todos aquellos servicios y operaciones destinadas a atender el barco, y comprenden desde las ayudas que requiere el barco en su entrada al puerto, hasta que sale de él. Una vez que se han realizado todas las maniobras de carga y descarga y otras relacionadas con sus movimientos dentro del puerto (CGPMM, 2008).

Las segundas se refieren principalmente a la transferencia de la carga de tierra a barco y viceversa, en tanto que las terceras comprenden una serie de operaciones básicas como el almacenamiento y otras complementarias, actualmente llamadas de valor agregado, incluyendo la consolidación y desconsolidación de contenedores, limpieza y reparación (CGPMM, 2008).

La planeación de las operaciones portuarias abarca ámbitos temporales diferentes, incluye desde la asignación de posición de atraque para los barcos que arriben hasta la evaluación total de las operaciones una vez que el buque haya zarpado. Este ciclo se puede dividir en tres etapas (UNCTAD, 2010):

- a) Antes del arribo del barco, comprende la asignación de posición y planeación de carga y descarga.
- b) Cuando el barco atracó, agrupa actividades de control, organización y supervisión de las maniobras de carga y descarga y los servicios al barco durante el tiempo que permanezca en el muelle.
- c) Cuando el barco zarpó, se evalúan los resultados de las operaciones anteriores.

Los rendimientos de las operaciones de carga y descarga, así como los servicios prestados al barco son eficientes en la medida de que dicha planeación de operaciones este bien coordinado entre todos los actores del puerto (UNCTAD, 2010).

1.2 Los Puertos Marítimos y su Importancia con el Comercio Internacional

Para contextualizar el problema de la eficiencia portuaria es necesario hablar del comercio, ya que éste es debido al transporte², el comercio es una actividad tan antigua como la humanidad misma. Tan pronto como un individuo tuvo control o posesión de alguna pertenencia de otra persona que necesitaba o deseaba, se iniciaron las relaciones de intercambio. Las caravanas que hacían extensos recorridos en busca de productos exóticos eran capaces de realizar viajes cada vez más lejos. Una parte fundamental para el comercio es el transporte, ya que, para la empresa, el transporte es mucha más que un simple concepto teórico, es un factor de ventaja o desventaja competitiva, al brindarle oportunidad de posicionar los productos en un mercado determinado, en las mejores condiciones posibles de tiempo y precio (Portales, 2012).

²Se define como el movimiento de personas, materiales o productos, desde el punto de se producen, cultivan, o elaboran, a otro donde se consumen, transforman, manufacturan, distribuyen o almacenan (Portales, 2012).

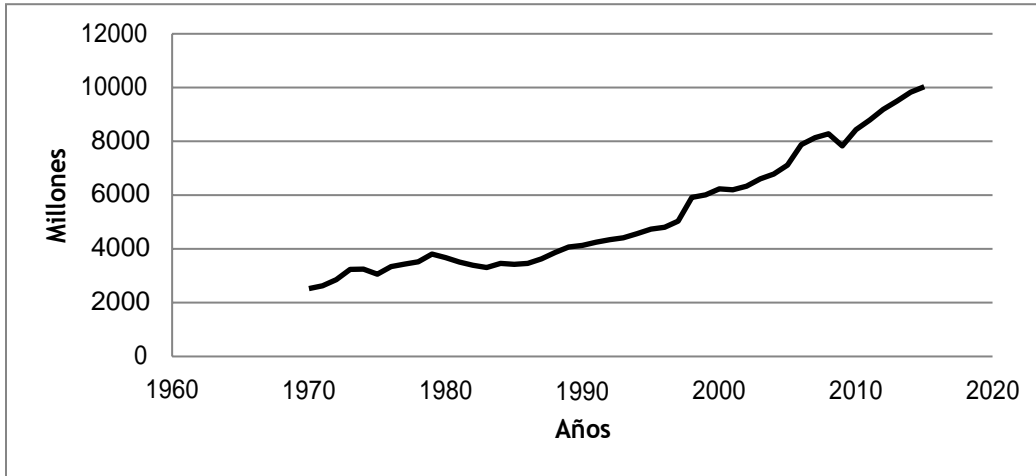
Es relevante indicar que el transporte es uno de los cuatro pilares de la globalización junto con las telecomunicaciones, la liberación del comercio y la estandarización internacional de normas y procedimientos (Hoffmann, 2003). El transporte de mercancías, es de gran importancia en el comercio internacional y por este medio es uno de los más utilizados en la actualidad y para poder llevar a cabo este tipo de comercio es necesario fabricar un buque que se acomode a las necesidades de las mercancías y de que estas lleguen de manera adecuada al lugar en donde se encuentra el comprador, para una entrega adecuada en la actualidad se utilizan diferentes tipos de embarcaciones, los cuales se diseñan de acuerdo a la carga que transportan para que así el cliente se sienta más seguro de que su mercancía llegara en buen estado (López, 2003).

El crecimiento económico medido por el Producto Interno Bruto (PIB), el comercio de mercancías y el tráfico³ marítimo están interrelacionados, por ello los volúmenes del tráfico marítimo se ampliaron a una tasa del 3.4%, el volumen de mercancías creció más de 300 millones de toneladas, y ascendió en total a 9.840 millones de dólares, es decir, aproximadamente cuatro quintas partes del comercio mundial de mercancías (UNCTAD, 2015).

Los resultados del comercio marítimo mundial en 2014 fueron configurados por diversas tendencias, entre ellas un crecimiento más equilibrado de la demanda de comercio y el uso más amplio de la navegación lenta (UNCTAD, 2015). El transporte marítimo se puede considerar como uno de los más importantes, representa la columna vertebral del comercio internacional, ya que por medio de este medio de transporte se maneja el 90% del comercio en todo el mundo (IMO, 2014). Aunado con lo dicho anteriormente en la gráfica 1 podemos ver cómo ha evolucionado el comercio marítimo y como va cobrando fuerza.

³Podemos definir al tráfico como el conjunto de actividades necesarias para llevar un producto de un lugar a otro (Portales, 2012).

Gráfica 1. Comercio Marítimo en el Mundo, 1970-2015.
Toneladas métricas



Fuente: Elaboración propia con base en UNCAD, 2015.

Según el *World Shipping Council* (WSC por sus siglas en inglés):

“el transporte marítimo es el modo más eficiente de transporte de mercancías. En un año, un único y gran buque portacontenedores podría llevar a más de 200,000 contenedores de carga. Del mismo modo, en un solo viaje, algunos barcos transportadores de automóviles pueden manejar 7.600 coches. Se requeriría cientos de aviones de carga, muchos miles de vagones de ferrocarril, y flotas de camiones para transportar las mercancías” (WSC, 2016).

En 2000 el tráfico de contenedores era de 224, 774, 536 y paso a 679, 264, 658 en 2104, creciendo más del 300% (Banco mundial, 2016). Además, es relevante conocer que el 52% del valor comercial de los envíos marítimos son a causa del transporte de contenedores (WSC, 2016).

Tradicionalmente los puertos han sido lugares de resguardo de las embarcaciones en los que se podían desarrollar con facilidad las operaciones de carga, descarga, embarque y desembarque. Hoy en día, las funciones típicas que desarrolla un puerto incluyen además de la carga y descarga de la mercancía de los buques y el

embarque y desembarque de pasajeros (actividades que constituyen la transferencia entre los modos marítimo y terrestre de transporte), la manipulación de mercancías, su depósito y almacenaje, la inspección y el control de la mercancía por parte de las administraciones públicas (aduana, sanidad,...), la consolidación y desconsolidación de cargas, los servicios de apoyo a los buques (aprovisionamiento, reparación, servicios auxiliares, atención de tripulaciones,...), así como servicios de valor añadido y de gestión de la información que se intercambia entre los diferentes agentes que intervienen en todas estas actividades (Rúa, 2006)

Cabe destacar que el puerto marítimo es uno de los eslabones más importante en la cadena del comercio internacional, ya que a través de este se realiza la conexión de su zona de influencia terrestres con el exterior. Esta zona de influencia es parte de la situación geográfica y su proximidad a las zonas de producción en el caso de que el puerto sea exportador, o a las zonas intensamente pobladas en el caso que este sea importador, son aspectos fundamentales para su viabilidad. Así pues, los puertos son considerados el portal de entrada, enlace y salida de las operaciones de comercio exterior de una región determinada. También son parte de un gran conglomerado, donde participan diversos actores, algunos de éstos son: los tipos de explotación de los medios de transportes utilizados, el aspecto jurídico del puerto, las zonas de influencia portuaria, etc. Las zonas de influencia pueden ser del tipo industriales y otras en cambio son regiones especializadas en producción agrícola (Carbone et. al., 2013).

Es de suma importancia recalcar que la actividad portuaria contribuye a la independencia económica de las naciones y representa un factor estratégico en el comercio internacional. Los puertos contribuyen al desarrollo de los países, no sólo por el hecho de jugar un papel esencial en el tráfico exterior, sino porque también actúan como promotores del crecimiento de las áreas en las que están emplazados, promueven determinados tráficos, generan ingresos para el estado, crean empleo (Rúa, 2006).

La relevancia económica de los puertos procede del hecho de que la mayor parte del comercio exterior de una región se realiza vía marítima. El nivel de eficiencia de los puertos afecta en gran medida a la competitividad de los países. Ello es debido a que los puertos constituyen un enlace relevante en la cadena de transporte, por lo que si actúan de forma eficiente se consiguen menores precios de exportación, lo que a su vez favorece la competitividad de los productos en los mercados internacionales. Para mantener una posición competitiva en dichos mercados, las naciones necesitan conocer los factores que condicionan la eficiencia de los puertos y establecer comparaciones continuas de la eficiencia entre los puertos que integran el sector nacional y también con los puertos de otras regiones (González, 2004).

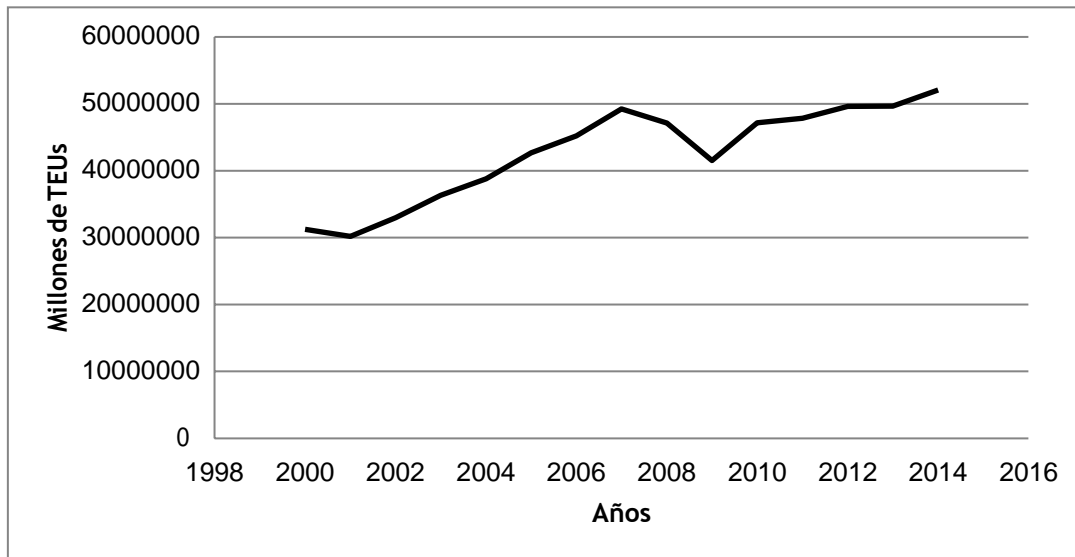
En la actualidad, existen factores que hacen exitosos a los puertos, como son las rutas internacionales, la presencia en su zona de influencia, los convenios comerciales internacionales (Díaz, 2008). Sin duda es necesario conocer aquellos factores que hacen eficiente un puerto y lo posicionan a nivel mundial.

1.2.1 Los puertos en América del Norte

En 2015, América del Norte contribuyó positivamente al crecimiento de las importaciones mundiales (1,1%), así mismo, aunque la contribución de América del Norte al crecimiento de las exportaciones en términos de volumen fue prácticamente nula en 2015, se considera que sigue siendo una región muy dinámica (OMC, 2016).

Cabe destacar que la movilización de contenedores ha ido en aumento, la carga movilizada en contenedores de América del Norte paso de 49, 655, 311 a 52, 066, 528 del 2014 al 2015, la gráfica 2 nos muestra el crecimiento del tráfico marítimo de contenedores en América del Norte (Banco Mundial, 2016).

Gráfica 2. Tráfico marítimo de contenedores en la región de América del Norte, 2000-2014. Millones de TEU's



Fuente: Elaboración propia con base en Banco Mundial, 2016.

Dentro del crecimiento mundial de la carga contenerizada, en América del Norte, al 2008, solo 3 puertos están evaluados dentro de los 25 puertos con mayor movimiento de carga TEUS. Estos son Los Ángeles, Long Beach y Nueva York (WSC, 2015). Esto puede deberse a que Estados Unidos es líder en importaciones y exportaciones respecto a México y Canadá (OMC, 2016).

Para darnos una idea mucho más precisa de la importancia que tienen los puertos en América del Norte, es necesario conocer cómo están compuestos los flujos comerciales de las naciones que la conforman. Así los flujos comerciales que tuvo Estados Unidos en el 2015 se comportaron de la siguiente manera: exportaciones por \$1.633 trillones de dólares y las importaciones por 2.374 trillones de dólares, cabe mencionar que sus principales socios para las exportaciones son Canadá y México, con un 19.2% y 14.8% respectivamente, sin embargo el 7.6% de sus exportaciones son enviadas a China, cabe destacar que casi el 20% de sus importaciones provienen de China, por lo que se puede concluir que el comercio vía marítima es de mucha importancia (CIA, 2016). La WSC (2015) catalogó a Estados

Unidos en el año 2014 como el segundo país con más exportaciones realizadas en contenedores de carga, con 11.9 millones de TEUs, por el lado de las importaciones fue catalogado en el primer puesto con 19.6 millones de TEUs.

En el 2011 el flujo económico de Canadá se encuentra compuesto de la siguiente manera: exportaciones (excluyendo a Estados Unidos) fueron de 117,372 millones de dólares, de los cuales 64.5 % se comercializó por vía marítima; importaciones (excluyendo a Estados Unidos) fueron 224,901 millones de dólares y el 43.4 % se comercializó por vía marítima (Government of Canada, 2011). Canadá se encuentra posicionado en el lugar número 17 de los principales exportadores de contenedores de carga con 1.7 millones de TEUs⁴ (WSC, 2015).

Por su parte en México el 67% del movimiento de carga está concentrado en 16 puertos comerciales, de los cuales los más importantes, Manzanillo, Lázaro Cárdenas, Altamira y Veracruz, operan el 96% de la carga contenerizada. Del total de puertos que están habilitados en nuestro país, 17% son puertos petroleros, el 73% realiza actividades pesqueras, el 40% se dedica a movimientos comerciales y un 35% realiza actividades turísticas (SCT, 2014). Las exportaciones de mercancías de la nación mexicana en el año 2014 fueron de 397 506 millones de dólares, de las cuales el 80,2 % se enviaron a Estados Unidos; las importaciones fueron de 411 581 millones de dólares y el 49% provino también de Estados Unidos (OMC, 2015).

CAPÍTULO 2

LA EFICIENCIA EN LOS MÉTODOS NO PARAMÉTRICOS Y PARAMÉTRICOS: UNA RETROSPECTIVA TEÓRICA

Dentro del presente capítulo se exponen los desarrollos teóricos con definiciones y argumentos respecto a la eficiencia y productividad. Se mencionan los métodos para la estimación de la eficiencia y se desarrolla la metodología selecta para su aplicación al problema de investigación.

2.1 Productividad y Eficiencia

Productividad y eficiencia son los dos conceptos más importantes en la medición del desempeño de cualquier empresa. Sin embargo, estos dos conceptos diferentes erróneamente han sido tratados como iguales en la mayoría de la literatura (Carbone et. al., 2013).

2.1.1 Concepto de productividad

Como antecedente del concepto de productividad, se tiene que la primera vez que apareció este concepto fue en el año de 1776 en un artículo escrito por Quesnay. Dicho término adquirió diferentes significados a través de tiempo, cada vez más precisos en relación con lo que se produce y con los medios utilizados (Pedraza y Navarro, 2006). Para Taylor (1908) la productividad queda definida como la relación existente entre la producción obtenida y el trabajo empleado. Sumanth (1979) definió en primera instancia a la productividad como la razón de producción tangible entre insumos tangibles.

Para Case y Fair (1999), la productividad, se puede definir como un proceso por medio del cual se transforman los insumos de entrada y se logra convertirlos en

productos de salida. Los insumos de entrada normalmente se pueden generalizar como recursos de tipo: natural, humano y técnico o tecnológico (herramientas y maquinaria). Los productos de salida, se pueden clasificar en productos tangibles como intangibles, bienes y productos, incluidos los servicios Carbone et. al., 2013).

Según Navarro (2005) si se pudiera tener un proceso productivo en el cual sólo se utilizará un insumo para la producción, con el cual sólo se elaborará un tipo de producto, la productividad del insumo se definiría como el cociente entre cantidades de producto e insumo. Sin embargo, también afirma que dicho proceso es irreal y que aún para las más elementales tareas de producción se requieren múltiples insumos que pueden combinarse de maneras diferentes para obtener el mismo nivel de producción.

Para Koontz y Weihrich (1998) la productividad se define como la relación productos-insumos en un periodo específico con la consideración de la calidad. Así pues, también la productividad se ha definido como la razón entre salidas que son producidas y las entradas que son consumidas en el proceso (IPART, 1999).

Prokopenko (1999) sostiene que la productividad es la relación que existe entre la producción obtenida por un sistema de producción o servicios y aquellos recursos utilizados para obtenerla. Así pues, la productividad queda definida como el uso eficiente de recursos (trabajo, capital, tierra, materiales, energías, información) en la producción de ciertos bienes o servicios. Una productividad mayor representa la obtención de más con la misma cantidad de recursos, o el logro de una mayor producción en volumen y calidad con el mismo insumo. Este autor representa la productividad con la siguiente fórmula:

$$\text{Productividad} = \frac{\text{Producto}}{\text{Insumos}} \quad (2.1)$$

La productividad también se puede definir como la relación entre los resultados y el tiempo que se lleva en conseguirlos, ya que el tiempo es considerado como un buen denominador ya que es una medida universal y está fuera del control humano. Así

pues, cuanto menor tiempo lleve lograr un resultado deseado, más productivo es el sistema (Prokopenko, 1999).

A diferencia de Prokopenko (1999), quien afirma que independientemente del tipo de sistema de producción, económico o político, la definición de productividad sigue siendo la misma; David Sumanth (1990) por su parte asevera que el término de la productividad varía según quien la proporcione, ya sea un economista, un contador, un administrador, un político, un líder sindical o bien un ingeniero, implica la existencia de varios conceptos de productividad:

- a) Productividad parcial, definida como la razón entre la cantidad producida y un solo tipo de insumo.
- b) Productividad del factor total, se define como la razón de la producción neta con la suma asociada de los factores mano de obra y capital.
- c) Productividad total, que es la razón entre la producción total y la suma de todos los factores de insumo, así la medida de la productividad total manifiesta el impacto en conjunto de todos los insumos al fabricar los productos.

Sumanth (1990:4) menciona que la productividad se refiere a “la utilización eficiente de los recursos (insumos) al producir bienes y servicios (productos)”, se ha de recalcar que menciona la palabra eficiente, que va de la mano con el término eficiencia, que para Koontz y Weihrich (1998) se define como el logro de las metas con la menor cantidad de recursos. Por su parte Sumanth (1990) define a la eficiencia como la razón existente entre la producción real obtenida y la producción estándar esperada.

En la misma idea, Malí (1978) relaciona los términos de productividad, eficiencia y efectividad de la siguiente forma:

$$\text{Índice de productividad} = \frac{\text{Producción obtenida}}{\text{Insumo gastado}} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Desempeño alcanzado}}{\text{Recursos consumidos}} \\ &= (\text{Efectividad}) / (\text{Eficiencia}) \end{aligned}$$

Donde la efectividad queda definida como el cumplimiento los objetivos (Koontz y Weihrich, 1998). A través de las relaciones establecidas por Malí (1978) se señala que la eficiencia es un elemento de la productividad, así como la efectividad o eficacia. Así pues, se refiere a qué tan bien se han utilizado los recursos consumidos en cualquier proceso.

Para Navarro (2005) la productividad se puede mejorar debido a las mejoras en la eficiencia, también puede hacerlo a través de los cambios en el entorno productivo o como consecuencia de los cambios tecnológicos. Además, afirma que el concepto de eficiencia se mueve en las siguientes dimensiones:

- La productividad está relacionada con el resultado, mientras que la eficiencia se relaciona con el producto efectivo.
- La eficiencia vista desde una perspectiva económica se define como el componente de la productividad que es atribuida a la responsabilidad propia de la gestión y actuación profesional de una unidad de producción.
- Por último, es necesario la adopción de un enfoque dinámico para analizar cualquier proceso productivo. De esta forma la eficiencia es un concepto incluido en el concepto más amplio de la productividad, siendo una parte de la otra.

Lo anterior demuestra la evolución del término de productividad y la tendencia general de asociarla con los resultados a partir de los insumos; así pues, hemos visto que la productividad es asociada con la producción y la eficiencia, cabe destacar que estos términos no son equivalentes y hay que tenerlo siempre en cuenta.

2.1.1.1 Productividad total de los factores

Como se describió en la sección anterior, la productividad hace referencia a la producción y los insumos requeridos. La finalidad de medir la productividad radica en la necesidad de realizar comparaciones con otras empresas, sectores productivos, en el ámbito nacional o internacional. Así pues, las medidas de productividad son herramientas fundamentales para entender y evaluar la productividad. En la mayoría de los trabajos se acostumbra medir la productividad por medio del trabajo y la productividad de acuerdo al capital (Pedraza y Navarro, 2006).

Es de suma importancia mencionar que existen dos conceptos básicos en la literatura sobre la productividad: la productividad laboral y la productividad total de los factores (PTF). La productividad laboral es considerada como una medida de eficiencia del trabajador en la generación del producto (Pedraza y Navarro, 2006). En cambio, la PTF se refiere a la razón de la producción neta con la suma asociada con los factores de insumos de mano de obra y capital (Sumanth, 1994). Por su parte Comin (2010) la define como la porción del producto no explicada por la cantidad de los insumos utilizados en la producción. Como tal, su nivel está determinado por la eficiencia e intensamente las entradas se utilizan en producción.

La PTF es una medida que va más allá de la productividad laboral, ya que contempla la medición de la eficiencia del factor trabajo, pero además cuantifica la eficiencia con la que se usa el capital, otro factor esencial de la producción (Hernández, 1985).

Solow (1957) fue quien contribuyó a establecer el factor total de la productividad como un concepto operacional, a partir de la función de producción. Define la función de producción agregada como:

$$Q = F(K, L; t) \tag{2.3}$$

Donde Q = producción, K = insumo de capital, L = insumo de mano de obra; K y L representan los insumos de capital y mano de obra en unidades físicas, y t representa el tiempo y aparece en F para considerar el cambio técnico.

El crecimiento de la PTF se mide generalmente por el residuo de Solow elaborado en su trabajo «*Technical change and the aggregate production function*» en el año de 1957. Donde g_y denota la tasa de crecimiento de la producción agregada, g_K la tasa de crecimiento del capital agregado, g_L la tasa de crecimiento de la mano de obra agregada, y α la participación de capital, así pues, el residuo de Solow queda definido como $\Delta \ln Y - \alpha \Delta \ln K - (1 - \alpha) \Delta \ln L$. El residuo de Solow mide con precisión el crecimiento de la PPTF si (a) la función de producción es Cobb-Douglas, (b) si existe la perfecta competencia de los factores en el mercado, y (c) las tasas de crecimiento del producto y los insumos son medidas con precisión (Comin, 2010).

Por su parte en los diferentes trabajos desarrollados por Kendrick (1961), midió la productividad de los sectores agrícola, manufacturero, comercial, financiero, de transporte y de servicios públicos en Estados Unidos tomando como punto de partida una función de producción del tipo $Q = f(X_1, \dots, X_n)$, donde Q es igual al valor agregado y (X_1, \dots, X_n) es igual a n factores tangibles que son utilizados en la producción. Además, construyó un índice de la PTF con el que cuantificó la productividad de la industria manufacturera de Estados Unidos para el periodo 1889-1957. Para Kendrick (1961), la PTF es una relación entre el producto real y los insumos:

$$\text{Productividad total del capital y mano de obra} = \frac{\text{producción } n}{\text{mano de obra} + \text{capital}} \quad (2.4)$$

En donde el insumo de mano de obra = horas-hombre ajustadas según los cambios en la calidad de la mano de obra, por su parte el insumo de capital = inventario neto de estructuras + equipo en las plantas + inventarios + capital de trabajo + terrenos.

Para Navarro (1995) existen dos enfoques sobre la PTF, en el primero, la productividad total de los factores viene a ser una medida de cambio técnico calculado mediante el uso de modelos econométricos. El segundo enfoque considera la considera como una medida de eficiencia productiva y propone el uso de métodos basados en números índices principalmente.

El estudio de la PTF en la teoría económica se basa en la idea de una función de producción como una representación de la tecnología actual en un periodo de tiempo dado, el cual indica la salida máxima que puede ser factible obtener a partir de un conjunto dado de factores y el estado tecnológico. Este concepto se interpreta generalmente como una frontera que limita el potencial productivo de la empresa. Así pues, se puede asociar a un cambio técnico con un cambio en esta frontera, mientras que una mejora en la eficiencia puede ser entendida como una reducción en la distancia de esta frontera por la combinación de una firma de factores y productos. El progreso técnico por lo general se asocia con una serie de innovaciones y cambios en las técnicas de producción o de gestión, mientras que la eficiencia técnica es la capacidad de la empresa para gestionar sus recursos y para adaptarse al medio ambiente y las condiciones en las que opera la empresa. Por lo tanto, las mejoras en la productividad pueden ser desglosadas en los cambios en la eficiencia y el progreso técnico (Coelli *et. al.*, 2005).

Una manera de medirla es a través de la elaboración de índices, de los cuales destacan: el de Laspeyres (1871), el de Fisher (1922), el de Törnqvist (1936) y el de Malmquist (1953) (Coelli *et. al.*, 2005).

Todos ellos miden el cambio en los niveles de un conjunto de variables entre un periodo base y el actual; el índice de Laspeyres (1871) usa las cantidades o precios de un periodo base como pesos; el índice de Fisher (1922) utiliza la media geométrica de los dos índices; el índice de Törnqvist (1936) usa datos de precios y cantidades en dos periodos que pueden calcularse dividiendo el gasto total en cada periodo, por el índice de cantidades. La ventaja del Malmquist (1953) es que se puede descomponer el índice de la PTF en cambio tecnológico y cambio en la eficiencia técnica.

2.1.2 Conceptos de eficiencia

El concepto de eficiencia está directamente relacionado con la medida de la productividad; sin embargo, éstos son diferentes. La productividad puede ser

definida como la cantidad de producción obtenida por unidad de factores de producción usados para obtenerlas (Parkin, 1995). Por su parte, la eficiencia descansa en la comparación de los valores observados de productos y factores con unos valores óptimos relativos, que proceden de la evidencia proporcionada por otras empresas, es decir que una empresa puede ser técnicamente eficiente, pero todavía ser capaz de incrementar su productividad al explotar por ejemplo economías de escala (Coelli *et. al.*, 1998).

La eficiencia puede definirse como la productividad relativa en el tiempo o el espacio, o ambos. Por ejemplo, se pueden dividir en medidas de eficiencia intra e inter empresa. La primera consiste en medir el uso del potencial de la empresa de producción propia mediante el cálculo del nivel de productividad en relación a un tiempo específico de la empresa, que se refiere al conjunto de los máximos resultados, dado el diferente nivel de insumos. La segunda, mide el rendimiento de una empresa en particular con respecto a su mejor competidor disponible en la industria (Lansik *et. al.*, 2001).

En palabras de la Intervención General de la Administración del Estado (IGAE) (1997) la eficiencia queda definida como el grado de optimización del resultado obtenido en relación con los recursos empleados. La eficiencia se puede definir como: relación existente entre bienes y servicios consumidos y los bienes y servicios producidos, en otras palabras, los servicios prestados en relación con los recursos empleados (AECA, 1997).

El concepto de eficiencia está relacionado con la economía de recursos, por lo que es frecuentemente definida como la relación entre los resultados obtenidos (outputs) y los recursos utilizados (inputs), por ello la eficiencia será en cualquier caso una magnitud multidimensional (Coll y Blasco, 2006). En palabras de Navarro (2005), la eficiencia involucra la maximización del beneficio y la minimización de los costos.

Farrell (1957) propuso que se visualice la eficiencia desde una perspectiva real y no ideal, donde cada firma o unidad productiva sea evaluada en relación a otras tomadas de un grupo representativo y homogéneo. De esta forma, la medida de la

eficiencia será relativa y no absoluta, donde el valor agregado de eficiencia para una firma determinada corresponde a una expresión de la desviación observada respecto a aquellas consideradas como eficientes.

Otra gran aportación de Farrell (1957) fue la división de la eficiencia en dos aparatos: la eficiencia técnica y la eficiencia *asignativa*. Arzubi y Berbel (2002) establece que el producto de ambas eficiencias provee una medida de la eficiencia económica, que se define como una medición de unidades de producto (o logro o efecto, impacto) por costo de los diversos insumos y recursos necesarios para generarlo. La eficiencia económica permite agrupar los diversos insumos con la unidad de medida monetaria (Mokate, 1999).

Los conceptos de eficiencia técnica, eficiencia *asignativa* y eficiencia global introducidos por Farrell (1957) son desarrollados en las secciones posteriores.

2.1.2.1 Eficiencia global

La eficiencia global, también se le llama eficiencia económica, que es considerada como el logro de la máxima producción al menor costo (Pinzón, 2003). Palomares (2004) define a la eficiencia económica como la capacidad con que la empresa utiliza los factores de producción de forma óptima desde el punto de vista económico. Esta situación será la del mínimo coste para producir unos productos, dados unos precios para los factores y los productos. Dicha eficiencia nos vendrá dada por la relación entre el coste mínimo (frontera) y el coste real soportado. García (2002), por su parte afirma que, la eficiencia económica se tiene cuando una empresa o firma desea cumplir con un objetivo económico se encuentra ante diversas opciones:

- Si una firma intenta minimizar el costo de producción, se habla de eficiencia de costos. Esta eficiencia indica el menor costo a través del cual las empresas pueden conseguir cada nivel de producción, dada la tecnología y los precios de los factores productivos.

- Si el objetivo consiste en maximizar el ingreso, se tiene eficiencia en el ingreso, la cual es posible conseguir a partir de los factores del proceso de producción, considerando los precios a los cuales se venden los productos.
- Finalmente, si la empresa maximiza los beneficios, requiere que se obtenga el máximo ingreso al mínimo costo, pero además es necesario que la empresa adopte el tamaño más adecuado para aprovechar las economías de escala.

Para que exista tanto la eficiencia en costos, ingresos y beneficios, García (2002) afirma que es necesario que se proporcione tanto la eficiencia técnica como la *asignativa*.

La eficiencia global es la longitud que va desde el origen hasta el punto que representa la unidad considerada. Se obtiene mediante el cociente entre la longitud de la línea que va desde el origen hasta el punto proyectado sobre el isocosto eficiente y la longitud de la línea que va desde el origen hasta el punto que representa a la unidad considerada, para ejemplificar lo anterior consideremos una unidad productiva D, la eficiencia global vendrá dada por (véase figura 1):

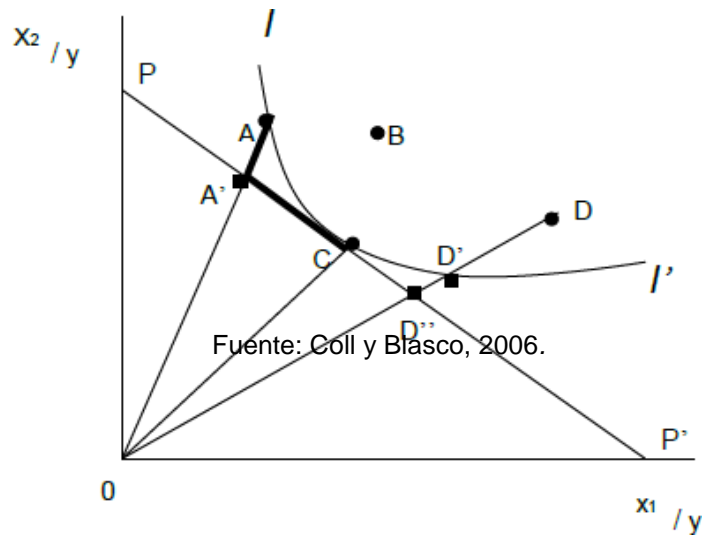
$$\text{Eficiencia Global} = EG_D = \frac{OD''}{OD} \quad (2.5)$$

Continuando con esta misma Unidad, Farrell (1957) descompuso la eficiencia global de la siguiente forma:

$$\text{Eficiencia Global (Eficiencia económica)} = \frac{OD''}{OD} = \frac{OD'}{OD} * \frac{OD''}{OD'} \quad (2.6)$$

Es decir, la eficiencia global (EG) es igual al producto de la eficiencia técnica (ET) $\frac{OD''}{OD'}$ y la eficiencia precio (EP) $\frac{OD'}{OD}$ y como sucedía con éstas, su valor estará comprendido entre cero y uno.

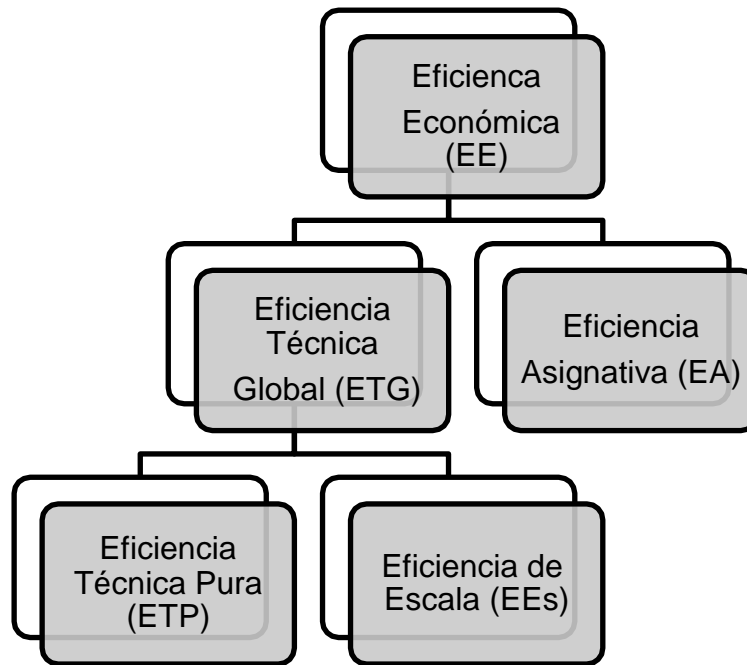
Figura 1. Eficiencia Global



Fuente: Coll y Blasco, 2006.

La eficiencia global o económica en forma desagregada se puede ilustrar en la siguiente figura (Giménez, 2011):

Figura 2. Componentes de la Eficiencia Global



Fuente: Elaboración propia con base en Giménez, 2011.

2.1.2.2 Eficiencia técnica

La teoría de la eficiencia técnica se remonta hasta los años 50, cuando Tjalling C. Koopmans y Gerard Debreu en 1951 comienzan sus investigaciones con relación al uso eficiente de los recursos empresariales y al análisis de producción. Koopmans (1951) fue quien dio por primera vez una definición de eficiencia productiva. Centrándose en la eficiencia técnica, afirmó que una combinación factible de recursos y productos es técnicamente eficiente, si es tecnológicamente imposible aumentar algún producto o reducir algún recurso sin reducir simultáneamente al menos otro producto o aumentar al menos otro recurso.

Debreu (1951) y Farrell (1957) conceptualizaron a la eficiencia técnica como la diferencia entre uno y un cociente que representa la mayor reducción proporcional en todos los *inputs* que aún permite la producción de todos los *outputs*, o como uno más el mayor incremento proporcional permitido en todos los *outputs* con el mismo consumo de *inputs*.

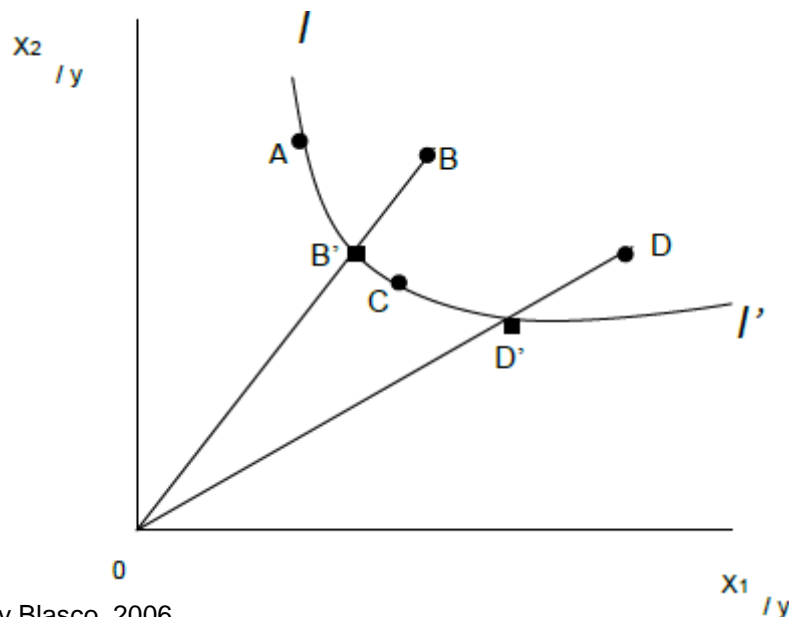
Por su parte Alé (1990) señala que la eficiencia técnica consiste en obtener la máxima producción física factible, dada la tecnología existente, a partir de una cierta cantidad de insumos. De acuerdo a lo antes mencionado la tecnología se torna clave para entender el término de eficiencia técnica.

Para González-Páramo (1995) afirma que la eficiencia productiva o eficiencia técnica de una empresa está dada por su capacidad para transformar unos *inputs* (trabajo, capital y otros factores) en *outputs* (bienes o servicios) en el contexto de una tecnología, que puede sintetizarse mediante una función de producción, que marca el valor máximo o “frontera” de *output* alcanzable a partir de diversas combinaciones de *inputs*.

Por su parte Trillo (2005) menciona que el estudio de la eficiencia técnica centra su atención en el uso de los recursos humanos o de capital en la producción de uno o varios bienes y servicios. Es decir, se basa en utilizar unidades físicas, lo que implica que queda fuera del análisis el costo o precio de los factores y la valoración de los ingresos obtenidos de la producción.

Para Coll y Blasco (2006) la eficiencia técnica queda representada de la siguiente manera: Considérense cuatro unidades (A, B, C y D) cada una de las cuales obtiene un único *output* y empleando para ello dos *inputs* (x_1 y x_2). En la Figura 3 cada punto representa las coordenadas del “plan de producción” (x_1/y , x_2/y) observado para cada una de las referidas Unidades. La isocuanta unidad de las DMU’s eficientes viene representada por la curva II' , de tal modo que aquellas que se encuentran por encima de la misma resultan ineficientes.

Figura 3. Eficiencia Técnica



Fuente: Coll y Blasco, 2006.

Así, Coll y Blasco (2006) afirman que la eficiencia técnica, que pone de manifiesto la capacidad que tiene una Unidad para obtener el máximo Output a partir de un conjunto dado de Inputs, se obtiene al comparar el valor observado de cada DMU con el valor óptimo que viene definido por la frontera de producción estimada (isocuanta eficiente).

En la Figura 3 puede verse que tanto la unidad B como la D son ineficientes técnicamente, puesto que ambas podrían reducir la cantidad de Inputs consumidos

y seguir produciendo una unidad de Output. La ineficiencia de estas unidades vendrá dada por la distancia BB' y DD' , respectivamente. Por el contrario, las unidades A y C son técnicamente eficientes puesto que operan sobre la isocuanta eficiente. Numéricamente puede obtenerse la puntuación de eficiencia técnica como la relación entre la longitud de la línea desde el origen hasta el punto proyectado sobre la isocuanta eficiente de la unidad considerada y la longitud de la línea que une el origen a la Unidad considerada. Así, para B se tiene:

$$\text{Eficiencia técnica} = ET = \frac{OB'}{OB} \quad (2.7)$$

A partir del trabajo inicial de Farrell (1957), Banker, Charnes y Cooper (1984) dividieron la eficiencia técnica en eficiencia técnica pura y eficiencia de escala. La eficiencia técnica pura muestra en qué medida la unidad productiva analizada está extrayendo el máximo rendimiento de los recursos físicos a su disposición. Mientras que la eficiencia de escala es relevante cuando la tecnología en la producción presenta rendimientos de escala variables. Este tipo de eficiencia muestra si la unidad productiva analizada ha logrado alcanzar el punto óptimo de escala. Los rendimientos de escala se obtienen al aumentar proporcionalmente la cantidad de todos los factores que intervienen en la función de producción. Según Varian (1998) existen tres tipos de rendimientos de escala:

- Rendimientos constantes a escala. Significa que si se incrementa la cantidad de cada uno de los factores, la producción aumenta en la misma proporción.
- Rendimientos crecientes a escala. Implica que si se incrementa la cantidad de cada uno de los factores, la producción aumenta en una proporción mayor.
- Rendimientos decrecientes a escala. Se presentan cuando al incrementarse la cantidad de cada uno de los factores, la producción aumenta en una menor proporción.

De esta forma, la eficiencia técnica global es el producto de las eficiencias técnica pura y de escala. Partiendo del concepto de eficiencia técnica, se considera a la tecnología como un elemento clave para entender éste término. Las empresas se enfrentan a restricciones tecnológicas, puesto que sólo existen algunas

combinaciones de factores viables para obtener una cantidad dada de producción, por lo que las empresas deben limitarse a adoptar planes de producción que sean factibles desde un punto de vista tecnológico. Así, al conjunto de todas las combinaciones de factores y de productos tecnológicamente factibles, se le denomina conjunto de producción (Varian 1998).

Navarro (2005) explica que la ineficiencia técnica, productiva o global se debe a algún problema relacionado con la organización de tareas por parte del responsable de la gestión. En lugar de utilizar la denominación tradicional de "ineficiencia técnica" o "ineficiencia productiva", Leibenstein (1966) introdujo el término "ineficiencia X" para referirse a la pérdida de output o el exceso de costo que se produce como consecuencia de las carencias de motivación existentes entre los individuos que configuran la organización.

La hipótesis detrás de la noción de ineficiencia X postula que la motivación que los miembros de la empresa reciben para reducir costes proviene de la presión ejercida desde el exterior. Los directivos de una empresa inmersa en un mercado altamente competitivo se sienten más presionados, incrementando este hecho su motivación para tratar de reducir el coste al mínimo posible, mientras que a medida que las condiciones estructurales ejercen menor presión competitiva la motivación es menor (Leibenstein, 1966).

González (1999) comenta que el supuesto es que la empresa no maximiza el beneficio, sino que se conforma con unos resultados "aceptables" mientras no perciba un estímulo de la suficiente intensidad como para mejorar sus resultados (como puede ser una creciente presión de la competencia). Por otra parte, los directivos no actúan de manera omnisciente, sino que se apoyan en informes sobre las desviaciones con respecto al presupuesto. Sólo en el caso de que se perciban desviaciones suficientemente grandes se desencadena una respuesta orientada a atajar los posibles problemas y mejorar en términos de costes. Si los resultados son buenos (es decir los esperados o mejores) no existe la motivación suficiente para buscar posibles mejoras, aunque tal posibilidad realmente exista.

2.1.2.3 Eficiencia *asignativa*

El otro componente que integra la eficiencia económica es la eficiencia *asignativa*, también conocida como eficiencia de precios, fue introducida por Farrell (1957) pudiéndose calcular cuando los precios de los insumos o de los productos son conocidos, así pues la eficiencia *asignativa* de los *inputs* refleja la combinación de insumos en óptimas proporciones dado los precios de los mismos, de manera similar cuando se conocen los precios de los *outputs*, se puede calcular la eficiencia de ingresos y de manera global teniendo los precios de ambos se puede calcular la eficiencia de las ganancias. Citando a Navarro (2005) la eficiencia *asignativa* tiene su base en la teoría microeconómica, donde existe en la asignación cuando no se desperdician recursos, y además se cumple con el principio óptimo de Pareto. Deben cumplirse tres condiciones básicas para lograr la eficiencia en la asignación (Parkin, 1995):

- Eficiencia económica. Implica la eficiencia tecnológica (o técnica), así como utilizar los factores de producción en proporciones que minimicen costos.
- Eficiencia del consumidor. Ocurre cuando los consumidores no logran mejorar asignando de nuevo sus presupuestos.
- Igualdad del costo marginal (costo de producir una unidad adicional de producto, incluyendo los costos externos) y de beneficio social marginal (valor del beneficio de una unidad adicional de consumo, incluyendo beneficios externos).

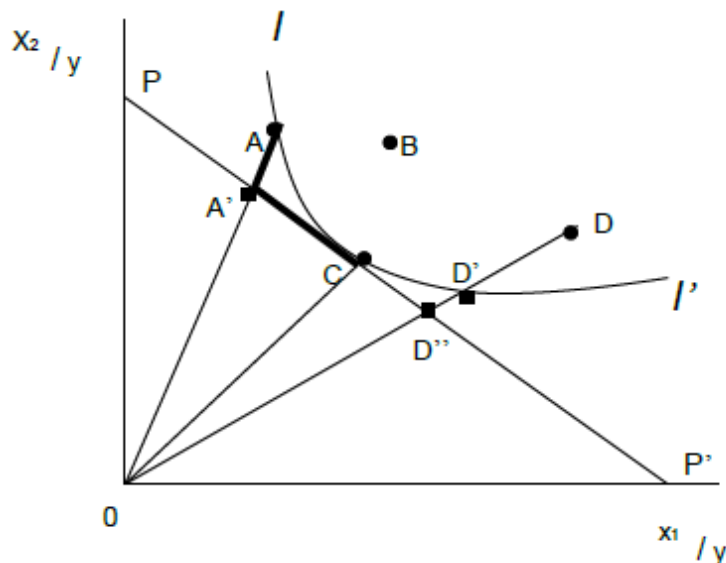
Hernández (1985) sostiene que la eficiencia *asignativa* se refiere a la asignación de recursos, correspondiendo al criterio de asignar una cantidad fija de recursos entre situaciones alternativas con el propósito de maximizar la cantidad de producto. Otra definición la encontramos en palabras de Alé (1990) quien menciona que la eficiencia *asignativa* o de costos se refiere a que el gasto monetario total en insumos utilizados para producir una cantidad dada de bienes sea el mínimo posible de acuerdo a los precios de los insumos. Así mismo Bosch (1999) señala que existe eficiencia *asignativa* cuando el administrador de una unidad productiva ha sabido no sólo alcanzar el conjunto frontera de producción, sino además lo hizo eligiendo

aquella combinación de factores que le permite minimizar los costos incurridos para un nivel de producción dado.

Se entiende por eficiencia *asignativa*, citando a Navarro (2005), que las señales de precios deben ser eficientes en términos económicos, por lo tanto, deben aproximarse a una asignación óptima de Pareto.

Por su parte Coll y Blasco (2006) definen la eficiencia *asignativa* se refiere a la capacidad de la unidad productiva para usar los distintos *Inputs* en proporciones óptimas dados sus precios relativos. Siguiendo con este planteamiento, en la Figura 4 se muestra la línea de isocoste PP' . La pendiente de la isocoste representa la relación entre los precios de los Inputs x_1 y x_2 .

Figura 4. Eficiencia *Asignativa*



Fuente: Coll y Blasco, 2006.

Las Unidades A y C presentan eficiencia técnica puesto que operan sobre la isocuanta eficiente. Sin embargo, como puede observarse en la Figura 4, únicamente la Unidad C resulta ser también eficiente en precios, en tanto que la

Unidad A debería reducir los costes totales en la distancia A”A para ser eficiente en precio.

La puntuación de eficiencia precio (o *asignativa*) puede obtenerse como la relación entre la longitud de la línea desde el origen hasta el punto proyectado sobre la isocoste eficiente de la unidad considerada y la longitud de la línea que une el origen al punto proyectado sobre la isocuanta eficiente de la Unidad considerada. Así, para la Unidad A se tiene que la eficiencia precio vendrá dada por:

$$\text{Eficiencia precio} = EP = \frac{OA''}{OA} \quad (2.8)$$

2.2 Métodos No Paramétricos y Paramétricos

La necesidad que existe de cuantificar la eficiencia de cualquier organización implica seleccionar algún método de estimación que nos permita conocer su comportamiento. El desarrollo de diversos trabajos de investigación dio lugar a lo que se conoce como metodologías de frontera, donde la función de la frontera es la referencia que se utiliza para calcular y evaluar la eficiencia de las unidades observadas. Por lo anterior es especialmente importante la estimación de la frontera, ya que la precisión de la evaluación depende en demasía de que nos acerquemos en mayor o menor medida a la frontera real (Delfín y Navarro, 2014).

Para construir la función de producción o frontera existen básicamente dos grandes bloques: los modelos que utilizan las aproximaciones paramétricas y los que emplean las aproximaciones no paramétricas.

Las aproximaciones paramétricas (determinística y estocástica) requieren formas funcionales que determinan la relación entre *inputs* y *outputs*, donde los parámetros se estiman a partir de las observaciones de la realidad (Seiford y Thrall, 1990).

Lovell (1993) menciona que el análisis de fronteras estocásticas, distingue los efectos del ruido aleatorio de la ineficiencia y determinan específicamente el

componente de error atribuible a la ineficiencia, para reconocer que los resultados entre las dos no son comparables,

Los modelos de naturaleza no paramétrica utilizan técnicas de programación matemática para medir y evaluar la eficiencia de las unidades de decisión, donde no se precisa establecer una tecnología de parámetros que determinen las relaciones entre *inputs* y *outputs*, solo se tiene que definir ciertas propiedades que deben satisfacer los puntos del conjunto de producción. Así la utilización de este tipo de técnicas, no suele presentar dificultades importantes a la hora de medir empíricamente las actuaciones de las unidades determinadas de gestión. En esta categoría hay que destacar el análisis envolvente de datos (DEA), través del cual se puede construir una frontera o un hiperplano de producción, que permita medir la eficiencia relativa de un conjunto de unidades de decisión que producen similares *outputs* a partir de un conjunto común de *inputs*. (Díaz, 2005).

Dentro del apartado de modelos no paramétricos tenemos el *Free Disposal Hull* (FDH), se basa en una representación de la tecnología de producción dada por los planes de producción observados, imponiendo una fuerte capacidad de disposición de los insumos y productos, pero sin el supuesto de convexidad (Leleu, 2006).

Los modelos no paramétricos presentan una mayor flexibilidad para adaptarse a las peculiaridades de determinados sectores, ya que permiten establecer una serie de supuestos muy flexibles para definir el conjunto de posibilidades de producción. La frontera se estima a partir de las observaciones disponibles sobre *inputs* y *outputs* de una serie de unidades de decisión, empleado como ya se mencionó programación lineal (Barros, 2007). En cambio, los modelos paramétricos requieren la definición y construcción de una forma funcional concreta de tipo *Cobb-Douglas*, *Elasticidad de Sustitución Constante (CES)* o *Translog* (Díaz, 2005).

2.3 Métodos No Paramétricos

Entre las posibles técnicas no paramétricas como hemos mencionado destacan el Análisis Envolvente de Datos (DEA) y el modelo *Free Disposal Hull* (FDH), cabe resaltar que el DEA es mayormente utilizado en la medición de la eficiencia debido a dos razones: su mayor estandarización (con relación a otros métodos), así como porque permite considerar múltiples *inputs* y *outputs* (Delfín y Navarro, 2014). Por su parte los modelos FDH no imponen el supuesto de conexividad a la tecnología, si no que únicamente suponen disponibilidad gratuita de los factores y productos (Deprins et. al. 1984).

En las siguientes páginas se abordarán todos los aspectos teóricos y metodológicos, tanto de los modelos DEA como de los modelos FDH, además se mencionan sus ventajas y desventajas.

2.3.1 Métodos DEA

El análisis de la envolvente de datos (DEA) es uno de los métodos no paramétricos más utilizados en la medición de la eficiencia, permite evaluar la eficiencia relativa de unidades homogéneas en presencia de múltiples *inputs* y *outputs* (Guaita et. al. 2016).

2.3.1.1 Antecedentes

Aún y cuando las ideas pioneras del modelo DEA fueron establecidas por el inglés Farrell (1957), tratando de dar solución a un problema agrícola, no fue, sino que hasta Charnes, Cooper y Rhodes (1978), sentaron los fundamentos matemáticos de la teoría moderna del método de frontera DEA, estructurándolo como un modelo de programación lineal (Mercado, 1997). Charnes et. al. (1997) afirman que el origen de ésta técnica es debido a Rhodes, cuando en 1978 aplicó DEA al análisis de la eficiencia del programa de educación *Follow-Through* de las escuelas públicas de Estados Unidos.

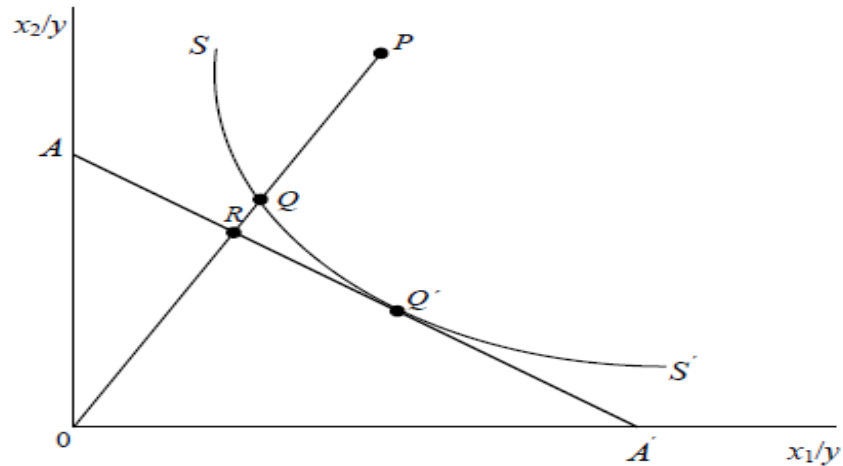
De manera esencial en el modelo DEA se siguen los conceptos básicos de Farrell (1957), sin embargo, junto con él otros autores proporcionaron los fundamentos necesarios para que la técnica pudiera surgir y fuera utilizada (Navarro, 2005).

Farrell (1957), inspirado en los trabajos de Debreu y Koopmans obtuvo una medida de eficiencia total, compuesta por dos elementos: eficiencia técnica y eficiencia *asignativa*. Consideró que una empresa emplea dos factores de producción para producir un solo producto, generado bajo rendimientos constantes a escala. Supuso además que la función de producción es conocida, es decir, el *output* que una empresa perfectamente eficiente podría obtener de cualquier combinación de *inputs*. El supuesto de rendimientos constantes a escala permite que toda la información relevante sea presentada en una isocuanata.

En la figura 5 el punto P representa los insumos de los dos factores por unidad de producto que necesita la empresa. La isocuanata SS' representa las combinaciones posibles de los dos factores que la empresa más eficiente podría requerir para producir una unidad de producto. El punto Q representa una empresa eficiente que usa dos factores en la misma proporción que la empresa P. La razón OQ/OP define la eficiencia técnica de la empresa P.

Sin embargo, se necesita una medida que explique cuándo una empresa usa factores de producción en las mejores proporciones, de acuerdo a sus precios. Así en la figura 5, la línea AA' (línea de isocostos) tiene una inclinación igual a la razón de los precios de los dos factores, Q' y no Q es el método óptimo de producción. La empresa P producirá a un costo igual a R si hubiese escogido adecuadamente las técnicas y la proporción de factores correctos. La relación OR/OQ mide la eficiencia de precios o *asignativa*. Farrell (1957) afirma que si la empresa observada fuera perfectamente eficiente, tanto en términos técnicos como de respeto a los precios, sus costos serían OR/OP . Además, llamó a esta proporción la eficiencia global de la empresa, y se puede observar que es igual al producto de la eficiencia técnica y eficiencia los precios.

Figura 5. Eficiencia técnica y *asignativa* en el modelo de Farrell



Fuente: Farrell, 1957.

2.3.1.2 Fundamentos teóricos y metodológicos de los modelos DEA

El DEA es una técnica de programación matemática, cuyo objetivo es obtener una superficie envolvente, frontera eficiente o función de producción empírica a partir de los datos disponibles de las DMUs, de manera que incluya a todas las unidades eficientes dentro de la frontera, junto con sus combinaciones lineales. De esta manera, quedan las unidades ineficientes fuera de la frontera, permitiendo evaluar la eficiencia relativa de cada una de las unidades (Chang y Carbajal, 2009).

La metodología DEA pertenece al grupo de los denominados métodos de frontera, lo que significa que se evalúa la producción respecto a las funciones de producción, entendiendo por función de producción como el máximo nivel de *output* alcanzable con una cierta combinación de *inputs*, o bien, el mínimo nivel de *inputs* necesario en la producción de un cierto nivel de *outputs* (Coelli et. al., 1998).

El método DEA consiste en medir la eficiencia de forma radial, por lo que se considera que la productividad se incrementa en un cierto volumen solo si se incrementan todos los productos simultáneamente en ese mismo volumen sin consumir más insumos, o, alternativamente que se produce un ahorro de una parte

de los recursos solo si todos los insumos se reducen en esa misma medida sin reducir la producción (Delfín y Navarro, 2014).

Para Navarro (2005), los modelos DEA aprovechan el *know-how* de las DMUs analizadas, de forma tal que identifican las eficientes de las ineficientes, además de fijar objetivos de mejora para las unidades ineficientes a partir de los logros de las primeras, es decir se realiza un *benchmarking* de las unidades evaluadas, empleando información disponible de las propias empresas, sin necesidad de realizar supuestos teóricos. Los modelos DEA además determinan cuáles son las mejores prácticas, a partir de las cantidades empleadas de *inputs* y las cantidades producidas de *outputs*, compara la DMU seleccionada con todas las posibles combinaciones lineales del resto de las unidades muestra, para posteriormente definir con ellas una frontera de producción empírica. Cabe resaltar que la eficiencia de cada DMU analizada se mide como la distancia a la frontera. Además, DEA permite comparar cada empresa ineficiente con aquella empresa eficiente con similar combinación de *inputs* y *outputs*, que actúa como referente (*peer*)⁴.

Los modelos DEA, a diferencia de los métodos tradicionales basados en ratios de productividad en los que se buscan medidas globales de valoración de la actuación donde se obliga normalmente a establecer a priori unas ponderaciones a los *inputs* y *outputs*, proporcionan esta medida global sin necesidad de establecer las ponderaciones a priori.

Los modelos DEA son capaces de manejar situaciones de múltiples *inputs* y *outputs*, siendo ese tipo de cuestiones las que han favorecido su uso extensivo (Dios, 2004). Los *inputs* y *outputs* pueden ser expresados indistintamente en términos monetarios y/o unidades físicas, sin embargo, son muy susceptibles a una mala especificación de las variables asociadas de *inputs* y *outputs* a utilizar, así como el número de observaciones comparadas, además se requiere que las unidades de análisis sean similares entre sí (Navarro, 2005).

Para Coll y Blasco (2006) los modelos DEA pueden ser clasificados, básicamente, en función de:

⁴El referente o *peer* es la empresa que mantiene las mejores prácticas dentro del grupo analizado, lo cual constituye el punto de referencia para las empresas ineficientes que aspiran a mejorar (Navarro, 2005)

- a) El tipo de medida de eficiencia que proporcionan: modelos radiales y no radiales.
- b) La orientación del modelo: *Input* orientado, *Output* orientado o *Input-Output* orientado.
- c) La tipología de los rendimientos a escala que caracterizan la tecnología de producción, entendida ésta como la forma (procedimientos técnicos) en que los factores productivos (*Inputs*) son combinados para obtener un conjunto de productos (*outputs*), de tal forma que esa combinación de factores puede caracterizarse por la existencia de rendimientos a escala: constantes o variables a escala.

2.3.1.3 Modelo DEA-CCR

Charnes, Cooper y Rhodes (1978) complementaron los estudios propuestos por Farrell (1957), en dichos estudios partían de los rendimientos constantes a escala (CRS), de tal forma que un cambio en los niveles de *inputs* conlleva a un cambio proporcional en el nivel de output, el cual requiere tantas optimizaciones como DMU's, se puede presentar con orientación al input y con orientación al output (Delfín y Navarro, 2014). El modelo DEA-CCR proporciona medidas de eficiencia radiales, *Input* u *output* orientadas y supone convexidad, fuerte eliminación gratuita de *inputs* y *outputs*, y rendimientos constantes a escala. Puede escribirse en términos generales en tres formas (Coll y Blasco, 2006):

1. Fraccional
2. Multiplicativa
3. Envolvente

Modelo DEA-CCR fraccional

En DEA, la eficiencia técnica de cada una de las unidades se define, como el cociente entre la suma ponderada de los *outputs* ($\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}$) y la suma ponderada de los *inputs* ($\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}$).

El modelo DEA-CCR Input orientado expresado en términos de cociente sería (Charnes et. al., 1978):

$$h_0 = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}} \quad (2.9)$$

$$\text{Sujeto a: } \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2.10)$$

$$u_r, v_i \geq 0 \quad (2.11)$$

Donde:

x_{ij} : cantidades de *input* i ($i = 1, 2, \dots, m$) consumidos por la j -ésima emisión

y_{rj} : cantidades de *output* r ($r = 1, 2, \dots, s$) producidos por la j -ésima emisión

u : pesos de los *outputs*

v : pesos de los *inputs*

El resultado obtenido en el problema (2.10) dará lugar a los valores óptimos de « u » y « v », tales que la medida de eficiencia de una observación es maximizada, sujeta a la restricción de que todas ellas deben ser menores o iguales a 1. Las variables « u » y « v » deberán ser positivas para evitar que algún *input* u *output* sea ignorado en el cálculo de la eficiencia, aunque también por la necesidad de impedir que el denominador de la función y las restricciones tomen valor 0 (Charnes et. al., 1978).

Modelo DEA-CCR en su forma multiplicativa

El modelo DEA-CCR *input* orientado en forma fraccional puede ser linealizado siguiendo la transformación lineal de Charnes y Cooper (1962), se obtiene así el problema lineal equivalente conocido como modelo en forma multiplicativa:

$$\text{Max } \theta_0 = \sum_{j=1}^n \lambda_j \theta_{j0} \quad (2.12)$$

$$\text{Sujeto a: } \sum_{j=1}^n \lambda_j \theta_{j0} \quad (2.13)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \theta_{jr} - \sum_{j=1}^n \lambda_j \theta_{j0} \leq 0 \quad r = 1, 2, \dots, m \quad (2.14)$$

$$\lambda_j, \theta_j \geq 0 \quad (2.15)$$

El *input* virtual ha sido normalizado a la unidad $\sum_{j=1}^n \lambda_j \theta_{j0} = 1$, ésta se conoce como restricción de normalización. En este modelo se determinan los valores óptimos de los pesos λ_j, θ_j esto es λ_j^*, θ_j^* y debe tenerse en cuenta que cualquier múltiplo de estos valores óptimos será óptimo en el modelo (Boussofiane et. al., 1991).

Generalmente en DEA, se hace referencia a los términos *input* virtual y *output* virtual; el primero se refiere a la suma ponderada de los *inputs* $\sum_{j=1}^n \lambda_j \theta_{jr}$, en cuanto al *output* virtual hace referencia a la suma del *output* ponderado $\sum_{j=1}^n \lambda_j \theta_{j0}$. En Boussofiane et. al. (1991) para la unidad evaluada, los valores de los *inputs* y *outputs* virtuales expresan información sobre la importancia que una unidad atribuye a determinados *inputs* y *outputs* con el objeto de obtener su máxima puntuación de eficiencia. En caso del modelo fraccional la eficiencia se definiría como el cociente entre el *output* virtual y el *input* virtual. De esta manera es posible de cada *input* $\lambda_j^* \theta_{jr}$, respecto del total $\sum_{j=1}^n \lambda_j^* \theta_{jr} = 1$, así como la contribución de cada *output* $\lambda_j^* \theta_{j0}$

a la puntuación de la eficiencia $\theta^* = \sum_{j=1}^n \lambda_j$; estos resultados proporcionan

indicación de la medida en que las variables *inputs* y *outputs* han sido usadas en la determinación de la eficiencia (Coll y Blasco, 2006).

Modelo DEA-CCR en su forma envolvente

Para todo programa lineal original (programa primal) existe otro programa lineal asociado, llamado programa dual, que puede ser utilizado para determinar la solución del problema primal. Existe una variable dual por cada restricción primal y una restricción dual por cada variable primal. En la mayor parte de las aplicaciones DEA, el modelo que más emplean en la medición de la eficiencia es la de la forma envolvente, la fórmula para representar este modelo con orientación al *input* es la siguiente:

$$\theta^* = \min_{\theta, \lambda} \theta \tag{2.16}$$

$$\text{Sujeto a: } Y\lambda \geq Y_i \tag{2.17}$$

$$X\lambda \leq \theta X_i \tag{2.18}$$

$$\lambda \geq 0 \tag{2.19}$$

Donde θ indica la distancia en *inputs* a la envolvente de datos, es decir la medida de eficiencia. X es la matriz de *inputs*, Y es la matriz de *outputs*, es el vector de pesos o intensidades, λ_j , λ_k representan los valores de *inputs* y *outputs* respectivamente (Coll y Blasco, 2006).

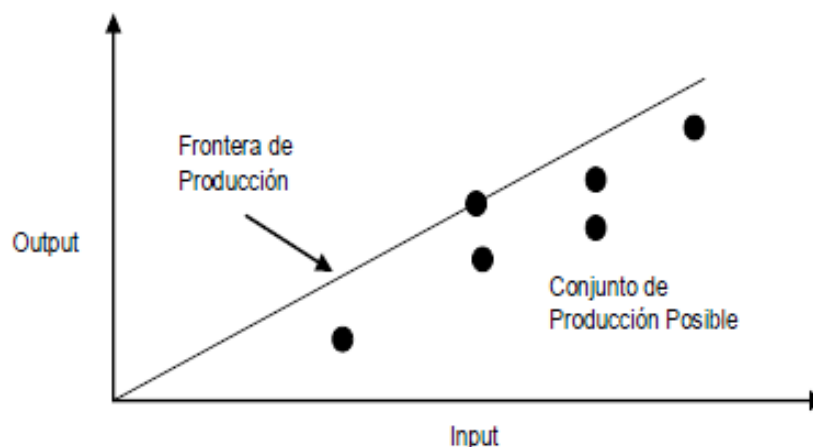
2.3.1.4 Modelo DEA-BCC

Casi una década después de la propuesta presentada por Charnes et. al. (1978), Banker, Charnes y Cooper (1984) extendieron el modelo original para incluir rendimientos variables a escala. Considerando que diversas circunstancias como la competencia imperfecta, las restricciones en el acceso a fuentes de financiación,

entre otras, pueden provocar que las unidades no operan a escala óptima. Por lo que al programa lineal original se le agregó una restricción (Delfín y Navarro, 2014).

Cabe destacar que el modelo DEA-CCR, es construido sobre la suposición de rendimientos a escala constantes de actividades como se describe por la frontera de producción en el caso de un único *input* y un único *output* mostrado en la figura 6. Generalmente, se asume que el conjunto de producción posible tiene la siguiente propiedad: Sí (x, y) es un punto factible, entonces (tx, ty) para cualquier número positivo t también es factible. Esta suposición puede ser modificada para permitir conjuntos de producción posibles con diferentes postulados (Cooper et. al., 2007).

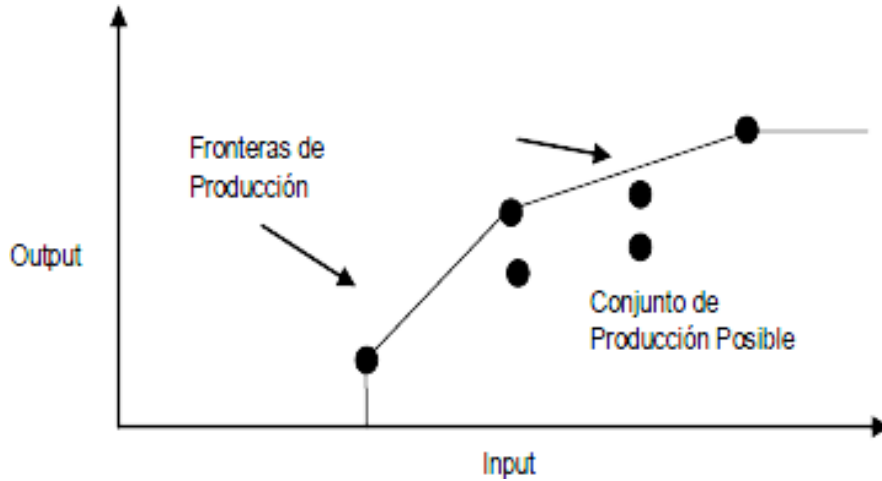
Figura 6. Frontera de producción del modelo CCR



Fuente: Cooper et. al., 2007.

Por su parte el modelo BCC tiene sus fronteras de producción en el núcleo convexo de las DMU's existentes. Las fronteras tienen características cóncavas y lineales, mostradas en la figura 7, que guían a las determinaciones de los rendimientos a escala variables con (a) rendimientos a escala crecientes ocurriendo en la primera línea sólida de segmento seguida por (b) rendimientos a escala decrecientes en el segundo segmento y (c) rendimientos a escala constantes ocurriendo en el punto en donde la transición del primero al segundo segmento es realizada (Cooper et. al., 2007).

Figura 7. Frontera de producción del modelo BCC



Fuente: Cooper *et. al.*, 2007.

Los modelos BCC y CCR se diferencian sólo en que el primero incluye la condición de convexidad $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0, \forall j$ en sus restricciones. Por eso, como podría esperarse, comparten propiedades en común y muestran diferencias (Cooper *et. al.*, 2007).

El modelo con rendimientos a escala variables se puede presentar al igual que el modelo de rendimientos a escala constantes, en tres maneras diferentes: en su forma fraccional, multiplicativa o envolvente a continuación se desarrollan dichos modelos (Coll y Blasco, 2006):

Modelo DEA-BCC fraccional

$$h_o = \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{oj} + y_{o0}}{\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{oj}} \quad (2.20)$$

Sujeto a:
$$\frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{oj} + y_{o0}}{\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{oj}} \leq 1 \quad j=1,2,\dots,n \quad (2.21)$$

$$\lambda_j, \lambda_0 \geq 0 \quad (2.22)$$

$$\lambda_0 \geq 0$$

Modelo DEA-BCC en su forma multiplicativa

El modelo en forma multiplicativa puede escribirse como:

$$\theta_0 \prod_{r=1}^s \frac{y_{rj_0}}{y_{rj_0}^*} = \prod_{i=1}^m \frac{x_{ij_0}}{x_{ij_0}^*} + \theta_0 \quad (2.23)$$

$$\theta_0 = 1 \quad (2.24)$$

$$\theta_0 \leq 1 \quad (2.25)$$

$$\theta_0, \theta_0^+ \geq 0 \quad (2.26)$$

$$\theta_0 \text{ ó } \theta_0^+ \text{ ó } \theta_0^-$$

El objetivo del modelo DEA-BCC *input* orientado identificado presentado en el modelo multiplicativo, es encontrar un hiperplano que, permaneciendo por encima de todas las unidades, minimice la distancia horizontal desde el hiperplano a la unidad₀ (Charnes et. al., 1994). A partir de los valores óptimos de los pesos o multiplicadores de *inputs* y *outputs*, es posible determinar los porcentajes de contribución *input/output* (Coll y Blasco, 2006).

Modelo DEA-BCC en su forma envolvente

En este modelo se propone una modificación al programa lineal original con rendimientos a escala constantes a la cual se le agrega una restricción: $\sum \lambda'_j = 1$. Así pues, el modelo de rendimientos variables a escala con orientación *input* se establece de la siguiente manera (Coll y Blasco, 2006):

$$\theta^* = \min \theta_0 \quad (2.27)$$

$$\text{Restricción: } \theta_0 \geq \theta_0 \quad (2.28)$$

$$\theta_0 \leq \quad (2.29)$$

$$\theta_0$$

$$\sum \lambda'_j = 1 \quad (2.30)$$

$$\lambda, \lambda^+, \lambda^- \geq 0 \quad (2.31)$$

La unidad evaluada será calificada como eficiente, según la definición de Pareto-Koopmans, si y solo si en la solución óptima $\theta^* = 1$ y las variables de las holguras son todas nulas, es decir $\theta^{+*} = 0$ y $\theta^{-*} = 0$.

2.3.1.5 Orientación del modelo

Charnes, Cooper y Rhodes (1981) mencionan que la eficiencia puede ser caracterizada con relación a dos orientaciones básicas, pudiendo hacer referencias a modelos:

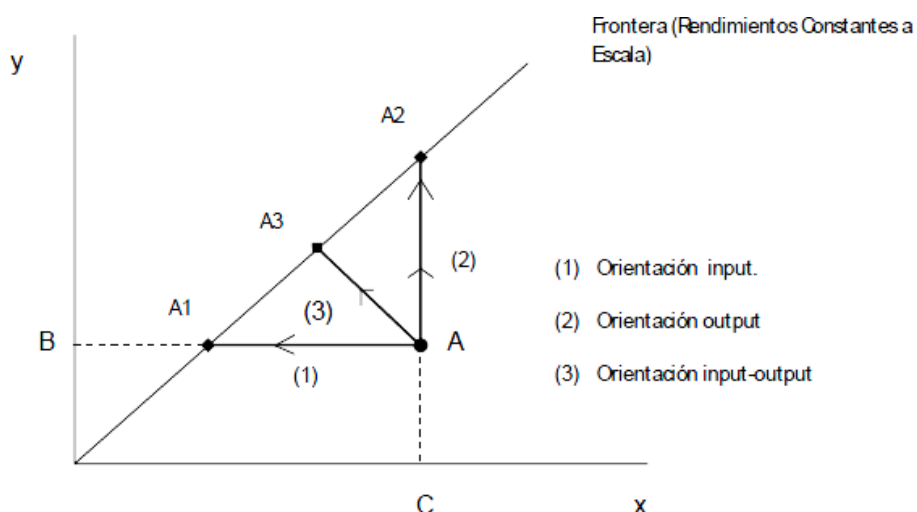
- ▶ *Inputs* orientados: buscan, dado el nivel de *outputs*, la máxima reducción proporcional en el vector de *inputs* mientras permanece en la frontera de posibilidades de producción.
- ▶ *Outputs* orientados: buscan, dado el nivel de *inputs*, el máximo incremento proporcional de los *outputs* permaneciendo dentro de la frontera de posibilidades de producción.

Charnes et. al. (1981) afirman que teniendo en cuenta las orientaciones definidas, una DMU será considerada eficiente sí, y solo sí, no es posible incrementar las cantidades de *output* manteniendo fijas las cantidades de *inputs* utilizadas ni es posible disminuir las cantidades de *inputs* empleadas sin alterar las cantidades de *outputs* obtenidas, lo que se acerca a la definición de eficiencia Pareto-Koopmans.

Coll y Blasco (2006) ejemplifican lo establecido por Charnes et. al. (1981), así pues, en la Figura 8 se ha representado, bajo el supuesto de rendimientos constantes a escala, el caso de un único Input y un único Output, y en ella puede verse cómo la Unidad A es ineficiente técnicamente, se sitúa por debajo de la frontera. Desde el punto de vista de un modelo Input orientado, la Unidad A podría reducir la cantidad de *input* x (los *inputs* son controlables) y seguir produciendo la misma cantidad de *output* y , es decir, la unidad A debería tomar como referencia la mejor práctica de la Unidad A1. La eficiencia (técnica) de la Unidad considerada vendría dada por: $ET_A =$

$$\frac{BA1}{BA}$$

Figura 8. Orientaciones en modelos DEA



Fuente: Coll y Blasco, 2006.

De igual forma, al considerar la evaluación de la eficiencia a través de modelos *output* orientados (los *outputs* son controlables), la DMU A sería calificada como ineficiente. Esta DMU podría, consumiendo la misma cantidad de *input*, producir una mayor cantidad de *output*. En este caso, la eficiencia de la DMU A vendría dada por el cociente: $ET_A = \frac{CA}{CA2}$

Bajo el supuesto de rendimientos constantes a escala, las medidas de eficiencia técnica *input* y *output* orientadas coinciden (Coll y Blasco, 2006).

2.4.1.6 Análisis *Slacks*

Una vez que se ha obtenido un resultado de eficiencia igual a la unidad, se obtienen de igual manera resultados de ineficiencia, en este sentido algunos *inputs* pueden ser reducidos o algunos *outputs* expandidos (Zhu, 2014).

El problema de holguras (*slacks*) ha sido aclarado desde los primeros modelos DEA y se proporcionaron dos soluciones posibles: el primero consiste en penalizar aquellas holguras usando un factor de penalización infinitesimal, este factor es lo suficientemente largo para reconocer las posibles holguras y lo suficientemente pequeño para no impactar en los resultados numéricos. La segunda propuesta es resolver el problema dual usando *inputs* y *outputs* positivos (Delfín y Navarro, 2014).

Para la penalización de holguras, se considera la reformulación de Farrell (1957) de eficiencia con orientación *input* (Bogetoft y Otto, 2011):

$$\max_{\theta, \lambda, \mu} \theta - \sum_{j=1}^n \mu_j^- - \sum_{j=1}^n \mu_j^+ \tag{2.32}$$

Sujeto a:
$$E_j^0 + \mu_j^- = \sum_{j=1}^n \mu_j^+ \mu_j^0 \quad \mu_j = 1, 2, \dots, n \tag{2.33}$$

$$\mu_j^0 - \mu_j^+ = \sum_{j=1}^n \mu_j^+ \mu_j^0 \quad \mu_j = 1, 2, \dots, n \tag{2.34}$$

$$\mu_j \wedge (\mu_j), \mu_j^- \geq 0, \mu_j^+ \geq 0, \mu_j \leq 1 \tag{2.35}$$

En este apartado se introdujeron variables *slacks inputs* μ_j^- , $j = 1, \dots, n$ que miden cualquier exceso de recursos en μ_j^0 en comparación de la unidad de referencia, por tanto, se han introducido variables *slacks outputs* μ_j^+ , $j = 1, \dots, n$ para medir cualquier insuficiencia de *outputs* en referencia con la unidad comparada. Finalmente introdujeron $\mu_j > 0$ como una penalización para los *slacks*. Con el término $\mu_j = 0$ se retorna al programa original (Zhu, 2014).

2.3.1.7 Benchmarking

El *benchmarking* lo podemos definir como la medida de una actuación en comparación con las mejores compañías de su clase así pues determina cómo la mejor de ellas ha logrado estos niveles de actuación y utiliza la información como

base para los objetivos, estrategias y aplicación de la propia compañía (Bemowski, 1991).

Para Wald (1993) el *benchmarking* es el proceso sistemático de reconocer las "mejores" prácticas de gestión y aplicarlas a una organización; por su parte Spendolini (1992) define al *benchmarking* como el proceso sistemático y continuo de evaluación de los productos, servicios y procedimientos de trabajo de las empresas que se reconocen como representantes de las mejores prácticas y el propósito es el mejoramiento organizacional. Por su parte Navarro (2005) menciona que el proceso de *benchmarking* significa:

- Determinar las características apropiadas del proceso receptor y utilizarlas para comparar un proceso con otro (el donante).
- Desarrollar los datos sobre la actuación del proceso mejor practicado dentro o fuera de una organización, que requiera la aplicación del benchmarking.
- Comparar y evaluar el proceso o procesos según los datos relativos a las características medidas.
- Desarrollar medidas para mejoras continuas partiendo de los nuevos datos.
- Aplicar los cambios del proceso planificados.
- Controlar la eficacia de estos cambios.

El *benchmarking* requiere, por tanto, una acción planificada de la evaluación y la aplicación. En un intento por modificar el proceso, a la luz de los nuevos conocimientos obtenidos sobre un proceso más efectivo. *Benchmarking* significa adaptar las mejores prácticas, más que copiarlas. Implica utilizar el conocimiento de un proceso para determinar lo que es utilizable del proceso donante. De esta forma, la mentalidad o cultura que rodea el *benchmarking* debe ser mejorar y exceder las dimensiones de la actuación del proceso donante (Navarro, 2005).

Benchmarking es un proceso por medio del cual se realiza una comparación de rendimiento entre DMUs pares y así determinar las posiciones relativas de cada DMU, estableciendo un estándar de excelencia (Zhu, 2014).

2.3.1.8 Ventajas y desventajas en la utilización de los modelos DEA

La metodología DEA presenta una serie de ventajas (fortalezas) que la han convertido, en relativamente poco tiempo, en una técnica muy utilizada. Charnes, Cooper, Lewin y Seiford (1994) destacan como características importantes de los modelos DEA las siguientes tres:

1. Caracteriza cada una de las unidades mediante una única puntuación de eficiencia (relativa).
2. Al proyectar cada unidad ineficiente sobre la envolvente eficiente destaca áreas de mejora para cada una de las Unidades.
3. La no consideración por DEA de la aproximación alternativa e indirecta de especificar modelos estadísticos y hacer inferencias basadas en el análisis de residuos y coeficientes de los parámetros.

Además de las tres características enunciadas anteriormente, Charnes, Cooper, Lewin y Seiford (1994) aportan otras peculiaridades de DEA como son, por ejemplo, la posibilidad de ajustarse a variables exógenas e incorporar variables categóricas.

Otro aspecto a tener en cuenta de DEA es su capacidad de manejar situaciones de múltiples Inputs y Outputs (Restzlaff-Roberts y Morey, 1993) expresados en distintas unidades de medida (Charnes, Cooper, Lewin y Seiford, 1994). Además, DEA es una técnica no-paramétrica y, por tanto, no supone ninguna forma funcional de la relación entre los *inputs* y los *outputs*, ni supone una distribución de la ineficiencia (Banker, Gadh y Gorr, 1993).

Dentro de las desventajas que presenta la técnica DEA, una de las mayores críticas recibidas es que se trata de una aproximación determinista y no tiene en cuenta

influencias sobre el proceso productivo de carácter aleatorio e imposibles de controlar (Ley, 1991) ni la incertidumbre (errores de medida o introducción incorrecta de datos, por ejemplo) (Restzlaff-Roberts y Morey, 1993). Así, la precisión de los resultados alcanzados (puntuaciones de eficiencia relativa) dependerá de la exactitud de las medidas de los Inputs y Outputs considerados. Si la incertidumbre está presente, los resultados pueden ser erróneos y conducir a que una Unidad aparezca, falsamente, como eficiente, es decir, la frontera puede cambiar de forma y/o posición y, consecuentemente, puede estar mostrando Unidades ineficientes cuando realmente no lo son. Además, DEA es sensible a la existencia de observaciones extremas y toda desviación respecto de la frontera es tratada como ineficiencia, lo que puede derivar en una sobreestimación de la misma (Doménech, 1992).

2.3.2 Modelo FDH

El modelo no paramétrico *Free Disposal Hull* (FDH) introducido por Deprins, Simar y Tulkens (1984) se basa en una representación de la tecnología de producción dada por la producción observada, imponiendo una fuerte disponibilidad de insumos y productos, pero sin el supuesto de convexidad. El modelo FDH asume implícitamente retornos variables a escala (VRS) y el modelo fue resuelto por un modelo mixto integral de programación lineal (MILP) (Leleu, 2004).

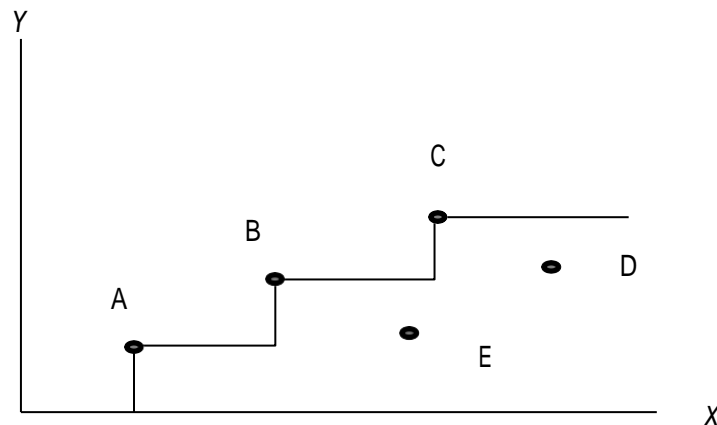
2.3.2.1 Introducción al modelo FDH

El modelo FDH es un estimador propuesto por Deprins *et. al.* (1984), originalmente fue diseñado como una alternativa a los modelos DEA, donde sólo se supone la disponibilidad libre de entradas y salidas. Su principal contribución fue relajar el supuesto de convexidad de los modelos DEA. Como tal, el modelo FDH fue presentado inicialmente como un modelo DEA de variables a escala (VRS) en el

que las variables de actividad eran binarias, excluyendo así las combinaciones lineales de la producción observada (Leleu, 2004).

Los modelos FDH en su representación gráfica de la frontera toman una forma escalonada, ya que solo permiten que las unidades que forman la frontera sean medidas de unidades realmente observadas (ver figura 9) (Bogetoft y Otto, 2011):

Figura 9. Frontera de posibilidades de producción FDH



Fuente: Bogetoft y Otto, 2011.

2.3.2.2 Fundamentos del modelo FDH

El objetivo primario de este método es asegurar que las estimaciones de eficiencia son afectadas por únicamente los desempeños observados actuales. Es importante destacar las características del modelo FDH, que según Giménez (2011) son:

- ▶ Ofrecen unidades de referencia existentes en la realidad.
- ▶ Proporcionan un mayor ajuste a los datos.
- ▶ Como consecuencia de su construcción matemática, los índices de eficiencia obtenidos son mayores que los de los modelos DEA.
- ▶ Mayor dificultad de cálculo (se basan en programas lineales binarios mixtos).

La metodología FDH, así como todas las metodologías no paramétricas permiten realizar un análisis de eficiencia relativa bajo dos orientaciones: *input* orientado y

output orientado. La formulación matemática del modelo FDH con ambas orientaciones se muestran a continuación (Ray, 2004):

Con orientación *input*

$$\theta^* = \min \theta \tag{2.36}$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{rj} \leq \theta x_{r0} \quad (r = 1, 2, \dots, R) \tag{2.37}$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{sj} \geq y_{s0} \quad (s = 1, 2, \dots, S) \tag{2.38}$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \tag{2.39}$$

$$\lambda_j \in \{0, 1\}; (j = 1, 2, \dots, n) \tag{2.40}$$

sin
 restricciones

La formulación matemática del modelo FDH con orientación al *output* es:

$$\theta = \max \theta \tag{2.41}$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{sj} \geq \theta y_{s0} \quad (s = 1, 2, \dots, S) \tag{2.42}$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{rj} \leq x_{r0} \quad (r = 1, 2, \dots, R) \tag{2.43}$$

$$\tag{2.44}$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (\alpha_i = 1, 2, \dots, n)$$

$$\alpha_i \sin \alpha_i$$

2.4 Métodos Paramétricos

La estimación econométrica se desarrolló adoptando la idea inicial de eficiencia a la forma funcional de una frontera, que indica la máxima producción para una combinación de factores dada. Se pueden observar puntos debajo de la frontera que representan firmas que producen menos del máximo posible, pero nunca por encima de ésta. Esta función, aunque permite la existencia de desviaciones de la frontera por razones distintas a ineficiencia, tiene la limitante de suponer a priori una forma funcional para los datos (Arzubi y Berbel, 2002).

En el Análisis de Frontera Estocástica (SFA) la frontera de producción se estima mediante una forma funcional para representar la tecnología e incorporar un error de especificación que incluye la presencia de perturbaciones estocásticas (Acevedo y Ramírez, 2005).

2.4.1 Método SFA

Una forma comúnmente utilizada para medir la eficiencia técnica de alguna unidad es la metodología de frontera estocástica. Esta técnica asume que, para una combinación de insumos, el máximo beneficio alcanzable por una entidad está delimitado por una función paramétrica de insumos conocidos que involucran parámetros desconocidos y una medida de error. Entre menor sea la distancia el beneficio actual a la frontera estocástica o de mejor práctica, mayor es la eficiencia técnica de la entidad (Canay, 2000).

2.4.1.1 Antecedentes

Farrell (1957) hizo referencia a la posibilidad de estimar econométricamente una función de producción, de modo tal que ninguna observación resultara por encima de ella. Este fue el camino seguido por Aigner y Chu (1968), y más tarde por Aigner Lovell y Schmidt (1977) y Meeusen y van den Broeck (1977). En estos dos últimos trabajos, en conjunto, aunque independientemente, se desarrolló el concepto de frontera estocástica que ha dado nombre a la segunda metodología en el estudio de la eficiencia. En este caso, el método para encontrar la frontera consiste en postular una función de comportamiento eficiente (función de producción, de costes, o de beneficios), a la que se añaden dos perturbaciones: una simétrica, que recoge el ruido aleatorio, y otra sesgada que refleja la ineficiencia. Mediante técnicas econométricas se estiman los parámetros de la frontera, frecuentemente postulando una determinada distribución estadística para cada una de las dos perturbaciones y estimando por máxima verosimilitud. Posteriormente se calcula la eficiencia de cada empresa a partir del valor estimado para la perturbación de carácter sesgado anteriormente mencionada.

La frontera que se obtiene con este método, a diferencia de lo que ocurre con el empleo del análisis de envolvimiento de datos, tiene un carácter paramétrico, en cuanto se postula una forma funcional específica que explica el comportamiento eficiente de las empresas. La estimación proporciona unos índices de eficiencia con propiedades estadísticas, lo que permite plantear contrastes de hipótesis sobre los resultados (García, 2002).

2.4.1.2 Aspectos teóricos

Las fronteras estocásticas, que han sido motivadas en la idea de que las desviaciones con respecto a la frontera pueden no estar absolutamente bajo el control de la firma analizada. Este enfoque utiliza una mezcla de términos de error de una y dos colas. Esto es, dado la mezcla de insumos, existe un máximo producto posible, pero este nivel máximo es aleatorio y no exacto. La idea es que los eventos

externos que afectan la función de producción se distribuyen normalmente (pudiendo la empresa enfrentarse a condiciones externas favorables o desfavorables, con una determinada probabilidad), en lugar de ser constantes. Una vez considerada la posibilidad de ruido estadístico, lo que resta es considerada ineficiencia (Canay, 2000). En la tabla 2 se pueden apreciar las principales características del método SFA.

Tabla 2. Características de Método SFA

Enfoque	Paramétrico
Permite medir	Eficiencia Técnica, Economías de Escala, Eficiencia <i>Asignativa</i> y cambio en la TFP (con datos de panel).
Requerimientos de información	<ul style="list-style-type: none"> • Depende del modelo usado. • Función de Producción y distancia: Cantidad de productos e insumos. • Función de costos: Costos, cantidad de productos y precio de insumos. • Función de beneficios: beneficios, cantidades, precio de Insumos y productos.
Método de estimación	Econometría
Observaciones	Requiere la especificación de alguna forma funcional.

Fuente: Elaboración propia con base en Chang, 2010.

La especificación teórica de la frontera de producción es la siguiente:

$$Y = f(L; K; Z) \tag{2.45}$$

Donde Y es el producto, Z es un vector I-dimensional de variables ambientales, L representa al insumo mano de obra y K al insumo capital. La forma de la función de producción más utilizada es la Cobb-Douglas (Burns y Weyman-Jones, 1996) donde el término de error (ϵ) entra en el modelo multiplicativamente. Así, podemos definir la frontera como:

$$Q_t = (\alpha_1 L_t^{\alpha_2}, \alpha_3, \dots, \alpha_{n+1}; \epsilon_t) \rightarrow \ln Q_t = \alpha_1 + \alpha_2 \ln L_t + \alpha_3 + \dots + \alpha_{n+1} + \epsilon_t \tag{2.46}$$

Donde X es una matriz que contiene al logaritmo de los insumos y a las variables ambientales, $\varepsilon_i = v_i + u_i$ es la perturbación aleatoria compuesta, v_i es una variable aleatoria no restringida y u_i es el término de ineficiencia que, por ser ésta una frontera de producción, es no positivo (Canay, 2000).

El nivel de eficiencia técnica (TE) de una firma va a venir dado por el cociente entre la producción observada y la frontera estocástica estimada. De esta forma:

$$\hat{TE}_i = \frac{y_i}{\hat{y}_i} = \frac{y_i}{\exp(\beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i)} \quad (2.47)$$

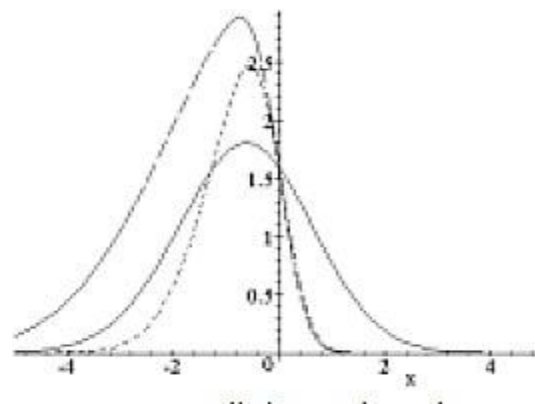
La componente u_i es inobservable y debe ser inferida a partir del término compuesto. Para poder descomponer este término y establecer que parte corresponde a ruido y que parte corresponde a ineficiencia, va a ser necesario suponer alguna distribución para ambas componentes. El caso menos problemático es el de v_i , ya que existe un consenso generalizado de que esta variable se asume independiente e idénticamente distribuida como una normal $(0, \sigma_v^2)$. Contrariamente, son varias las distribuciones que han sido propuestas para el término de ineficiencia: Half-Normal (Aigner, Lovell y Schmidt, 1977), Normal Truncada (Stevenson, 1980), Gamma (Greene, 1990) y Exponencial (Meeusen y van den Broeck, 1977).

Para el caso de la Half-Normal, y teniendo en cuenta que v_i y u_i se suponen independientes, la función de densidad de ε_i se encuentra asimétricamente distribuida con media y varianza:

$$f(\varepsilon_i) = f(v_i, u_i) = \frac{1}{\sigma_v \sigma_u} \exp\left(-\frac{v_i^2}{2\sigma_v^2}\right) \exp\left(-\frac{u_i}{\sigma_u}\right) \quad (2.48)$$

No es difícil observar que la asimetría del término compuesto debe ser negativa (ver figura 10). Si la asimetría del término compuesto estimado es positiva, puede interpretarse que los datos son inconsistentes con el modelo seleccionado (Waldman, 1982). Este diagnóstico es independiente del supuesto que se haga sobre la distribución de la componente de ineficiencia (Canay, 2000).

Figura 10. Asimetría del término compuesto



Fuente: Canay, 2000.

Observemos que la ecuación (2.46) no puede ser estimada por mínimos cuadrados ordinarios debido a que la esperanza del error compuesto no es cero. No obstante, existen variantes de este método de estimación que nos permiten estimar dicha frontera, así como también puede estimarse por máxima verosimilitud (Canay, 2000).

Las fronteras estocásticas se estiman en dos partes. En la primera parte se obtienen estimaciones consistentes de los parámetros tecnológicos y del parámetro de la función de distribución elegida. Aquí puede optarse por emplear Máxima Verosimilitud (ML por sus siglas en inglés) y realizar todas las estimaciones de una vez, o utilizar Mínimos Cuadrados Clásicos Modificados (MOLS por sus siglas en inglés) y realizar los dos pasos que son necesarios para obtener una estimación consistente de la constante del modelo. Una vez hecho esto, debe descomponerse

el error compuesto para tener una estimación de la ineficiencia de cada empresa (Canay, 2000).

2.4.1.3 Mínimos cuadrados clásicos modificados

El procedimiento llamado MOLS, según la terminología de Lovell (1993), requiere de dos pasos. El primer paso no depende del supuesto que se realice sobre la distribución de la ineficiencia y consiste básicamente en una estimación de mínimos cuadrados ordinarios de la función de producción. De esta forma se obtienen estimaciones consistentes e insesgadas de todos los parámetros, exceptuando la constante, la cual se encuentra sesgada. Para ver esto más claramente, rescribamos la ecuación (2.46) de la siguiente forma:

$$\ln y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i3} + \beta_4 x_{i4} + \beta_5 x_{i5} + \beta_6 x_{i6} + \beta_7 x_{i7} + \beta_8 x_{i8} + \beta_9 x_{i9} + \beta_{10} x_{i10} + \beta_{11} x_{i11} + \beta_{12} x_{i12} + \beta_{13} x_{i13} + \beta_{14} x_{i14} + \beta_{15} x_{i15} + \beta_{16} x_{i16} + \beta_{17} x_{i17} + \beta_{18} x_{i18} + \beta_{19} x_{i19} + \beta_{20} x_{i20} + \beta_{21} x_{i21} + \beta_{22} x_{i22} + \beta_{23} x_{i23} + \beta_{24} x_{i24} + \beta_{25} x_{i25} + \beta_{26} x_{i26} + \beta_{27} x_{i27} + \beta_{28} x_{i28} + \beta_{29} x_{i29} + \beta_{30} x_{i30} + \beta_{31} x_{i31} + \beta_{32} x_{i32} + \beta_{33} x_{i33} + \beta_{34} x_{i34} + \beta_{35} x_{i35} + \beta_{36} x_{i36} + \beta_{37} x_{i37} + \beta_{38} x_{i38} + \beta_{39} x_{i39} + \beta_{40} x_{i40} + \beta_{41} x_{i41} + \beta_{42} x_{i42} + \beta_{43} x_{i43} + \beta_{44} x_{i44} + \beta_{45} x_{i45} + \beta_{46} x_{i46} + \beta_{47} x_{i47} + \beta_{48} x_{i48} + \beta_{49} x_{i49} + \beta_{50} x_{i50} + \beta_{51} x_{i51} + \beta_{52} x_{i52} + \beta_{53} x_{i53} + \beta_{54} x_{i54} + \beta_{55} x_{i55} + \beta_{56} x_{i56} + \beta_{57} x_{i57} + \beta_{58} x_{i58} + \beta_{59} x_{i59} + \beta_{60} x_{i60} + \beta_{61} x_{i61} + \beta_{62} x_{i62} + \beta_{63} x_{i63} + \beta_{64} x_{i64} + \beta_{65} x_{i65} + \beta_{66} x_{i66} + \beta_{67} x_{i67} + \beta_{68} x_{i68} + \beta_{69} x_{i69} + \beta_{70} x_{i70} + \beta_{71} x_{i71} + \beta_{72} x_{i72} + \beta_{73} x_{i73} + \beta_{74} x_{i74} + \beta_{75} x_{i75} + \beta_{76} x_{i76} + \beta_{77} x_{i77} + \beta_{78} x_{i78} + \beta_{79} x_{i79} + \beta_{80} x_{i80} + \beta_{81} x_{i81} + \beta_{82} x_{i82} + \beta_{83} x_{i83} + \beta_{84} x_{i84} + \beta_{85} x_{i85} + \beta_{86} x_{i86} + \beta_{87} x_{i87} + \beta_{88} x_{i88} + \beta_{89} x_{i89} + \beta_{90} x_{i90} + \beta_{91} x_{i91} + \beta_{92} x_{i92} + \beta_{93} x_{i93} + \beta_{94} x_{i94} + \beta_{95} x_{i95} + \beta_{96} x_{i96} + \beta_{97} x_{i97} + \beta_{98} x_{i98} + \beta_{99} x_{i99} + \beta_{100} x_{i100} + \varepsilon_i^* \quad (2.49)$$

Observemos que aquí el término aleatorio ε_i^* posee esperanza nula, con lo cual podemos aplicar mínimos cuadrados ordinarios y obtener estimaciones consistentes del vector β .

El segundo paso del proceso de estimación involucra estimar $\beta_0, \beta_1^2, \beta_2^2, \dots, \beta_{100}^2$. Aquí se torna necesario establecer algún supuesto sobre la distribución de u_i . Si asumimos que u_i sigue una distribución H-N, entonces los momentos de orden dos y tres de $\varepsilon_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1}$ son:

$$E(\varepsilon_i^2) = \beta_0^2 + \beta_1^2 x_{i1}^2 + 2\beta_0\beta_1 x_{i1} \quad E(\varepsilon_i^3) = 3\beta_0^2\beta_1 x_{i1} + 3\beta_0\beta_1^2 x_{i1}^2 + \beta_1^3 x_{i1}^3 \quad \text{respectivamente. No es difícil observar que } \varepsilon_i^* = \beta_0 + [\beta_1 x_{i1} - E(\beta_1 x_{i1})] \text{ posee los mismos momentos de orden dos y tres que } \beta_1 x_{i1} \text{ debido a que } E(\beta_1 x_{i1}) \text{ es una constante. De esta manera, es posible utilizar los}$$

momentos de σ^2 y σ^4 . Una vez hecho esto, simplemente resta obtener una estimación de $\sigma^2(\beta_0)$ para así poder desplazar la constante:

$$\hat{\sigma}^2 = \hat{\sigma}^2 - \hat{\sigma}^2(\beta_0) \quad (2.50)$$

Observemos que el sesgo en la constante OLS proviene de la violación del supuesto clásico de esperanza nula del término de error. No obstante, hay que tener presente que la estimación de mínimos cuadrados ordinarios de la verdadera constante de una función Cobb-Douglas está siempre sesgada (Kennedy, 1992) inclusive en el caso de estimación de funciones promedios. Esto se debe a que la esperanza del error multiplicativo de la función Cobb-Douglas es uno y no cero.

2.4.1.4 Máxima verosimilitud

El método de estimación ML requiere de la maximización numérica de la función de verosimilitud y por este es más demandante de herramientas computacionales que MOLS. Sin embargo, en los últimos años han aparecido varios paquetes estadísticos que permiten estimar fronteras con ML de formas bastante sencilla. Al estimar la frontera por ML, es necesario realizar los supuestos sobre ambas componentes aleatorias desde un primer momento. Una vez hecho esto, para poder armar la función de verosimilitud necesitamos la función de densidad de $\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2$. No es difícil mostrar que esta función de densidad surge de la siguiente integral:

$$f(\epsilon) = \int_0^\infty f(\epsilon_1, \epsilon_2) d\epsilon_1 d\epsilon_2 = \int_0^\infty \frac{1}{2\sigma_1\sigma_2} \exp\left\{-\frac{\epsilon_1^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(\epsilon - \epsilon_1)^2}{2\sigma_2^2}\right\} d\epsilon_1 \quad (2.51)$$

$$f(\epsilon) = \frac{1}{\sigma_1\sigma_2} \Phi\left(-\frac{\epsilon}{\sigma_2}\right) \phi\left(\frac{\epsilon}{\sigma_1}\right)$$

Donde $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$, $\phi(\cdot)$ y $\Phi(\cdot)$ son las funciones de densidad probabilística y acumulada de la normal estándar. Utilizando la ecuación (6), la función:

$$(2.52)$$

$$\ln L = -\frac{n}{2} \ln \sigma^2 - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{\sigma^2} - \sum_{i=1}^n \ln \Phi\left(-\frac{y_i}{\sigma}\right)$$

La función (2.52) puede maximizarse para obtener estimaciones de todos los parámetros de la ecuación (2.46) así como también de λ y σ . Estas estimaciones son consistentes a medida que $n \rightarrow \infty$. No obstante, Battese y Corra (1977) sugieren la reparametrización de la función de verosimilitud en función del parámetro $\gamma = \frac{\sigma^2}{1 + \sigma^2}$ debido a que este parámetro toma valores entre cero y uno, mientras que λ puede tomar cualquier valor no negativo. La parametrización en γ tiene ventajas en el proceso de iteración para maximizar la función, debido a que el espacio de valores posibles está acotado. De esta forma, la función *loglikelihood* es la misma función (2.52) pero reemplazando λ por $\frac{\gamma}{1-\gamma}$.

CAPÍTULO 3

LA EFICIENCIA Y LA PRODUCTIVIDAD EN LAS TERMINALES DE CONTENEDORES EN AMÉRICA DEL NORTE: ELEMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo se centra en la aplicación de la técnica DEA a la estimación de la eficiencia de las terminales de contenedores en los puertos de América del Norte. En primera instancia se describe la selección y especificación del modelo DEA a utilizar; posteriormente se realiza la selección de los inputs y outputs, que para la aplicación del DEA se debe considerar la relevancia de unos y otros en la actividad de las DMUs a evaluar. La literatura DEA aplicada a puertos muestra cierta variedad en las entradas y salidas consideradas, lo cual obedece en gran medida, a la disponibilidad de la información requerida. Por último, se especifican las bases de datos que se utilizarán para llevar a cabo el análisis.

3.1 El Modelo del Análisis de la Envolvente de Datos (DEA)

Este estudio utilizará el enfoque DEA para medir y evaluar la eficiencia de las terminales de contenedores en la región de América del Norte. El uso de la metodología DEA destaca algunas cuestiones importantes que deben ser contestadas antes de proceder a un análisis de DEA. Estas preguntas sugeridas por Cook et al. (2014), son las siguientes:

1. ¿Cuál es el propósito de la medición del desempeño y análisis?
2. ¿Cuáles son las unidades de toma de decisiones (DMU) y los *inputs* que se utilizarán para caracterizar el rendimiento de las DMUs?
3. ¿Cuál es un número apropiado de DMUs, dado el número de *inputs* y *outputs* elegidos?
4. ¿Cuál es la orientación apropiada del modelo?

Dando lugar a las respuestas planteadas con anterioridad, la presente investigación tiene como objetivo determinar el nivel de eficiencia técnica de las terminales de contenedores de los principales puertos de América del Norte, así mismo se empleará el modelo DEA con rendimientos variables a escala (BCC). Es importante recalcar que con la utilización de este modelo aplicado se analizará la operación de la terminal, más que los resultados económicos de dicha actividad.

La estructura matemática del modelo BCC es:

$$\max \theta - \left(\sum_{j=1}^n \lambda_j^- + \sum_{j=1}^n \lambda_j^+ \right) \quad (3.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{rj} + \lambda_j^- = \theta x_{r0} \quad r = 1, 2, \dots, R \quad (3.2)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} + \lambda_j^+ = y_{r0} \quad r = 1, 2, \dots, R \quad (3.3)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (3.4)$$

$$\lambda_j^-, \lambda_j^+, \lambda_j \geq 0 \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (3.5)$$

Es de suma importancia puntualizar que el modelo anterior tiene una orientación hacia *output*, por lo que en la función objetivo se trata de maximizar el *output*, que, para esta investigación, se trata de maximizar el movimiento anual de TEU's a partir del aprovechamiento correcto de cada uno de los *inputs*. Cabe destacar que la diferencia con un modelo CCR, es la introducción de la restricción de convexidad $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ en el modelo BCC, como se describió con anterioridad (Coll y Blasco, 2006). La elección del modelo descrito anteriormente se basa en la revisión de la literatura que se realizó (véase anexo 2) y la aplicación de pruebas estadísticas, ya que cumple con el objetivo de la investigación presente.

3.2 La Productividad Total de los Factores a través del Índice Malmquist

El concepto de índice de productividad de Malmquist (IPM) fue introducido por Malmquist (1953). Se trata de un índice que representa el crecimiento de la PTF de una unidad de decisión (DMU). Refleja el progreso en eficiencia, tránsito hacia la frontera, si la unidad no estaba entre las inicialmente eficientes, en relación con el progreso de la frontera tecnológica en el tiempo, es decir, las unidades inicialmente eficientes, incrementan su productividad en el tiempo, batiendo sus propias marcas, bajo un marco de múltiples insumos y productos (Ferro y Romero, 2011).

Moorsteen (1961) fue el primero en utilizar el índice Malmquist en la teoría de la producción. También considera la presencia de ineficiencias desde el punto de vista del *output*, interpretando las diferencias en productividad (entre empresas o de una misma empresa en momentos diferentes del tiempo) como aquellas capacidades distintas para incrementar el *output* sin consumo adicional de recursos, dadas unas restricciones impuestas en la tecnología.

Posteriormente, Caves, Christensen y Diewert (1982) adaptaron el problema de una empresa observada en dos periodos de tiempo a dos empresas observadas en un mismo periodo de tiempo. Además, establecieron el IPM a través de dos enfoques, el primero analiza las diferencias de productividad como las diferencias en el máximo *output* alcanzable dados unos niveles de *inputs*, y es el llamado índice Malmquist de productividad basado en el *output*. Por su parte, el índice Malmquist de productividad basado en el *input* analiza las diferencias de productividad como las diferencias en el mínimo nivel de *inputs* que permite producir unos niveles de *outputs* determinados. Caves et. al. (1982) demuestran que ambos índices proporcionan idénticos resultados solo en el caso de que los rendimientos a escala sean constantes.

En el índice que elaboran Caves et. al. (1982), se excluía la posibilidad de que las empresas pudieran mostrar comportamientos ineficientes, suponían que las empresas eran eficientes, es decir que operaban en su frontera. Sin embargo, el

desarrollo posterior de Färe, Grosskopf, Lindgren y Roos (1989) y Färe et al. (1994) plantea la posibilidad de descomponer los avances en productividad a través del índice Malmquist relacionándolo con las medidas de eficiencia de Farrell (1957).

Este índice de productividad se puede elaborar a partir del cálculo de funciones distancia, midiendo la distancia de una unidad productiva en dos periodos determinados; se asume que cada periodo de tiempo $t = 1, \dots, T$, la producción tecnológica \mathbb{R}^n la transformación de $inputs \mathbb{R}^m_+$ y en $outputs \mathbb{R}^n_+$.

Basándose en la tecnología del periodo inicial t , el índice Malmquist de productividad queda expresado de la siguiente manera (Färe et al., 1994):

$$\mathbb{R}^n = \{(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m) : \mathbb{R}^n \subseteq \mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m \subseteq \mathbb{R}^m\} \quad (3.6)$$

Se asume que \mathbb{R}^n satisface ciertos principios que bastan para definir funciones de distancia de salidas significativas: la distancia de la función *output* es definida en t como:

$$D_0(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m) = \inf\{\alpha : (\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m) \in \mathbb{R}^n\} = (\inf\{\alpha : (\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m) \in \mathbb{R}^n\})^{-1} \quad (3.7)$$

Esta función es definida como el recíproco de la máxima expansión proporcional del vector *output* \mathbb{R}^n dados los *inputs* \mathbb{R}^m . Esto caracteriza por completo a la tecnología. En particular se observa que $D_0(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m) \leq 1$ si y solo si $(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m) \in \mathbb{R}^n$. Por lo tanto,

$D_0(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m) = 1$ si y solo si $(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$ está en la frontera de la tecnología, así pues esto ocurre cuando la producción es técnicamente eficiente (Farrell, 1957).

Para definir el IPM se necesita definir la distancia de las funciones con respecto a dos diferentes periodos de tiempo:

$$D_0(\mathbb{R}^{n+1}, \mathbb{R}^{m+1}) = \inf\{\alpha : (\mathbb{R}^{n+1}, \mathbb{R}^{m+1}) \in \mathbb{R}^n\} \quad (3.8)$$

Esta distancia de la función mide el máximo cambio proporcional que se requiere de *outputs* $(\mathbb{R}^{n+1}, \mathbb{R}^{m+1})$ factible en relación con la tecnología en t . Así pues, se puede definir la distancia de la función que mide el máximo cambio proporcional en un *output* requerido para hacer $\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m$ en relación con la tecnología de $t+1$, el cual lo nombran $D_0^{t+1}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$.

Por su parte Caves et. al. (1982) definen el IMP con la siguiente expresión:

$$\frac{Q_{t,t}}{Q_{t,t}} = \frac{\theta^{t+1}(Q^{t+1}, Q^{t+1})}{Q_0^t(Q^t, Q^t)} \quad (3.9)$$

En la fórmula 3.9, la tecnología en un periodo t es la referencia tecnológica. Alternativamente, el IMP puede obtenerse basándose en la tecnología existente en el periodo posterior $t+1$, como se observa a continuación:

$$\frac{Q_{t,t+1}}{Q_{t,t+1}} = \frac{\theta^{t+1}(Q^{t+1}, Q^{t+1})}{Q_0^{t+1}(Q^t, Q^t)} \quad (3.10)$$

Para evitar la elección de un punto de referencia de manera arbitraria, se especifica el índice Malmquist para el cambio de la productividad en resultados como la media geométrica de los dos IMP de tipo Caves et. al. (1982):

$$M_{0,t}(Q^{t+1}, Q^{t+1}, Q^t, Q^t) = \left[\left(\frac{\theta^{t+1}(Q^{t+1}, Q^{t+1})}{Q_0^t(Q^t, Q^t)} \right) \left(\frac{\theta^{t+1}(Q^{t+1}, Q^{t+1})}{Q_0^{t+1}(Q^t, Q^t)} \right) \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

El índice propuesto por Färe et. al. (1989, 1994) resulta más adecuado para estudiar largos periodos de tiempo, además permite abordar el cambio tecnológico, en consecuencia, con esta propuesta consiguen que la tecnología de referencia cambie con el paso del tiempo:

$$M_{0,t}(Q^{t+1}, Q^{t+1}, Q^t, Q^t) = \frac{\theta^{t+1}(Q^{t+1}, Q^{t+1})}{Q_0^t(Q^t, Q^t)} \times \left[\left(\frac{\theta^{t+1}(Q^{t+1}, Q^{t+1})}{Q_0^{t+1}(Q^t, Q^t)} \right) \left(\frac{\theta^t(Q^t, Q^t)}{Q_0^{t+1}(Q^t, Q^t)} \right) \right]^{1/2} \quad (3.12)$$

Donde la relación fuera de los corchetes mide el cambio en la eficiencia relativa entre los años t y $t+1$. La media geométrica de las dos relaciones dentro de los corchetes refleja el cambio en la tecnología entre los dos periodos evaluados

Q^t y Q^{t+1} , como se aprecia enseguida:

$$\frac{Q_{t,t}}{Q_{t,t}} = \frac{\theta^{t+1}(Q^{t+1}, Q^{t+1})}{Q_0^t(Q^t, Q^t)} \quad (3.13)$$

$$\left[\left(\frac{\theta^{t+1}(Q^{t+1}, Q^{t+1})}{Q_0^{t+1}(Q^t, Q^t)} \right) \left(\frac{\theta^t(Q^t, Q^t)}{Q_0^{t+1}(Q^t, Q^t)} \right) \right]^{1/2} \quad (3.14)$$

El primer elemento se relaciona con el cambio en la posición relativa respecto a la frontera tecnológica que resulta de la gestión del propio proceso productivo, y concretamente de la capacidad para incorporar el progreso tecnológico en su función de producción. Por su parte, la segunda fuente de productividad considera la existencia de progreso técnico y hace referencia a un conjunto de innovaciones y cambios en las técnicas que desplazan la frontera de producción obteniéndose, así, un output mayor sin variar la cantidad de inputs utilizados o el mismo nivel de producción con un consumo más reducido de factores (Delfín y Navarro, 2015).

El cambio de la eficiencia técnica, medida como cociente entre las eficiencias entre los períodos que se consideran, si el cociente es > 1 revela una mejora en la eficiencia en el periodo t a $t + 1$, si es < 1 la eficiencia ha empeorado y si es $= 1$ la eficiencia se ha mantenido. Por su parte, el cambio tecnológico, si este adopta un valor > 1 indica que ha habido progreso en la tecnología, si es < 1 , que hay regresión tecnológica, y si es $= 1$, la tecnología se ha mantenido. Así, la multiplicación entre estos dos cocientes da como resultado el índice Malmquist. Como consecuencia, si el cociente es superior a la unidad indica que se ha producido un incremento en la productividad entre dos periodos (t y $t + 1$) debido a mejoras en la eficiencia o mejoras en la tecnología. En cambio, los resultados menores a la unidad, significan que hay una reducción en la productividad entre ambos periodos, por últimos, si el cociente $= 1$ significa que la productividad se ha mantenido (Delfín y Navarro, 2015).

Para calcular el índice Malmquist, Färe et al. (1994) utilizan los rendimientos de escala constante (CRS), pero además proponen el cambio en la eficiencia técnica global (ETG), la cual se puede descomponer en el cambio de la eficiencia técnica pura (ETP), que se concierne a la gestión exclusivamente técnica de la empresa independientemente de su tamaño; y el cambio de la eficiencia de escala (EE), derivada del tamaño de la unidad productiva en relación con la escala óptima. Esta descomposición se obtiene incorporando el supuesto de una tecnología con rendimientos de escala variables:

$$\begin{aligned}
D_0^t(x^t, y^t) &= \frac{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^t(x^t, y^t)} = \left\{ \frac{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^t(x^t, y^t)} \right\} \frac{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^t(x^t, y^t)} \\
&= D_0^t(x^t, y^t) * D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}) \tag{3.15}
\end{aligned}$$

Como se comentó anteriormente, el índice Malmquist tiene dos vertientes, y su estimación requiere el cálculo de las funciones de distancia pertinentes a la orientación. Färe, Grosskopf y Roos (1998) proponen una manera de abordar esta situación, el cálculo de este es a través de la programación matemática DEA, donde la función de distancia de la DMU en el periodo t y $t+1$, requiere resolver cuatro problemas de programación lineal: $D_0^t(x^t, y^t)$, $D_0^{t+1}(x^t, y^t)$, $D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1})$ y $D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})$. Para ello, se toma en cuenta que la función de distancia de *output* es recíproca a la medida de eficiencia técnica de Farrell (1957) orientada al *output*:

$$\begin{aligned}
[D_0^t(x^t, y^t)]^{-1} &= \max \theta \\
\theta \sum_{i=1}^n x_i^t \lambda_j &\geq x_i^t \theta \lambda_j = 1, \dots, n. \\
\sum_{i=1}^m y_i^t \lambda_j &\geq y_i^t \theta \lambda_j = 1, \dots, m. \\
\lambda_j &\geq 0 \quad j = 1, \dots, k. \tag{3.16}
\end{aligned}$$

Donde x e y representan los insumos y productos, respectivamente, del proceso productivo de la DMU. K representa 1, 2, ..., k DMU's, utilizando $n=1, 2, \dots, n$ *inputs* x_i^t , en cada periodo de tiempo $t=1, 2, \dots, T$. Esos *inputs* se usan para producir $m=1, 2, \dots, M$ *outputs* y_i^t (Delfín y Navarro, 2015).

Para calcular la función de distancia con respecto del periodo $t + 1$, se utiliza una expresión matemática similar, para lo cual se sustituye el superíndice t por $t + 1$ en las ecuaciones anteriores (3.16) presentadas. Con respecto a la función distancia $D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})$, se estima con la sustitución del superíndice t por $t + 1$. Así

mismo, la estimación de la función $\sigma^{t+1}(\sigma^t, \sigma^t)$ se concreta reemplazando el superíndice t por $t + 1$.

El índice Malmquist permite la descomposición en el cambio productivo en mejoras de eficiencia técnica y en cambios en la tecnología; además permite describir una tecnología con múltiples insumos y productos sin la necesidad de especificar un objetivo de comportamiento, tal como la minimización de costos o la maximización de beneficios (Coelli et al., 1998).

3.3 Selección de DMU's, *Inputs* y *Outputs*

Los puertos son organizaciones complejas, donde se dan cita operadores que desarrollan actividades de diversa naturaleza, tienen objetivos diferentes y están sujetos a competencia y regulación dispares. Por ello, no es conveniente analizar el puerto globalmente, sino que es preferible centrar el estudio en una actividad concreta, que debe estar claramente especificada (González y Trujillo, 2006).

Debido a que el tipo de carga contenerizada tiene mayores ventajas técnicas y económicas sobre otras cargas, y su crecimiento a nivel mundial ha sido un éxito y va en aumento, por ello se decidió centrar el estudio en este tipo de carga. Así pues, por la importancia comercial de la ruta América del Norte que maneja alrededor del 52.5% de la carga contenerizada se decidió centrar el estudio en la región de América del Norte (UNCTAD, 2015).

Se sabe que en América del Norte existen alrededor de 1000 puertos, pero aunado a lo expresado con anterioridad por González y Trujillo (2006), se decidió acotar la investigación a aquellos puertos que cuenten con terminal de contenedores, con el fin de homogenizar la muestra de estudio, en la tabla 3 se pueden apreciar cuantos puertos hay en la región.

Tabla 3. Puertos en la región de América del Norte

País	Número de Puertos
Estados Unidos de Norte América	552
Canadá	239
México	117

Fuente: Elaboración propia con base en *World Port Source*, 2016.

Según Norman y Stoker (1991) sugieren que el número mínimo de DMU's a analizar sean 20, en cambio Banker et. al. (1984) proponen que los *inputs* más *outputs* $\leq 0.3 * DMU's$, otros autores como Lo et. al (2001) proponen que el número de DMU's debe ser al menos dos veces la suma de *inputs* y *outputs*.

El requisito básico para un análisis de eficiencia confiable es la selección apropiada de DMU's portuarias homogéneas (Almawshekia y Shahb, 2015), se seleccionó como DMUs aquellas con características operativas centradas únicamente en terminales de contenedores. La selección de las terminales de contenedores en los puertos se realiza en relación con el valor de más de 150,000 TEU's movilizados anualmente, ya que al elegir esta cantidad podemos enriquecer el estudio al hacer la comparación entre puertos grandes y aquellos considerados como pequeños , en la tabla 4 se puede apreciar los puertos que contienen las terminales que serán objeto de análisis en esta investigación, cabe mencionar que dicha selección se basó en el documento *NAFTA Container Port Ranking 2016*, que publica la AAPA anualmente.

Tabla 4. Puertos con terminales de contenedores sujetos a análisis

Puerto	País	Ranking en NAFTA	Movilización de TEU's
Los Ángeles	Estados Unidos	1	8,856,783
Long Beach	Estados Unidos	2	6,775,170
New York/New Jersey	Estados Unidos	3	6,251,953
Savannah	Estados Unidos	4	3,644,521
Seattle/Tacoma Alliance	Estados Unidos	5	3,615,752
Metro Port Vancouver (BC)	Canadá	6	2,929,585

Hampton Roads	Estados Unidos	7	2,655,707
Manzanillo	México	8	2,580,660
Oakland	Estados Unidos	9	2,369,641
Houston	Estados Unidos	10	2,182,720
Charleston	Estados Unidos	11	1,996,276
Montreal	Canadá	12	1,447,566
Honolulu (FY)	Estados Unidos	13	1,211,997
Lázaro Cárdenas	México	15	1,115,452
Miami (FY)	Estados Unidos	17	1,028,156
Veracruz	México	19	965,294
Prince Rupert	Canadá	21	736,663
Altamira	México	22	684,931
Halifax	Canadá	24	480,722
Ensenada	México	33	191,708

Fuente: Elaboración propia con base en AAPA, 2016.

La identificación de los *inputs* y los *outputs* en la valoración de las DMU's son tan complicadas como cruciales (Thanassoulis, 2001). Los *inputs* y *outputs* deben reflejar los factores propios de cualquier proceso productivo, a saber: tierra, capital, trabajo y gestión (Tongzon, 2001). La selección de variables es el paso primordial en cualquier análisis de eficiencia ya que pesa sobre la exactitud del análisis.

Dowd y Leschine (1990) y Cullinane y Wang (2010) señalan que la producción de terminales de contenedores depende del uso eficiente de mano de obra, tierra y equipo. Por lo tanto, la medición de la producción terminal es un medio para cuantificar la eficiencia en el uso de estos tres recursos (Trujillo et al., 2013).

Las variables *input* y *output* deberían reflejar los objetivos y procesos actuales de la producción portuaria de contenedores tan precisamente como sea posible. Los objetivos de un puerto son una consideración crucial para definir las variables para medir la eficiencia, así pues, los *inputs* y *outputs* deben reflejar los objetivos reales y el proceso de la producción del terminal de contenedores con la mayor exactitud posible (Cullinane et al. 2004).

Para el análisis DEA aplicado en este estudio, los *inputs* y *outputs* incluyen la mayoría de las principales características operaciones de terminales de

contenedores, con respecto a los datos fiables y disponibles sobre eficiencia técnica. De acuerdo con expuesto anteriormente, y siguiendo la bibliografía extensa sobre la eficiencia del puerto de contenedores, (ver anexo 2), las variables seleccionadas en este estudio son las variables de entrada y salida más utilizadas en aplicaciones de DEA a puertos de contenedores como se puede ver en la tabla 5, dentro del anexo 2 se puede revisar la tabla completa de frecuencias en base a la revisión de la literatura realizada.

Tabla 5. Frecuencia de variables que inciden en la eficiencia portuaria

Variable		Frecuencia
<i>Outputs</i>	Movilización de TEUs	45
	Movilización en toneladas	9
<i>Inputs</i>	Longitud del muelle	38
	Área de la superficie	30
	Grúas pórtico	29
	Personal disponible	13
	Profundidad del muelle	9
	Número de atracadores	5

Fuente: Elaboración propia con base en frecuencia de variables incidentes en la medición de la eficiencia portuaria.

Las variables seleccionadas en este estudio consisten en tres *inputs* y un *output*, dicha decisión se basa en la revisión de la literatura (ver anexo 3) y el criterio de que éstos tienen que reflejar los factores del proceso productivo, así mismo en la tabla 6 se puede apreciar cuales son las variables que serán objeto de estudio en la investigación.

Tabla 6. *Inputs* y *Outputs* de la investigación

<i>Inputs</i>	<i>Outputs</i>
Número total de grúas pórtico	Movilización de TEU's anuales
Superficie de la terminal	
Longitud del muelle	

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión de la literatura para la medición de la eficiencia portuaria.

El *output* es el rendimiento del contenedor, que es el número total de contenedores movilizados anualmente en unidades equivalentes de veinte pies (TEUs). El rendimiento del contenedor es indiscutiblemente el indicador más importante y ampliamente aceptado de la salida de los puertos de contenedores, y casi todos los estudios anteriores lo han tratado como una variable de salida (Cullinane y Wang, 2010). Otra consideración es que el rendimiento del contenedor es el indicador más apropiado y analíticamente manejable de la efectividad de la producción de un puerto (Wu *et al.*, 2009).

3.3.1 Correlación de Pearson y análisis factorial

Una vez realizada la revisión de la literatura acerca de los estudios que analizan la eficiencia en los puertos que cuentan con terminales de contenedores se decidió llevar a cabo un análisis factorial para respaldar dicha elección.

El análisis factorial es una técnica de reducción de datos que sirve para encontrar grupos homogéneos de variables a partir de un conjunto de variables. Su propósito consiste en buscar el número mínimo de dimensiones capaces de buscar el máximo de información contenida en los datos. Se encarga de analizar la varianza común a todas las variables, partiendo de una matriz de correlaciones (Carmona, 2014).

Una prueba de adecuación de la muestra es la Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), se utiliza para contrarrestar las magnitudes de los coeficientes de correlación parcial, de forma que cuanto más pequeño sea su valor, mayor será el valor de los coeficientes de correlación parciales, y en consecuencia, menos apropiado realizar un análisis factorial, siendo que las correlaciones no son explicadas por las otras variables (Carmona, 2014).

Por su parte la prueba de esfericidad de Bartlett determina la aplicabilidad del análisis factorial de las variables estudiadas. El modelo es significativo (aceptamos

la hipótesis nula, H_0) cuando se puede aplicar el análisis factorial, es decir, si $\text{sig.} < 0.05$.

En primer lugar, se realizó una matriz de correlaciones, como se puede apreciar en la tabla 7 la correlación de dos *inputs* contra el *output* fue mayor a 0.5, lo que indica que se correlacionan positivamente. Aún que el *input* de “Longitud del muelle” obtuvo un grado de correlación de 0.49, si representa el movimiento de la terminal ya que está reforzado por la cantidad de autores que ha utilizado dicho indicador (véase anexo 2).

Tabla 7. Correlaciones de Pearson

Tabla 7. Correlaciones Pearson					Grúas
TEU's	Correlación de Pearson	1	.726**	.494*	.951**
	Sig. (bilateral)		.000	.027	.000
	N	20	20	20	20
Área (ha)	Correlación de Pearson	.726**	1	.484*	.689**
	Sig. (bilateral)	.000		.031	.001
	N	20	20	20	20
Longitud (m)	Correlación de Pearson	.494*	.484*	1	.455*
	Sig. (bilateral)	.027	.031		.044
	N	20	20	20	20
Grúas	Correlación de Pearson	.951**	.689**	.455*	1
	Sig. (bilateral)	.000	.001	.044	
	N	20	20	20	20

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

Fuente: Elaboración propia con base en los cálculos realizados el SPSS.

Posteriormente se obtuvo el test KMO que nos permite juzgar sobre la calidad de la muestra para ser analizada mediante el análisis factorial, así como, la prueba de esfericidad de Bartlett que comparte el mismo objetivo. En este caso la medida KMO

es de 0.731 y el valor sig. de la prueba Bartlett es 0.000 por lo que es adecuado seguir con el análisis factorial (véase tabla 8).

Tabla 8. Prueba de KMO y Bartlett

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		.731
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi-cuadrado	57.617
	gl	6
	Sig.	.000

Fuente: Elaboración propia con base en los cálculos realizados en el SPSS.

La comunalidad de una variable es la proporción de su varianza explicada por el modelo. En las comunalidades se puede analizar que las variables con valores bajos son las que tienen una explicación en menor medida por el modelo (Zamora *et. al.* 2009). En este caso la variable que es explicada en menor medida es la “Longitud del muelle”, mientras las otras tienen valores altos, por lo que son explicadas en mejor manera (ver tabla 9).

Tabla 9. Comunalidades

	Inicial	Extracción
Área (ha)	1.000	.728
Longitud (m)	1.000	.453
Grúas	1.000	.859
TEU's	1.000	.896

Fuente: Elaboración propia con base en los cálculos realizados en el SPSS.

En la tabla 10 de la varianza total explicada se tienen los autovalores y el porcentaje de varianza que representa cada uno de ellos. Los autovalores reflejan la cantidad de varianza total que está explicada por cada componente, y los porcentajes de la

varianza explicada se obtienen dividiendo el autovalor por la suma de los autovalores, por lo que se extraen componentes con autovalores mayores que uno (Zamora *et. al.* 2009). En este caso se tiene un autovalor mayor que uno, por lo que se extrae un factor que consigue explicar el 73.408 % de la varianza de los datos originales.

Tabla 10. Varianza total explicada

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de extracción de cargas al cuadrado		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	2.936	73.408	73.408	2.936	73.408	73.408
2	.656	16.398	89.806			
3	.361	9.021	98.827			
4	.047	1.173	100.000			
Método de extracción: análisis de componentes principales.						

Fuente: Elaboración propia con base en los cálculos realizados en el SPSS.

Para explicar el 100% de la varianza total se deben extraer todos los componentes, sin embargo, en la matriz de componente sólo nos muestra un componente (ver tabla 11).

Tabla 11. Matriz de componente

	Componente
	1
TEU's	.947
Grúas	.927
Área (ha)	.853
Longitud (m)	.673

Fuente: Elaboración propia con base en los cálculos realizados en el SPSS.

3.4 Bases Estadísticas

Los datos utilizados se obtuvieron principalmente de los sitios web de los terminales y de los informes anuales de la autoridad portuaria, así como de fuentes secundarias como la *American Association of Ports Authorities (AAPA)*, *The International Association of Ports and Harbors (IAPH)*, *The World Shipping Council (WSC)*, *The International Maritime Organization (IMO)* y *United Nations Conference on trade and Development (UNCTAD)*, así como *The Worl Port Source*.

CAPÍTULO 4

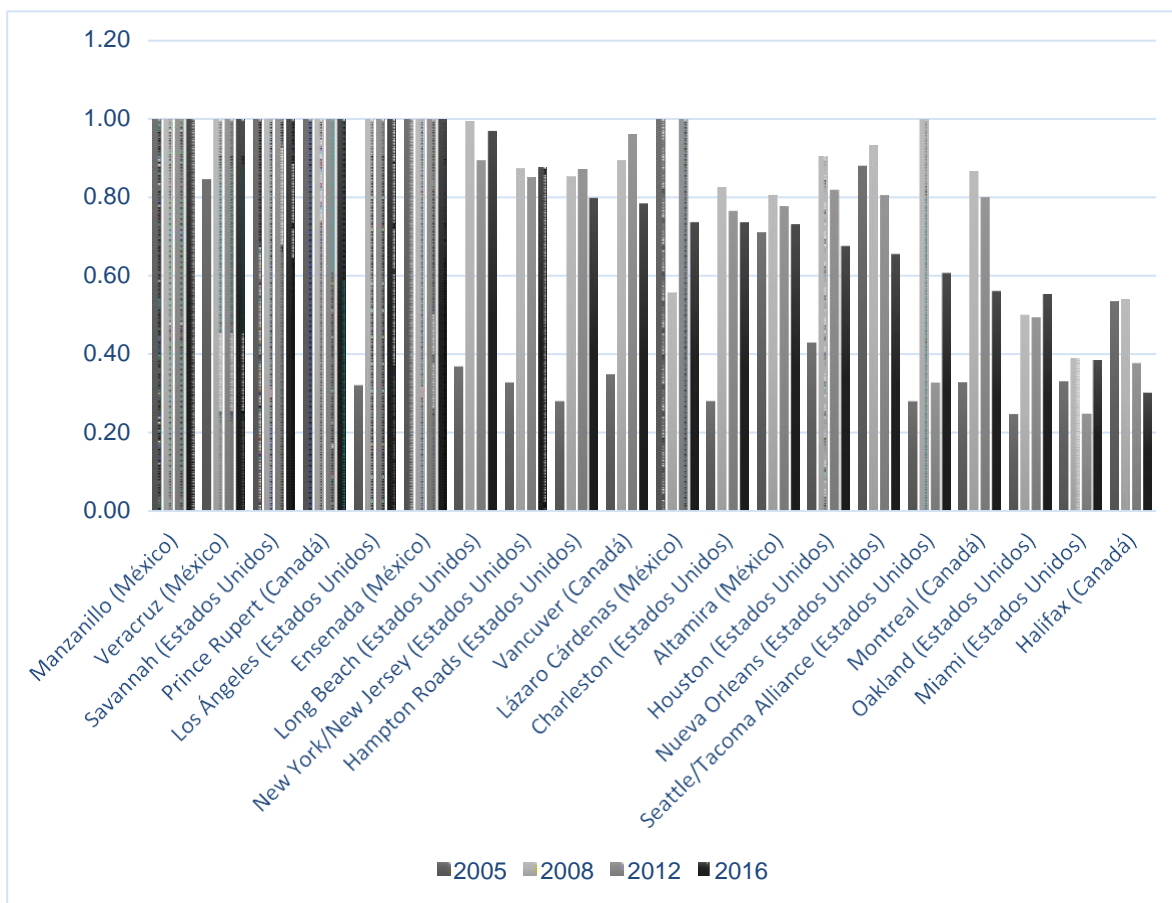
LA EFICIENCIA Y LA PRODUCTIVIDAD EN LOS PUERTOS DE AMÉRICA DEL NORTE: UN ANÁLISIS A TRAVÉS DEL *DATA ENVELOPMENT ANALYSIS (DEA)*

En este capítulo se comentan los resultados que se obtuvieron en la determinación de los niveles de eficiencia técnica de las terminales de contenedores de 20 puertos ubicados en la región de América de Norte, siguiendo los lineamientos metodológicos plasmados en el capítulo anterior, que estuvieron basados en los modelos de frontera no paramétricos DEA con orientación al *output*. Esto permite conocer la situación en la que se encuentran las terminales analizadas, respecto a la eficiencia que guardan entre ellas año con año, así como en un periodo más amplio. En primera instancia se presentan los resultados del cálculo de la eficiencia técnica para cada uno de los puertos objeto de estudio, así como los análisis *slack* y *benchmarking*. Posteriormente se lleva a cabo el análisis de la PTF a través del cálculo del índice *Malmquist*.

4.1 Eficiencia a partir del Modelo DEA-BCC

Los resultados en este modelo muestran que las terminales de contenedores de los puertos bajo análisis obtuvieron un promedio global de eficiencia del 75% en el periodo del 2005-2016. No obstante, sobresalieron los puertos de Manzanillo y Ensenada, de México, el puerto de Savannah de Estados Unidos, y por parte de Canadá sobresalió el puerto de Prince Rupert, ya que fueron eficientes para todo el periodo que fue objeto de estudio (ver gráfica 3)

Gráfica 3. Eficiencia Técnica con Rendimientos Variables a Escala en los Puertos de América del Norte, 2005-2016.



Fuente: Elaboración propia con base en los cálculos realizados a partir de la metodología DEA.

En caso particular de los puertos mexicanos, Veracruz fue eficiente en tres de los cuatro años objeto de estudio, mientras que el puerto de Lázaro Cárdenas sólo lo fue en dos años, ya que fue bajo el movimiento de contenedores que tuvo el puerto con respecto a otros años, lo que ocasionó que se tuviera bajos niveles de eficiencia. Por su parte el puerto de Altamira, no logró ser eficiente en ningún año, su eficiencia máxima alcanzó tan sólo el 81%.

Cabe destacar que, aunque los puertos de los Estados Unidos y Canadá cuentan con mayor infraestructura, la mayoría, no son eficientes debido a que desaprovechan el recurso con el que cuentan. De los doce puertos que fueron

estudiados de Estados Unidos, solo sobresale el puerto de Savannah, el cual fue eficiente durante todo el periodo de estudio, mientras que el puerto de Los Ángeles sólo lo fue en tres años. Para el caso de Canadá, el puerto de Prince Rupert, fue el único eficiente a lo largo del periodo de estudio, mientras que el de Vancouver tuvo un promedio de 75% de eficiencia, sin llegar a ser eficiente en ningún año, por su parte el puerto de Halifax obtuvo los peores resultados de la muestra objeto de estudio (véase tabla 12).

Tabla 12. Eficiencia Técnica con Rendimientos Variables a Escala en los Puertos de América del Norte, 2005-2016.

Puerto	Periodo				Promedio DMU
	2005	2008	2012	2016	
Manzanillo (México)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Veracruz (México)	0.85	1.00	1.00	1.00	0.96
Savannah (Estados Unidos)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Prince Rupert (Canadá)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Los Ángeles (Estados Unidos)	0.32	1.00	1.00	1.00	0.83
Ensenada (México)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Long Beach (Estados Unidos)	0.37	0.99	0.90	0.97	0.81
New York/New Jersey (Estados Unidos)	0.33	0.88	0.85	0.88	0.73
Hampton Roads (Estados Unidos)	0.28	0.85	0.87	0.80	0.70
Vancouver (Canadá)	0.35	0.89	0.96	0.78	0.75
Lázaro Cárdenas (México)	1.00	0.56	1.00	0.74	0.82
Charleston (Estados Unidos)	0.28	0.83	0.76	0.74	0.65
Altamira (México)	0.71	0.81	0.78	0.73	0.76
Houston (Estados Unidos)	0.43	0.91	0.82	0.68	0.71
Nueva Orleans (Estados Unidos)	0.88	0.93	0.81	0.66	0.82
Seattle/Tacoma Alliance (Estados Unidos)	0.28	1.00	0.33	0.61	0.56
Montreal (Canadá)	0.33	0.87	0.80	0.56	0.64
Oakland (Estados Unidos)	0.25	0.50	0.49	0.55	0.45
Miami (Estados Unidos)	0.33	0.39	0.25	0.38	0.34
Halifax (Canadá)	0.53	0.54	0.38	0.30	0.44

Fuente: Elaboración propia con base en los cálculos realizados a partir de la metodología DEA.

4.1.1 Análisis *benchmarking* con rendimientos variables a escala

El análisis *benchmarking* permite identificar los puertos que pueden ser considerados como referencia para aquellos que no fueron eficientes y cuentan con características similares (Delfín y Navarro, 2014). En la tabla 13, para el año 2005, el puerto de Savannah en Estados Unidos fue el puerto que se tomó como referencia mayor número de veces; en el año 2008, el puerto que se tomó como referencia con mayor frecuencia fue el puerto de Manzanillo en México; para el año 2012 el puerto que fue tomado como referencia en mayor número de ocasiones nuevamente fue el puerto de Manzanillo; y, por último, para el año 2016 el puerto de Manzanillo fue tomado como referencia para 15 de los 20 puertos analizados, cabe destacar que el puerto de Manzanillo fue eficiente para todos los años analizados, así como el puerto de Savannah.

Tabla 13. Análisis *Benchmarking* con rendimientos variables a escala en los Puertos de América del Norte, 2005-2016.

PUERTO	2005	2008	2012	2016
Manzanillo (México)	P01(1.00)	P01(1.00)	P01(1.00)	P01 (1.00)
Veracruz (México)	P02(0.49) P11(0.06) P19(0.45)	P04(1.00)	P04(1.00)	P04 (1.00)
Savannah (Estados Unidos)	P11(1.00)	P11(1.00)	P11(1.00)	P11 (1.00)
Prince Rupert (Canadá)	P19 (1.00)	P19(1.00)	P19(1.00)	P19 (1.00)
Los Ángeles (Estados Unidos)	P11(1.00)	P06(1.00)	P06(1.00)	P06 (1.00)
Ensenada (México)	P03(1.00)	P03(1.00)	P03(1.00)	P03 (1.00)
Long Beach (Estados Unidos)	P11(1.00)	P01(0.21) P06(0.79)	P01(0.23) P06(0.77)	P01 (0.30) P06 (0.70)
New York/New Jersey (Estados Unidos)	P11(1.00)	P01(0.20) P04(0.08) P06(0.72)	P01(0.28) P06(0.72)	P01 (0.28) P06 (0.72)
Hampton Roads (Estados Unidos)	P01(0.20) P03(0.17) P11(0.63)	P04(0.67); P06(0.18) P09(0.15)	P04(0.78) P06(0.22)	P01 (0.88) P06 (0.12)
Vancouver (Canadá)	P01(0.64) P11(0.36)	P01(0.81) P06(0.19)	P01(0.29) P04(0.48) P06(0.23)	P01 (0.81) P06 (0.19)
Lázaro Cárdenas (México)	P02(1.00)	P01(0.11) P04(0.87) P06(0.02)	P02(1.00)	P01 (0.33) P04 (0.67)

Charleston (Estados Unidos)	P11(0.72) P19(0.28)	P04(0.77) P06(0.15) P11(0.08)	P04(0.84) P06(0.16)	P01 (0.87) P11 (0.13)
Altamira (México)	P01(0.04) P03(0.91); P11(0.05)	P01(0.25) P04(0.33) P19(0.42)	P01(0.11) P19(0.89)	P01 (0.11) P19 (0.89)
Houston (Estados Unidos)	P01(0.73) P03(0.07) P11(0.20)	P01(0.47) P04(0.40) P06(0.13)	P01(0.36) P04(0.49) P06(0.15)	P01 (0.90) P06 (0.10)
Nueva Orleans (Estados Unidos)	P02(0.67) P11(0.02) P19(0.31)	P01(0.04) P04(0.11) P19(0.85)	P01(0.03) P19(0.97)	P01 (0.03) P19 (0.97)
Seattle/Tacoma Alliance (Estados Unidos)	P11(1.00)	P09(1.00)	P01(0.10) P04(0.29) P06(0.61)	P01 (0.47) P06 (0.53)
Montreal (Canadá)	P01(0.46) P03(0.33) P11(0.21)	P01(0.27) P04(0.63) P06(0.10)	P01(0.44) P04(0.51) P06(0.05)	P01 (0.99) P19 (0.01)
Oakland (Estados Unidos)	P01(0.30) P11(0.70)	P01(0.58) P06(0.42)	P01(0.64) P06(0.36)	P01 (0.73) P06 (0.27)
Miami (Estados Unidos)	P01(0.60) P03(0.17) P11(0.23)	P01(0.42) P04(0.47) P06(0.11)	P01(0.92) P04(0.06) P06(0.02)	P01 (0.98) P06 (0.02)
Halifax (Canadá)	P02(0.51) P03(0.40) P11(0.09)	P01(0.22) P04(0.77) P06(0.01)	P01(0.35) P04(0.45) P19(0.20)	P01 (0.46) P19 (0.54)
<p>P01= Manzanillo (México). P02= Lázaro Cárdenas (México). P03= Ensenada (México). P04= Veracruz (México). P06= Los Ángeles (Estados Unidos). P11= Savannah (Estados Unidos). P19= Prince Rupert (Canadá).</p>				

Fuente: Elaboración propia con base en los cálculos realizados a partir de la metodología DEA.

4.1.2 Análisis *slack* con rendimientos variables a escala

El análisis de las variables *slacks* refleja que para el año 2005, 14 de los 20 puertos estudiados están desaprovechando la longitud de sus muelles para la cantidad de TEUs que movilizan, en cuanto a la superficie de la terminal, sólo cinco de los puertos la desaprovechan, así mismo, en lo referente al uso de las grúas de los 20 puertos analizados son siete los que no aprovechan eficientemente este recurso. En el caso particular de los puertos mexicanos, los puertos de Veracruz y Altamira desaprovecharon la longitud de sus muelles, mientras tanto en lo referente al aprovechamiento de la superficie y grúas tenemos que, ninguno de los puertos mexicanos desaprovechó este recurso (ver tabla 14).

Tabla 14. Análisis *Slacks* con Rendimientos Variables a Escala en los Puertos de América del Norte, 2005.

Puerto	Superficie	Longitud muelle	Grúas
Manzanillo (México)	0	0	0
Veracruz (México)	0	-96.66	0
Savannah (Estados Unidos)	0	0	0
Prince Rupert (Canadá)	0	0	0
Los Ángeles (Estados Unidos)	-236.12	-7102.00	-83
Ensenada (México)	0	0	0
Long Beach (Estados Unidos)	-103.58	-4286.00	-59
New York/New Jersey (Estados Unidos)	-20	-5100.00	-20
Hampton Roads (Estados Unidos)	0	-325.17	0
Vancouver (Canadá)	0	-1924.83	-26
Lázaro Cárdenas (México)	0	0	0
Charleston (Estados Unidos)	-218.89	-327.78	0
Altamira (México)	0	-455.38	0
Houston (Estados Unidos)	0	0	-2
Nueva Orleans (Estados Unidos)	0	-163.89	0
Seattle/Tacoma Alliance (Estados Unidos)	-65.98	-5558.00	-5
Montreal (Canadá)	0	-143.00	0
Oakland (Estados Unidos)	0	-4411.20	-36
Miami (Estados Unidos)	0	-162.19	0
Halifax (Canadá)	0	-1369.49	0

Fuente: Elaboración propia con base en los cálculos realizados a partir de la metodología DEA.

Para el año 2008, el recurso que fue desaprovechado con mayor frecuencia fue la longitud del muelle, ya que 10 de los 20 puertos sujetos a análisis no lo aprovecharon con eficiencia, en cuanto al empleo eficiente de las grúas tan sólo 4 puertos desaprovecharon este *input*, por último, en cuanto al aprovechamiento de la superficie, se puede observar que tan sólo dos puertos tienen espacios desaprovechados. Cabe destacar que, en el caso particular de los puertos mexicanos, sólo el puerto de Altamira desaprovechó la longitud, mientras que los demás puertos mexicanos en este año en particular aprovecharon de manera eficiente sus recursos (véase tabla 15).

Tabla 15. Análisis *Slacks* con Rendimientos Variables a Escala en los Puertos de América del Norte, 2008.

Puerto	Superficie	Longitud muelle	Grúas
Manzanillo (México)	0	0	0
Veracruz (México)	0	0	0
Savannah (Estados Unidos)	0	0	0
Prince Rupert (Canadá)	0	0	0
Los Ángeles (Estados Unidos)	0	0	0
Ensenada (México)	0	0	0
Long Beach (Estados Unidos)	0	-929.54	-12
New York/New Jersey (Estados Unidos)	0	-978.84	0
Hampton Roads (Estados Unidos)	-43.55	0	0
Vancouver (Canadá)	0	-483.41	-17
Lázaro Cárdenas (México)	0	0	-8
Charleston (Estados Unidos)	-533.07	0	0
Altamira (México)	0	-124.80	0
Houston (Estados Unidos)	0	-128.34	0
Nueva Orleans (Estados Unidos)	0	-165.74	0
Seattle/Tacoma Alliance (Estados Unidos)	0	0	0
Montreal (Canadá)	0	-287.23	0
Oakland (Estados Unidos)	0	-1934.13	-2
Miami (Estados Unidos)	0	-417.92	0
Halifax (Canadá)	0	-916.82	0

Fuente: Elaboración propia con base en los cálculos realizados a partir de la metodología DEA.

En la tabla 16, se tiene el análisis *slacks* para el año 2012 y se puede observar que nuevamente el recurso que fue desaprovechado con mayor frecuencia fue el de la longitud del muelle, sólo dos desaprovecharon la superficie y cinco fueron los puertos que desaprovecharon las grúas. En cuanto al desempeño de los puertos mexicanos, tan sólo el puerto de Altamira, para este año, no aprovechó de manera eficiente la longitud del muelle, mientras los puertos de Manzanillo, Veracruz, Ensenada y Lázaro Cárdenas aprovecharon eficientemente sus recursos.

Tabla 16. Análisis *Slacks* con Rendimientos Variables a Escala en los Puertos de América del Norte, 2012.

Puerto	Superficie	Longitud muelle	Grúas
Manzanillo (México)	0	0	0
Veracruz (México)	0	0	0
Savannah (Estados Unidos)	0	0	0
Prince Rupert (Canadá)	0	0	0
Los Ángeles (Estados Unidos)	0	0	0
Ensenada (México)	0	0	0
Long Beach (Estados Unidos)	0	-972.91	-12
New York/New Jersey (Estados Unidos)	0	-1052.88	-2
Hampton Roads (Estados Unidos)	-86.63	-734.63	0
Vancouver (Canadá)	0	-2203.10	0
Lázaro Cárdenas (México)	0	0	0
Charleston (Estados Unidos)	-747.66	-85.85	0
Altamira (México)	0	-641.51	-4
Houston (Estados Unidos)	0	-424.67	0
Nueva Orleans (Estados Unidos)	0	-192.42	-1
Seattle/Tacoma Alliance (Estados Unidos)	0	-1624.64	0
Montreal (Canadá)	0	-1105.67	0
Oakland (Estados Unidos)	0	-2316.64	-5
Miami (Estados Unidos)	0	-792.95	0
Halifax (Canadá)	0	-856.10	0

Fuente: Elaboración propia con base en los cálculos realizados a partir de la metodología DEA.

Por último, para el año 2016, la mayoría de los puertos no aprovecharon eficientemente las grúas pòrtico, así como la longitud de sus muelles para la cantidad de TEUs que movilizan anualmente, de 20 puertos 12 desaprovechan la longitud del muelle de la terminal de contenedores, en la misma dirección 13 de los puertos están desaprovechando las grúas pòrtico, pocos son los puertos que no aprovechan eficientemente la superficie, ya que tan sólo 3 de los 20 puertos la desaprovechan (ver tabla 17). Es interesante resaltar que aquellos puertos más grandes desaprovechan más los recursos con los que cuentan y en mayor magnitud, que aquellos puertos relativamente más pequeños. En cuanto a los puertos mexicanos, 3 de los 5 puertos analizados utilizaron eficientemente los recursos, así pues, Lázaro Cárdenas tiene espacios desaprovechados, mientras que, Altamira tiene 5 grúas desaprovechadas y casi 690 metros de sus muelles no son utilizados de manera eficiente.

Tabla 17. Análisis *Slacks* con Rendimientos Variables a Escala en los Puertos de América del Norte, 2016.

Puerto	Superficie	Longitud muelle	Grúas
Manzanillo (México)	0	0	0
Veracruz (México)	0	0	0
Savannah (Estados Unidos)	0	0	0
Prince Rupert (Canadá)	0	0	0
Los Ángeles (Estados Unidos)	0	0	0
Ensenada (México)	0	0	0
Long Beach (Estados Unidos)	0	-672.42	-10
New York/New Jersey (Estados Unidos)	0	-929.37	-3
Hampton Roads (Estados Unidos)	-101.24	-432.17	0
Vancouver (Canadá)	0	-1993.01	-2
Lázaro Cárdenas (México)	-15.14	0	-3
Charleston (Estados Unidos)	-742.56	0	-1
Altamira (México)	0	-688.31	-5
Houston (Estados Unidos)	0	-269.53	-3
Nueva Orleans (Estados Unidos)	0	-205.90	-2
Seattle/Tacoma Alliance (Estados Unidos)	0	-1711.40	-3
Montreal (Canadá)	0	-1008.12	-4
Oakland (Estados Unidos)	0	-2693.00	-1
Miami (Estados Unidos)	0	-1153.69	-10
Halifax (Canadá)	0	-922.62	-4

Fuente: Elaboración propia con base en los cálculos realizados a partir de la metodología DEA.

Con la realización del análisis *slacks* se puede tener una perspectiva con certeza de cuál es la cantidad óptima que se requiere de cada uno de los *inputs* para que el puerto pueda operar con eficiencia (Delfín y Navarro, 2014). Aunque este tipo de análisis mencionan las unidades a disminuir o aumentar no siempre pueden ser interpretadas al pie de la letra, ya que, en muchas ocasiones, los *inputs* y *outputs* no pueden ser movidos con holgura dependiendo el tipo de actividad o giro de la DMU.

4.2 Productividad Total de los Factores a partir del Índice Malmquist

En relación con la PTF, se observa que existe en promedio una disminución de la productividad en los puertos que han sido objeto de estudio, durante el periodo de 2005-2016. En cambio, para el periodo del 2012-2016 en promedio se dio una disminución en la productividad, exceptuando los puertos de Long Beach, Seattle, New York, y Savannah, en Estados Unidos; siendo este periodo el que tuvo la productividad más baja.

En el periodo de 2008-2012 se dio aumento en la productividad, con una tasa de crecimiento del 9.85%, donde destacaron los puertos de Manzanillo, en México; por su parte en Estados Unidos destacaron los puertos de Long Beach, Seattle, New York, Hampton Roads, Houston, Charleston, New Orleans y Miami; por su parte en Canadá únicamente el puerto de Prince Rupert tuvo un aumento en la productividad (ver tabla 18).

Tabla 18. Índice Malmquist de los puertos en América del Norte, 2005-2016.

Puerto	2005-2008	2008-2012	2012-2016	2005-2016
Manzanillo (México)	0.84	1.09	0.79	0.91
Lázaro Cárdenas (México)	0.77	0.49	1.11	0.79
Ensenada (México)	0.65	0.98	0.73	0.79
Veracruz (México)	0.93	1	0.91	0.95
Altamira (México)	0.73	0.77	0.84	0.78
Los Ángeles (Estados Unidos)	0.93	1	0.94	0.96
Long Beach (Estados Unidos)	1.17	1.07	0.8	1.01
Vancouver (Canadá)	0.71	0.9	0.93	0.85
Seattle/Tacoma Alliance (Estados Unidos)	1.07	3.54	0.52	1.71
New York/New Jersey (Estados Unidos)	1.18	1.04	0.88	1.03
Savannah (Estados Unidos)	1.26	0.95	0.81	1.01
Hampton Roads (Estados Unidos)	1	1.04	0.79	0.94
Oakland (Estados Unidos)	1.07	0.99	0.63	0.90
Houston (Estados Unidos)	0.79	1.07	0.88	0.91
Charleston (Estados Unidos)	0.98	1.08	0.76	0.94
Montreal (Canadá)	0.41	1.02	0.95	0.79
Nueva Orleans (Estados Unidos)	0.73	1.12	0.44	0.76
Miami (Estados Unidos)	0.95	1.38	0.61	0.98
Prince Rupert	0.66	0.44	0.99	0.70
Halifax	0.76	1	0.87	0.88
Promedio	0.8795	1.0985	0.809	0.929

Fuente: Elaboración propia con base en los cálculos realizados a partir de la metodología DEA.

En el caso particular del puerto de Seattle, quien obtuvo la mayor tasa de crecimiento en cuanto a productividad en el periodo 2005-2016, se debió al cambio tecnológico, por su parte el puerto de Long Beach y New York, obtuvieron una tasa de crecimiento de la productividad de tan sólo el 1%, se debió nuevamente al cambio tecnológico que presentaron dichos puertos. Por su parte el puerto Savannah que también obtuvo un crecimiento en la productividad para el periodo 2005-2016 fue en gran medida por el cambio en la eficiencia técnica global (véase tabla 19).

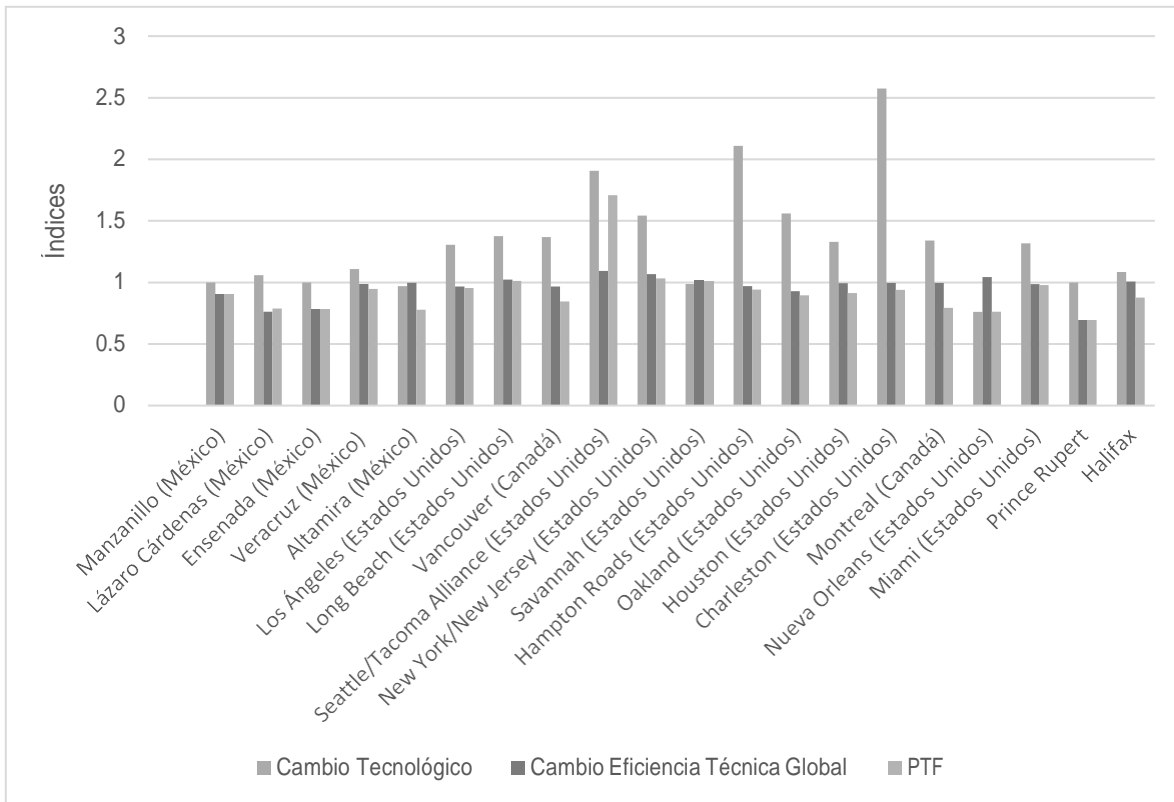
Tabla 19. Productividad de los puertos en América del Norte, 2005-2016.

Puerto	Cambio Tecnológico	Cambio Eficiencia Técnica Global	Cambio Eficiencia Técnica Pura	PTF
2005-2016				
Manzanillo (México)	1.00	0.91	1.00	0.9067
Lázaro Cárdenas (México)	1.06	0.76	1.21	0.7900
Ensenada (México)	1.00	0.79	1.00	0.7867
Veracruz (México)	1.11	0.99	0.89	0.9467
Altamira (México)	0.97	1.00	0.85	0.7800
Los Ángeles (Estados Unidos)	1.31	0.97	0.84	0.9567
Long Beach (Estados Unidos)	1.38	1.02	0.83	1.0133
Vancouver (Canadá)	1.37	0.97	0.78	0.8467
Seattle/Tacoma Alliance (Estados Unidos)	1.91	1.09	1.23	1.7100
New York/New Jersey (Estados Unidos)	1.54	1.07	0.79	1.0333
Savannah (Estados Unidos)	0.99	1.02	1.00	1.0067
Hampton Roads (Estados Unidos)	2.11	0.97	0.71	0.9433
Oakland (Estados Unidos)	1.56	0.93	0.75	0.8967
Houston (Estados Unidos)	1.33	0.99	0.83	0.9133
Charleston (Estados Unidos)	2.57	1.00	0.71	0.9400
Montreal (Canadá)	1.34	1.00	0.81	0.7933
Nueva Orleans (Estados Unidos)	0.76	1.04	1.11	0.7633
Miami (Estados Unidos)	1.32	0.99	0.90	0.9800
Prince Rupert	1.00	0.70	1.00	0.6967
Halifax	1.09	1.01	0.88	0.8767
Promedio	1.34	0.96	0.91	0.9290

Fuente: Elaboración propia con base en los cálculos realizados a partir de la metodología DEA.

En la gráfica 4 se observa como el cambio tecnológico tuvo una tendencia creciente a lo largo del periodo objeto de estudio, mientras que la eficiencia técnica global se mantuvo a lo largo del periodo. El 70% de los puertos presentaron progreso tecnológico durante el periodo de 2005-2016, destacándose el puerto de Charleston en Estados Unidos; mientras que solo el 30% mostraron una mejora en la eficiencia, se destacó el puerto de Nueva Orleans.

Gráfica 4. Cambio en la productividad de los puertos en América del Norte, 2005-2016.



Fuente: Elaboración propia con base en los cálculos realizados a partir de la metodología DEA.

A pesar de que en general hubo progreso en el cambio tecnológico, éste no se vio reflejado en la productividad, ya que no hubo mejora en la eficiencia ya que los insumos no fueron aprovechados al máximo. En caso particular, puerto de Charleston presentó el mayor progreso tecnológico, tuvo una baja en la productividad, producto de una mala utilización de los insumos. En general podemos establecer que la eficiencia fue la que determinó la reducción en la productividad en los puertos que fueron analizados en el periodo del 2005-2016.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Puesto que los puertos contribuyen al desarrollo de los países, ya que juegan un rol esencial en el comercio internacional, actúan como promotores del crecimiento de las áreas en las que se encuentran, son uno de los principales eslabones dentro de un sistema logístico y tienen una importancia fundamental en la economía de la región a la cual pertenecen. Por tal motivo, el análisis de la eficiencia y productividad en los puertos es un punto crítico para la implementación de estrategias que permitan a los países ser más competitivos. Ciertamente como establece Díaz (2008) los puertos son fundamentales en la política económica de los países, ya que permiten hacer más eficiente el sistema de transporte de los mismos, fomentan el crecimiento del comercio con otros países, alivian la congestión de los principales corredores terrestres, mejoran los enlaces marítimos con las regiones insulares y periféricas de un país y refuerzan el transporte multimodal y la logística del transporte, es por ello que es de suma importancia analizar este sector, ya que constituye un pilar fundamental en el desarrollo de las naciones.

Dentro de las metodologías para analizar la eficiencia, se encuentran las metodologías del *Data Envelopment Analysis* (DEA), parte de los modelos no paramétricos, esta técnica ha demostrado ser un método poderoso para el análisis de la eficiencia de series de unidades de producción en términos de entradas y salidas múltiples. En este tipo de análisis se calcula la eficiencia relativa para cada DMU comparando sus *inputs* y *outputs* respecto a todas las demás DMUs. Algo a destacar es la posibilidad de generar *Benchmarking* y con ello, analizar de qué manera consumir los recursos para lograr acercarse a una DMU eficiente, así como el análisis *Slack* que nos permite darnos una idea de cuál es la cantidad óptima que se requiere de cada uno de los *inputs* para que el puerto pueda operar con eficiencia. Para la medición de la productividad total de los factores (PTF), el índice Malmquist ha sido utilizado ampliamente, ya que descompone el cambio de la

productividad en dos factores, cambio en eficiencia y cambio tecnológico, además, dicho índice cuenta con una gran sencillez a la hora de su interpretación.

Este estudio es un intento de proporcionar una comprensión satisfactoria de la eficiencia técnica y productividad de terminales de contenedores en la región de América del Norte durante el periodo comprendido en los años 2005-2016, se decidió aplicar la metodología DEA para medir la eficiencia técnica de las terminales de contenedores de los puertos en América del Norte, mientras que para medir el cambio en la productividad se calculó el índice *Malmquist* para los mismos puertos que se calculó la eficiencia.

Para el cálculo de la eficiencia se desarrolló un modelo DEA con rendimientos variables a escala, con orientación al *output*. Los DMUs utilizados en esta investigación fueron los principales puertos de cada país que conforman la región de América del Norte, que manejan carga contenerizada. Como *inputs* se utilizaron la longitud del muelle, la superficie de la terminal y el número de grúas pórtico, y como *output* el número de contenedores de 20 pies (TEU) movilizados anualmente, la decisión de elegir dichos *outputs* e *inputs* se basó en la revisión de la literatura, así como en el análisis estadístico llevado a cabo.

De los resultados obtenidos después de haber aplicado el modelo DEA se desprende que en promedio los puertos analizados tienen una eficiencia técnica del 75%, si bien no es baja tampoco es un resultado favorable, pues representa que los puertos no están aprovechando sus recursos de una manera especial. Cabe destacar que, contrario a lo que se piensa de que aquellos puertos con mayor infraestructura son más eficientes, los resultados arrojan que no es así de hecho son aquellos que más desaprovechados tienen sus recursos. Sobresalieron los puertos de Manzanillo y Ensenada (México), Prince Rupert (Canadá) y Savannah (Estados Unidos), que fueron eficientes en los años considerados para el análisis.

En el análisis *Benchmarking* realizado podemos observar que el puerto de Manzanillo (México) es el que se toma con mayor frecuencia como puerto de referencia, seguido por el puerto de Savannah (Estados Unidos). Con respecto al análisis *slacks*, los tres *inputs* que se manejaron no fueron utilizados de manera eficiente, en mayor frecuencia la longitud del muelle y las grúas pórtico.

En una segunda etapa se calculó el índice Malmquist, que es una herramienta que permite determinar el cambio en la Productividad Total de los Factores y descomponerlo en cada uno de sus componentes. Siendo importante ya que permite implementar políticas adecuadas de planeación estratégica. Así pues, de los resultados obtenidos respecto a la productividad, tenemos que el cambio tecnológico fue el que determinó la productividad en los puertos, aunque cabe destacar que en promedio se presentó una disminución de la productividad durante el periodo sujeto al análisis.

Finalmente, los resultados muestran que este grupo de terminales analizadas, aún cuentan con áreas de oportunidad respecto al uso proporcional de sus recursos, ya que en su gran mayoría de ellas mostraron bajos niveles de eficiencia y productividad. No se debe olvidar que este sector aún pretende aumentar el volumen de carga anual, se debe atender conjuntamente tanto la eficiencia técnica, así como los costos, tiempo de espera y alianzas estratégicas para mejorar e incrementar sus operaciones.

RECOMENDACIONES

El aumento del transporte de mercancías por vía marítima, y la ventajosa posición geográfica de México al tener más de 11,000 kilómetros de costa en los litorales del Pacífico y Atlántico, brindan a los puertos mexicanos la oportunidad de explotar el tráfico marítimo en la zona, es por ello que es de suma importancia que se lleven a cabo más estudios en donde se involucren a los puertos marítimos con la finalidad de detectar y solucionar problemas de todo tipo. Para este caso, los relacionados con la eficiencia y productividad de sus terminales de contenedores.

Las siguientes recomendaciones están orientadas al mejoramiento de la eficiencia y la productividad de las terminales de contenedores de México. Se exponen una serie de propuestas enfocadas a mejorar el uso de los recursos con los que cuentan las terminales mexicanas.

Puesto que las grúas pórtico fueron de los recursos más desaprovechados se recomienda:

- Planear y programar con tiempo los movimientos de trabajo de cada grúa.
- Aprovechar la capacidad máxima de carga de cada una de las grúas con el objetivo de mover con mayor rapidez los contenedores al momento de las cargas y descargas de los buques, y al momento del acomodo en el patio de maniobras.
- Efectuar constantemente simulaciones con el fin de que los operadores de las grúas mejoren sus habilidades en el manejo de las mismas, y así mejorar el uso de éstas
- Llevar a cabo el mantenimiento preventivo de los equipos, para así evitar fallas en las mismas.

Por su parte lo que se recomienda para incrementar la movilización de TEUs es:

- Atraer mayor inversión extranjera y nacional para que se instalen más empresas y utilicen el puerto para llevar a cabo sus actividades comerciales.
- Dar la oportunidad de que se instalen más líneas navieras.
- Promocionar la utilización del puerto como plataforma logística para las exportaciones e importaciones, ofreciendo servicios y tarifas accesibles. Así como garantizar la movilización de las mercancías mediante otros medios de transportes.

Así pues, se ha identificado que los factores clave para el éxito de los puertos incluyen, a parte de una buena ubicación, altos niveles de eficiencia, buenas conectividades internas, internacionalización y habilidades en los idiomas, fuerte apoyo del gobierno, personal capacitado en el área logística y excelentes relaciones laborales entre operativos portuarios, gobierno y trabajadores. Por lo que, las futuras líneas de investigación deberán enfocarse al estudio no sólo de las terminales de contenedores, si no de los demás actores que componen los puertos como son las aduanas, terminales industriales, funciones administrativas, etc.

Además, se propone llevar a cabo otros estudios acerca del sector portuario en la línea de la eficiencia a través de las mediciones DEA, adicionando otros indicadores de entrada y salida, una de las opciones es integrar los *badoutputs*, ya que éstos permiten determinar en qué grado pueden reducirse los efectos adversos inherentes a la práctica de las actividades portuarias, otra opción es utilizar los modelos DEA no orientados, donde se puede tanto maximizar los *outputs* y minimizar los *inputs*.

BIBLIOGRAFÍA

- ▶ Ackoff, R. (1967). *The design of social research*. Chicago: University of Chicago.
- ▶ Aigner, D., Lovell, C. y Schmidt, P., (1977). Formulation and estimation of stochastic frontier production function models, *Journal of Econometrics*, 6, 21-37.
- ▶ Alé, Y. (1990). Un Nuevo Esquema de Regulación de Monopolios Naturales. *Estudios Públicos*, No. 37, Chile.
- ▶ Almawshekia, E. y Shahb, M. (2015). Technical Efficiency Analysis of Container Terminals in the Middle Eastern Region. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*. 31(4) pp 477-486.
- ▶ American Association of Ports Authorities (AAPA). (2016). *NAFTA Container Port Ranking 2016*. Recuperado de: http://aapa.files.cms-plus.com/Statistics/NAFTA%20REGION%20CONTAINER%20TRAFFIC%20PORT%20RANKING%202016_T3.pdf
- ▶ An application to Asian container ports. *Maritime Policy & Management*, 36, 545-558.
- ▶ Arzubi, A y Berbel, J. (2002). *Determinación de índices de Eficiencia mediante DEA en Explotaciones Lecheras de Buenos Aires, Argentina*. Recuperado de <http://www.ina.es/iaspa/2002/voll7/arzubi.PDF>
- ▶ Arzubi, A. y Berbel, J. (2002). *Determinación de Índices de Eficiencia mediante DEA en explotaciones lecheras de Buenos Aires. Argentina*
- ▶ Asociación Española de Contabilidad y Administración de Empresas (AECA).(1997). *Indicadores de gestión para las entidades públicas*. Documento de trabajo No. 16. Madrid: Serie de Principios de Contabilidad de Gestión.
- ▶ Banco Mundial. (2016). Tráfico marítimo de contenedores (TEU: unidades equivalentes a 20 pies).

- ▶ Banker, R. D.; Gadh, V.M. y Gorr, W.L. (1993). A Monte Carlo Comparison of Two Production Frontier Estimation Methods: Corrected Ordinary Least Squares and Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research*, 67(3): 332-43.
- ▶ Barrios, G. (2007). La medición de la eficiencia técnica mediante el Análisis Envolvente de Datos. *Contribuciones a la Economía*.
- ▶ Battese G. y Corra, G. (1977): Estimation of Production Frontier Model: With Application to the Pastoral Zone of Eastern Australia, *Australian Journal of agricultural Economics*, 21, pp.1167-179.
- ▶ Bemowski K. (1991) «The Benchmarking Bandwagon», *Quality Progress* January 1991, Volume 24, Number one, pp. 19-24.
- ▶ Bichou, K. (2012). An empirical study of the impacts of operating and market conditions on container-port efficiency and benchmarking. *Research in Transportation Economics*.
- ▶ Bogetoft, P. y Otto, L. (2011). *Benchmarking with DEA, SFA and R*. Stanford University, Austin State University: Springer.
- ▶ Bosch, E. (1999). *Eficiencia Técnica y Asignativa en la Distribución de Energía Eléctrica. El caso de EPE SF, Argentina*. Recuperado de http://www.aaep.org.ar/espa/anales/resumen_99/bosch_gimbatti_giovagnoli.htm
- ▶ Boussofiene, A.; Dyson, R.G. y Thanassoulis, E. (1991). Applied Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research*, 52: 1-15.
- ▶ Bunge, M. (2005). *La ciencia: su método y su filosofía*. Argentina: Debolsillo.
- ▶ Burns, J. (2012). *Terminales de Contenedores: Sistemas de Operación*. Documento de trabajo. Pontificia Universidad Católica de Argentina.
- ▶ Burns, P. y Weyman-Jones, T. (1996). Cost functions and cost efficiency in electricity distribution: a stochastic frontier approach, *Bulletin of Economic Research*, 48:1
- ▶ Canay, I. (2000). *Fronteras de Eficiencia Estocásticas: Comparación Internacional de Distribuidoras Eléctricas*. Universidad de Buenos Aires. Argentina.

- ▶ Carbone, D., Frutos, M. y Casal, R. (2013) . *Eficiencia portuaria, análisis de los indicadores para su determinación*. Universidad Nacional del Sur.
- ▶ Case K. E., Fair R. C. (1999). *Principles of economics*. 5th. ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- ▶ Caves, D., Christensen, L. y Diewert, W. E. (1982). The economic theory of index numbers and the measurement of input,output and productivity. *Econometrica*, 50(6), 1393–1414.
- ▶ Central Intelligence Agency (CIA). (2016). *The World Factbook*. Recuperado de <http://www.cia.gov/library/publications/the-world-fact-book/geos/us.html>
- ▶ Centro de Innovación en Logística y Comercio de México (CILTEC). (2015). *Puertos Marítimos*. Recuperado de: <http://www.ciltec.com.mx/es/infraestructura-logistica/puertos-maritimos>
- ▶ Chang, V. (2010). Análisis de la eficiencia en las terminales portuarias del pacífico sur: una función de distancia estocástica. Centro de Investigación y Docencia Económicas.
- ▶ Chang, V. y Carbajal, M. (2009). *Medición de productividad y eficiencia de los puertos regionales del Perú: un enfoque no paramétrico*. Universidad
- ▶ Charnes, A., y Cooper, W.W. (1962): Programming with Linear Fractional Functional. *Naval Research Logistics Quarterly*, 9(3/4): 181-185..
- ▶ Charnes, A.; Cooper, W.; Lewin, A. y Seiford, L. (1994): *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology and Applications*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- ▶ Charnes, A.; Cooper, W.W. y Rhodes, E. (1981): Evaluating Program and Managerial Efficiency: An Application of Data Envelopment Analysis to Program Follow Through. *Management Science*, 27(6): 668-697.
- ▶ Charnes, A.; Cooper, W.W.; Lewin, A.Y. y Seiford, L.M. (1994): *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology and Applications*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- ▶ Cho, H. (2014). Determinants and Effects of Logistics Costs in Container Ports: The Transaction Cost Economics Perspective. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 30 (2014), pp. 193-215

- ▶ Coelli, T., Prasada Rao, D. y Battese, G. E. (1998). *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*. Boston: Kluwer Academic Publisher.
- ▶ Coelli, T., Prasada Rao, D. y Battese, G. E. (2005). *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*. Boston: Kluwer Academic Publisher.
- ▶ Coelli, T., Prasada Rao, D.S. y Battese, G.E. 1998 *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*, Kluwer Academic Publisher, USA.
- ▶ Coll, V y Blasco, O. (2006). *Evaluación de la eficiencia mediante el Análisis Envolvente de Datos: Introducción a los modelos básico*. Universidad de Valencia.
- ▶ Comin D. (2010) total factor productivity. In: Durlauf S.N., Blume L.E. (eds) *Economic Growth. The New Palgrave Economics Collection*. Palgrave Macmillan, London
- ▶ Cook, W. D., Tone, K. y Zhu, J. (2014). Data envelopment analysis: Prior to choosing a model. *Omega*, 44, 1-4.
- ▶ Cooper, William W., Seiford, Lawrence M., Tone, Kaoru. (2007). *A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA Solver Software*. Springer US.
- ▶ Coordinación General de Puertos y Marina Mercante (CGPMM). (2014). *Informe estadístico mensual, movimiento de carga, buques y pasajeros*. Recuperado de: http://www.sct.gob.mx./fileadmin/CGPMM/U_DGP/estadisticas/2014/mensuales/04_abril_2014.pdf
- ▶ Coordinación General de Puertos y Marina Mercante (CGPMM). (2014). *Situación actual del Sistema Portuario Nacional. México Puertos: Espacio propicio para la economía y los negocios*. Recuperado de: <http://www.sct.gob.mx./fileadmin/CGPMM/PNDP2008/doc/pndp/pndp-sac.pdf/>
- ▶ Cullinane, K. y Wang, T. (2006). The efficiency of European container ports: a cross-sectional data envelopment analysis. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 9, 19-31.

- ▶ Cullinane, K. y Wang, T. (2010). The efficiency analysis of container port production using DEA panel data approaches. *OR spectrum*.
- ▶ Debreu, G. (1951). The coefficient of resource utilization. *Econometrica*, 19 (3), 273-292.
- ▶ Delfin, O y Navarro, C. (2014). *La eficiencia de los puertos en México*. México: Editorial Morevalladolid.
- ▶ Delfín, O. y Navarro, C. (2015). Productividad total de los factores en las terminales decontenedores en los puertos de México: Una medición a través del índice Malmquist. *Revistas UNAM*.
- ▶ Deprins, D., L. Simar, and H. Tulkens. 1984. *Measuring Labor Inefficiency in Post Offices*. In *The Performance of Public Enterprises: Concepts and Measurements*, ed. M. Marchand, P. Pestieau, and H. Tulkens, 243-267. Amsterdam: North-Holland.
- ▶ Deshmukh, A. (2003). *Indian Ports: The Current Scenario*, University of Mumbai.
- ▶ Díaz, s. (2005). Análisis de la eficiencia técnica en la educación secundaria. *Estudios de economía aplicada*. 23 (2), 299-322.
- ▶ Dios, R. (2004). El Análisis de Eficiencia en el Sector Público mediante Métodos Frontera. *Auditoría y Gestión de los Fondos Públicos*. 33, 39-48.
- ▶ Doménech, R. (1992). Medidas no Paramétricas de Eficiencia en el Sector Bancario Español. *Revista Española de Economía*. Vol. 9(2): 171-196.
- ▶ Dowd, T. J., & Leschine, T. M. (1990). Container Terminal Productivity: A Perspective. *Maritime Policy and Management*, 107-112.
- ▶ Färe R, Grosskopf S, Lindgren B, Roos P (1989). Productivity Developments in Swedish Hospitals: A Malmquist Output Index Approach, Discussion paper, Southern Illinois University at Carbondale.
- ▶ Färe, R., Grosskopf, S., Norris, M. y Zhang, Z. (1994). Productivity growth, technical progress and efficiency change in industrialized countries. *The American Economic Review*, 84(1), 66–83.
- ▶ Farrell, M. (1957). The Measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal/ Statistical Society*. Serie A, 120, part III, 253-267.

- ▶ Ferro, G. y Romero, C (2011). Comparación de medidas de cambio de productividad. Las aproximaciones de Malmquist y Luenberger en una aplicación al mercado de seguros, <hal-00597946>.
- ▶ García, C. (2002). Análisis de Eficiencia Técnica y Asignativa a través de las Fronteras Estocásticas de Costes: Una Aplicación a los Hospitales del INSALUD. *Tesis Doctoral* , 1-217.
- ▶ Giménez, V. (2011). *Análisis de la eficiencia en las organizaciones*. Universidad Autónoma de Barcelona.
- ▶ González Serrano, M. M. (2004). Eficiencia en la Provisión de Infraestructura Portuaria: Una Aplicación al Tráfico de Contenedores en España. *Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria* , 1-178.
- ▶ González, F. (1999). *Recursos, Capacidades, Tecnología y Eficiencia*. Universidad de Oviedo.
- ▶ González, M. y Trujillo, L. (2006). La medición de la eficiencia en el sector portuario: revisión de la evidencia empírica. Canarias. España
- ▶ González-Páramo, J. (1995). Privatización y Eficiencia: ¿Es Irrelevante la Titularidad? *Economistas* , 32-43.
- ▶ Government of Canada. (2006). *Marine Transportation Infrastructure-Ports*. Recuperado de <http://nrcan.ca/earth-sciences/geography/atlas-canada/selected-thematic-maps/16872#infraestructure>
- ▶ Government of Canada. (2011). *Transportation and Economy*. Recuperado de <http://www.tc.gc.ca/eng/policy/anre-menu-3028.htm>
- ▶ Grenne, W. (1990): A gamma-distributed stochastic frontier model, *Journal of Econometrics*, Vol. 46.
- ▶ Guaita, J., Martí, M. y Puertas, R. (2016). Análisis de la eficiencia en el mercado de eurobonos antes y durante la crisis económica (2004-2012). *Journal of Innovation & Knowledge*, 1, 81–90
- ▶ Hernández de Labra, F. (1983). *Puertos*. México: Universidad Autónoma de México.
- ▶ Hernández, L. (1985). *La Productividad y Desarrollo Industrial en México*. Fondo de Cultura Económica. México.

- ▶ Hernández, S; Fernández, C & Baptista, L. (2007). *Metodología de la Investigación*. México: Mc Graw Hill
- ▶ Hoffmann, J. (2003). La globalización y la competitividad del sector marítimo portuario de México. *Competitividad Portuaria*. Recuperado de http://www.eclac.cl/transporte/perfil/JH_comp_mar_port_mexico_2003.pdf
- ▶ Infante, Z., Ortiz, C. y Gutiérrez, A. (2013). Port Efficiency in APEC. Conference Paper, APEC Study Centre Consortium Conference 2013.
- ▶ International Maritime Organization (IMO). (2016). *Datos y cifras relativas a buques y transporte marítimo*. Recuperado de <http://www.imo.org/es/KnowledgeCenter/ShipsAndShippingFactsAndFigures/paginas/Default.aspx>
- ▶ Intervención General de la Administración del Estado (IGAE). (1997). *El establecimiento de objetivos y la medición de resultados en el ámbito público, Intervención General de la Administración del Estado*. Ministro de Economía
- ▶ Jiang, B. y Li, J. (2009). DEA-based Performance Measurement of Seaports in Northeast Asia: Radial and Non-radial Approach. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*.
- ▶ Kendrick, J. (1961). Productivity trends in the United States. Massachusetts: NBER.
- ▶ Koontz, H. y Wehrich, H. (1998). *Administración. Una perspectiva Global*. McGraw-Hill, México.
- ▶ Koopmans, T. (1951). Efficient allocation of resources. *Econometrica*, 19(4), 455-465.
- ▶ Lansink A. O., Silva E., Stefanou S. (2001). "Inter-firm and Intra-firm efficiency measures". *Journal of Productivity Analysis*. Vol. 15, pp. 185-199.
- ▶ Leibenstein, H. (1996). Allocative Efficiency vs. X-Efficiency. *American economic Review*, 56, 392-415.
- ▶ Leleu, H. (2004). A linear programming framework for free disposal hull technologies and cost functions: Primal and dual models. *European Journal of Operational Research*, 168, 340–344.

- ▶ Ley, E. (1991). Eficiencia Productiva: Un Estudio Aplicado al Sector Hospitalario. *Investigaciones Económicas (Segunda Época)*. Vol. XV. Nº 1, 71-88.
- ▶ Liu, C. (2008) Evaluating the operational efficiency of major ports in the Asia-Pacific region using data envelopment analysis. *Applied economics*, 40 (2008), pp. 1737-1743
- ▶ Liu, B.L., Liu, W.L. y Cheng, C.P. (2008). The efficiency of container terminals in mainland China: An application of DEA approach. *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2008. WICOM'08. 4th International Conference on, 2008. IEEE, 1-10.
- ▶ Lo, F., Chien, C., & Lin, J. T. (2001). A DEA Study to Evaluate the Relative Efficiency and investigate the District Reorganization of the Taiwan Power Company. *IEEE Transactions on Power Systems*, 170-178.
- ▶ López, A. (2003). *Transporte Marítimo Y Ferrocarril*. Universidad Politécnica de Cataluña, S.L., Barcelona, pag. 2
- ▶ López, H. (1999). *Operación, administración y planeación portuarias*. México: Ed. AMIP.
- ▶ Lovell, C. (1993): Production frontiers and productive efficiency, in The measurement of productive efficiency, Fried, Lovell and Schmidt, *Oxford University Press*, New York.
- ▶ Lovell, K. (1993). *The Measurement of Productive Efficiency: Techniques and Applications* (pp. 3-67). Oxford University Press.
- ▶ Malmquist, S. (1953). Index numbers and indifference surfaces. *Trabajos de Estadística*, 4, 209–242.
- ▶ Medda, F. and Liu, Q. (2013). Determinants and strategies for the development of container terminals. *Journal of Productivity Analysis*, 40, 83-98.
- ▶ Meeusen, W. y Van den Broeck, J., (1977). Efficiency estimation from Cobb-Douglas production functions with composed error, *International Economic Review*, 18 (2) 435-444.

- ▶ Mercado, R., Díaz, E.A. y Flores, M. (1997). *Productividad base de la competitividad*. Editorial Limusa, México.
- ▶ Merk, O. y Dang, T. (2012). Efficiency of world ports in container and bulk cargo (oil, coal, ores and grain). *OECD Regional Development Working Papers*.
- ▶ Miller D.C y Salkind N.J. (2002). *Handbook of research design & social measurement*. Thousand Oaks: Sage Publications.
- ▶ Mokate, K. (1999). *Eficacia, eficiencia, equidad y sostenibilidad: ¿Qué queremos decir?*. Recuperado de http://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/9/37779/gover_2006_03_eficacia_eficiencia.pdf
- ▶ Moorsteen, R. (1961). On measuring productive potential and relative efficiency. *The Quarterly Journal of Economics*, 75(3), 151–167.
- ▶ Nacional Mayor de San Marcos y Consorcio de Investigación Económica y Social – CIES.
- ▶ Navarro, C. (1995). La Productividad Total de los Factores de la Industria Manufacturera 1980-1993: Una metodología alternativa. *Revista Ciencia Nicoláita núm 10*. México
- ▶ Navarro, C. (2005). *La eficiencia del sector eléctrico de México*. México: Fondo Editorial Morevallado.
- ▶ Navarro, C. (2011). *Epistemología y Metodología*. México: Grupo Patria.
- ▶ Norman, M. y Stoker, B. (1991). *Data Envelopment Analysis, the Assessment of Performance*. Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd.
- ▶ Ojeda, J. (2011). La problemática portuaria en México en perspectiva 1982-2004: Hacia nuevos paradigmas. *Regulación en Infraestructura de transporte*. 121-170.
- ▶ Organización Mundial de Comercio (OMC). (2015). *Mexico*. Recuperado de <http://www.stat.wto.org/CountryProfile/WSDBCountryPFView.aspx?Language=E&Country=MX>
- ▶ Organización Mundial de Comercio (OMC). (2016). *El crecimiento del comercio seguirá siendo moderado en 2016, ante la incertidumbre que pesa*

sobre la demanda mundial. Recuperado de https://www.wto.org/spanish/news_s/pres16_s/pr768_s.htm

- ▶ Parkin, M. (1995). *Microeconomics*. Pearson Education.
- ▶ Pedraza, O. y Navarro, J. (2006). La productividad de la industria láctea en el Estado de Michoacán. UMSNH: IPN : ESCA, México.
- ▶ *Políticas* (pp. 2-18). Lisboa: Universidad Rey Juan Carlos.
- ▶ Portales, R. (2012). *Transportación Internacional*. México: Trillas
- ▶ Prokopenko, J. (1999). *La Gestión de la Productividad*. Editorial Limusa, México.
- ▶ R.D. Banker, A. Charnes, W.W. Cooper. (1984). Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science*. Vol. 30 No. 9
- ▶ Ray, S. (2004). *Data Envelopment Analysis : Theory and techniques for economics and operation research*. Cambridge: Cambridge University Press.
- ▶ Restzloff-Roberts, D. L. y Morey, R.C. (1993). A goal-programming method of stochastic allocative data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, vol. 71(3): 379-397.
- ▶ Rojas, S. (1988). *Investigación Social: teoría y praxis*. México: Plaza y Valdés.
- ▶ Rúa, C. (2006). *Los puertos en el transporte marítimo*. Universidad Politécnica de Cataluña, Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales.
- ▶ Sagarra, M.; De Larrucea, R.; Rodrigo, J. (2007). *El transporte en contenedor*. España: Marge Books.
- ▶ Sanhueza, R.R. (2003). Fronteras de eficiencia, metodología para la determinación del valor agregado de distribución. Tesis doctoral. Pontificia Universidad Católica de Chile, disponible en: <http://web.ing.puc.cl/~power/paperspdf/sanhuezathesis.pdf>
- ▶ Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT). (2014). *Puertos y Marina de México*. Recuperado de: <http://www.sct.gob.mx./puertos-y-marina/>

- ▶ Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2014). *Puertos y Marina de México*. Recuperado de <http://www.sct.gob.mx/puertos-y-marina>
- ▶ Seiford, L. y Thrall, R. (1990). Recent developments in DEA: the mathematical programming approach to frontier analysis. *Econometrics*, 4.
- ▶ Simar, L. (1992). Estimating efficiencies from frontier models with panel data: A comparison of parametric, non parametric and semi-parametric methods with bootstrapping. *Journal of Productivity Analysis*, 3, 171-203.
- ▶ Simar, L. y Wilson, P. (1998). Sensitivity analysis of efficiency scores: How to bootstrap in nonparametric frontier models. *Management science*, 44 (1), 49-61.
- ▶ Simar, L. y Wilson, P. (2000). Statistical inference in nonparametric frontier models: The state of the art. *Journal of Productivity Analysis*, 13 (1), 49-78.
- ▶ Simar, L. y Wilson, P. (2004). Statistical inference in nonparametric frontier models: Recent developments and perspectives. *Journal of Productivity Analysis*, 13 (1), 49-78.
- ▶ Solow, R. (1957). . *Technical change and the aggregate production function* (39) The MIT Press.
- ▶ Spendolini, M. (1992) *The Benchmarking Book*. New York, AMACOM, a division of the American Management Association, 1992.
- ▶ Stevenson, R. (1980). Likelihood functions for generalized stochastic frontier estimations, *Journal of Econometrics*, Vol. 13.
- ▶ Sumanth, D. (1990). *Ingeniería y Administración de la Productividad; medición, evaluación, planeación y mejoramiento de la productividad en las organizaciones de manufactura y servicio*. México: Mc Graw-Hill.
- ▶ Thannasoulis, E. (2001). Introduction to Theory and Application of Data Envelopment Analysis. *Norwell: Kluwer Academic Publishers*.
- ▶ Tongzon, J. (2001). Efficiency Measurement of Selected Australian and other International Ports using Data Envelopment Analysis. *Transportation Research*, 107-128.
- ▶ Torres, H y Navarro, C. (2007). *Conceptos y principios de Epistemología y Metodología*. México: Fondo editorial Morevallado.

- ▶ Trillo, D. (2002). Análisis Económico y Eficiencia del Sector Público. *Eficiencia, Equidad y Control Democrático: Un Marco Triangular para el Análisis de*
- ▶ Trujillo, L., González, M. M. and JIMÉNEZ, J. L. (2013), “An overview on the reform process of African ports”, *Utilities Policy*, 25, 12-22.
- ▶ Trujillo, L., González, M. M. y Jiménez, J. L. (2013). An overview on the reform process of African ports. *Utilities Policy*, 25, 12-22.
- ▶ United Nations Conference on trade and Development (UNCTAD). (1999). *Fourth generation port*. (Informe de la Secretaría de la UNCTAD). Secretaría de Ginebra: UNCTAD.
- ▶ United Nations Conference on trade and Development (UNCTAD). (1992). *Los principios de la gestión y la organización modernas de los puertos*. (Informe de la Secretaría de la UNCTAD). Secretaría de Ginebra: UNCTAD.
- ▶ United Nations Conference on trade and Development (UNCTAD). (2015). *El Transporte Marítimo 2015*. (Informe de la Secretaría de la UNCTAD). Secretaría de Ginebra: UNCTAD.
- ▶ United Nations Conference on trade and Development (UNCTAD). (2010). *Trade and development report 2010. Employment, globalization and development*. (Informe de la Secretaría de la UNCTAD). Secretaría de Ginebra: UNCTAD.
- ▶ United Nations Conference on trade and Development (UNCTAD). (2015). *Trade and development report 2015. Employment, globalization and development*. (Informe de la Secretaría de la UNCTAD). Secretaría de Ginebra: UNCTAD.
- ▶ Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). (2004). *El futuro tecnológico de las terminales marítimas de vehículos*. Documentos de trabajo. Barcelona.
- ▶ Varian, H. (1998). *Microeconomía Intermedia. Un enfoque actual*. España: Antoni, Bosch, Editor, S.A.
- ▶ Wald, M. (1992). A practical guide to benchmarking. *Monthly Labor Review*, Vol. 116, No. 6, 66

- ▶ Waldman D. (1982): A Stationary Point for the Stochastic Frontier Likelihood, *Journal of Econometrics*, Vol. 28.
- ▶ World Port Source. (2016). *Shipping of the world*. Recuperado de: <http://www.worldportsource.com/shipping/country/ports/>
- ▶ World Shipping Council (WSC). (2015). *A coordinated voice for the liner shipping industry*. Recuperado de <http://www.worldshipping.org>
- ▶ World Shipping Council (WSC). (2015). *Top 20 Exporters of Containerized Cargo-2010, 2013 & 2014*. Recuperado de <http://www.worldshipping.org/about-the-industry/global-trade/trade-statistics>
- ▶ World Shipping Council (WSC). (2016). *Benefits of liner shipping. Efficiency*. Recuperado de <http://www.worldshipping.org/benefits-of-liner-shipping>
- ▶ Wu, J., Yan, H. y Liu, J. (2009). Groups in DEA based cross evaluation:
- ▶ Zhu, J. (2014). *Quantitative models for performance evaluation and benchmarking, ta Envelopment Analysis with spreadsheets*. 3era. ed. Springer.

ANEXO 1: MATRIZ DE CONGRUENCIA

MATRIZ DE CONGRUENCIA												
Planteamiento del Problema		Marco Teórico	Hipótesis	Variables	Dimensión	Indicadores	ITEMS					
Identificación	Objetivos											
<p>1. ¿Cuáles fueron los principales factores que determinaron la eficiencia de las terminales de contenedores en los puertos de América del Norte durante el periodo 2005-2016?</p> <p>2. ¿Cuál fue el factor que determinó la Productividad Total de los Factores de las terminales de contenedores en los puertos de América del Norte durante el periodo 2005-2016?</p>	<p>1. Definir cuáles fueron los factores que determinaron la eficiencia de las terminales de contenedores en los puertos de América del Norte durante el periodo 2005-2016.</p> <p>2. Determinar cuál fue el factor que determinó la Productividad Total de los Factores de las terminales de contenedores en los puertos de América del Norte durante el periodo 2005-2016.</p>	<p>Koopmans (1951) Debreu (1951) Farrel (1957) Leibenstein (1966) Stigler (1976) Charnes, Cooper y Rhodes (1978) Hernández (1985) Banker, Charnes y Cooper (1984) Millar y Meiners (1989), Alé (1990) Bosch (1999) González (1999) Makate (1999) Arzubi y Berbel (2002) Coll y Blasco (2006)</p>	<p>1. La longitud del muelle, la superficie de la terminal y el número de grúas pórtico, fueron los principales factores que determinaron la eficiencia de las terminales de contenedores en los puertos de América del Norte durante el periodo 2005-2016.</p> <p>2. El cambio tecnológico antes que la eficiencia técnica fue quien determinó la Productividad Total de los Factores de las terminales de contenedores en los puertos de América del Norte durante el periodo 2005-2016.</p>	<p>Dependientes</p> <p>VD= Eficiencia</p>	<p>Obtención de la mayor cantidad posible de producto, a partir de un conjunto dado de insumos (Farrel, 1957)</p>		No aplica					
				<p>Independientes</p> <p><i>Inputs:</i></p>				<p>Medición en metros</p>	No aplica			
				<p>VI₁= Longitud del muelle</p>						<p>Medición en hectáreas</p>		
				<p>VI₂= Superficie de la terminal</p>							<p>Unidades</p>	
				<p>VI₃= Número de grúas pórtico</p>								<p>Unidades</p>
				<p><i>Outputs:</i></p> <p>VI₆= Movilización de TEUs anuales.</p>								

ANEXO 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA PARA LA MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA PORTUARIA

AUTORES	Outputs	Inputs	MÉTODO
Medal & Sala (2010)	Tráfico en toneladas	Metros lineales de atracado Número de grúas pórtico Metros de calado Área de la superficie Personal disponible en el puerto	DEA-BCC
González & Trujillo (2003)	Mercancía contenerizada en TEU's Mercancía no contenerizada en toneladas	Longitud del muelle en metros lineales Superficie terrestre en metros cuadrados Número de grúas	Función de distancia de Shepard
Bonilla et. al. (1998)	Tráfico en toneladas de gráneles líquidos Tráfico en toneladas de gráneles sólidos Tráfico de contenedores Tráfico de mercancías no contenerizadas	Variable Inmovilizado, por la disposición o no de instalaciones que permitan el atraque de todo tipo de buques o no.	DEA orientado al <i>output</i>
Chang & Carbajal (2009)	Tráfico de carga de contenedores medidos en TEU's Tráfico de carga no contenedorizada en toneladas	Stock de activos fijos netos Número de trabajadores	DEA-BCC con orientación al <i>input</i>
Carbone et. al. (2013)	Exportaciones anuales expresadas en toneladas métricas	Capacidad de almacenaje en toneladas métricas Profundidad de calado expresado en pies Longitud de los muelles expresado en metros lineales	DEA BCC con orientación al <i>output</i> y utilización de variables de holgura.

		Capacidad de transferencia de carga expresado en toneladas métricas por hora	
Chang (2010)	Carga movilizada en TEU's Carga movilizada en toneladas	Número de trabajadores Número de amarradores Número de máquinas Activos fijos netos	Función de distancia propuesta por Battese y Coelli (1995) con orientación hacia el <i>output</i> .
Cullinane & Wang (2010)	Movilización de TEU's	Longitud total del muelle Área de la terminal Número de grúas pórtico Número de carretillas pórtico	DEA-BCC
Togzon (1999)	<i>Outputs:</i> Movilización de TEU's Número de contenedores trasladados por hora de trabajo por buque	Número de trabajadores de las autoridades portuarias Número de grúas Número de remolcadores Número de muelles Área portuaria Tiempo de retraso	DEA-CCR y DEA-Aditivo
Barros & Athanassiou (2004)	Número de buques Movimiento de carga Total de carga manejada Contenedores cargados y descargados	Número de trabajadores Valor en libros de los activos	DEA-CCR y DEA-BCC con orientación al input.
Martínez et.al. (1999)	Carga movilizada Ingresos obtenidos	Gastos de mano de obra Cargos de depreciación	DEA-BCC y DEA-Aditivo, tienen en cuenta las economías a escala.
Wu y Liang (2009)	Rendimiento de contenedores	Capacidad de las máquinas de manejo de carga Número de amarraderos Área de la terminal Capacidad de almacenamiento	DEA-BCC

Tongzon & Heng (2005)	Rendimiento de contenedores	Longitud de la terminal Área de la terminal Grúas del muelle	Función de costos estocástica con forma funcional Cobb-douglas
Cullinane et. al (2005)	Rendimiento de contenedores	Longitud de la terminal Área de la terminal Grúas pórtico Grúas de muelle Grúas tijera	Modelo DEA-CCR, DEA-BCC y FDH
González & Trujillo (2008)	Movilización de TEU's Carga movilizada a granel (líquido) Pasajeros	Número de trabajadores Amarradores Superficie en metros cuadrados	Función de distancia estocástica con orientación al <i>output</i> en su forma funcional <i>translog</i> .
So et. al. (2007)	Rendimiento de contenedores	Longitud total del muelle Área total de las terminales Número de canales del muelle Número de equipos patio	DEA-CCR y DEA-BCC
Cullinane & Wang (2006)	Contenedores movilizados	Longitud del muelle Superficie de la terminal Número total de grúas Número de carretillas pórtico	DEA-CCR y DEA-BCC
Lin & Tseng (2007)	Número de arribos al puerto Volumen de carga y descarga contenerizada	Longitud de la terminal de contenedores Número de muelles de embarques profundos Número de grúas pórtico	DEA-CCR y DEA-BCC
Van Dyck (2015)	Rendimiento de contenedores	Longitud del muelle en metros Área de la terminal en hectáreas Número de grúas muelle Número de carretillas pórtico Número de apiladores de alcance	DEA-CCR y DEA-BCC con orientación al <i>input</i>
Song & Sin (2005)	Cantidad de contenedores movilizados	Horas de trabajo Número total de grúas Superficie de la terminal Longitud del muelle	DEA-CCR y DEA-BCC

Almawshekia & Shahb (2015)	Número de contenedores cargados y descargados en TEU's	Longitud del muelle en metros Número de grúas pórtico de muelle Calado máximo en metros Número de equipos patio Área de la terminal en hectáreas	DEA-CCR con orientación al <i>input</i> con datos transversales y utilización de variables de holgura.
Liu (2010)	Número de contenedores movilizados	Profundidad del muelle Longitud del muelle Área de la terminal Área de almacenamiento Área de patio Número de equipos de maniobras Capacidad de manejo	Función de frontera estocástica en su forma funcional Cobb-Douglas y <i>translog</i>
Quaresma et. al (2009)	Movilización de TEU's Contenedores movilizados por hora por barco	Número de grúas Número de empleados Área de la terminal Número de remolcadores Número de equipos de manipulación Longitud del muelle de la terminal	DEA-CCR y DEA-BCC
Ding et. el (2015)	<i>Output:</i> Rendimiento de contenedores mediante contenedores movilizados. <i>Inputs:</i>	Longitud de la terminal Cantidad de equipo de manipulación Cantidad de personal	DEA-CCR, DEA-BCC y el índice de <i>Malmquist</i> .
Demirel et. al. (2012)	Movilización de contenedores	Longitud del muelle en metros Área de la terminal en metros cuadrados Número de grúas pórtico Cantidad de equipo de patio Calado de la terminal en metros	DEA-CCR, DEA-BCC, análisis de variables <i>Slacks</i> y análisis de regresión <i>Tobit</i>
Al-Eraqi et. al. (2009)	Movilización de contenedores	Longitud del muelle Área de almacenamiento Cantidad de equipo de manipulación	DEA-CCR y el índice de <i>Malmquist</i> .
Ablanado & Riuz (2009)	Número de TEU's Volumen de carga	Longitud de la línea del muelle	DEA-CCR

	Número de buques de carga	Unidades de mano de obra	
Cullinane et. al. (2004)	Número de TEU's movilizados	Longitud del muelle Área de la terminal Grúas pórtico Carretillas pórtico	DEA-CCR y DEA-BCC orientado al <i>output</i>
Hung et. al.	Movilización de TEU's	Área de la terminal en metros cuadrados Número de grúas pórtico Número de amarraderos Almacenamiento de contenedores	DEA-CCR y DEA-BCC con <i>Bootstrap</i>
Tongzon (2001)	TEU's movilizados <i>Shiprate</i>	Número de grúas Número de amarraderos Número de remolcadores Área de la terminal Tiempo de retardo Número de trabajadores	DEA-CCR y Modelo DEA aditivo, análisis de variables <i>slacks</i>
Jiang & Li (2009)	Movilización de TEU's	Importaciones/Exportaciones PIB Longitud del muelle Número de grúas pórtico	DEA-BCC
Park & De (2004)	Rendimiento de carga mediante TEU's movilizados	Capacidad de atraque Capacidad de manejo de carga	DEA-CCR y DEA-BCC, <i>benchmarking.</i>
Valentine & Gray (2001, 2002)	Toneladas movilizadas TEU's movilizados	Longitud de la terminal Longitud del muelle	DEA-CCR
Min & Park (2005)	Movimiento de TEU's	Longitud total del muelle Número de grúas Tamaño de las áreas difíciles Tamaño del trabajo	DEA-BCC
Delfín & Navarro (2014)	Movilización de TEU's	Superficie Número de trabajadores Número de grúas	DEA-CCR, DEA-BCC, FDH, análisis con variables <i>slacks</i>
Simones & Marques (2010)	Carga general agregada	Gastos totales	DEA-CCR, DEA-BCC,

	Carga general convencional Carga <i>ro-ro</i>		FDH, enfoque <i>bootstrap</i>
Wu & Goh (2009)	Número de contenedores movilizados (TEU's)	Total de grúas Área de la terminal Longitud del muelle	DEA-CCR y DEA-BCC
Wu et. Al. (2010)	Movilización de TEU's	Capacidad del equipo de manejo Número de atracadores Área de la terminal Capacidad de almacenamiento	DEA-CCR con orientación al <i>output</i>
Lin & Tseng (2007)	Número de arribos Volumen de carga y descarga de TEU's	Área de la terminal Número de grúas pórtico Longitud del muelle Número de muelles	DEA-CCR
Liu et. al. (2008)	Contenedores movilizados	Longitud del muelle Grúas pórtico Carretillas pórtico	DEA-CCR y DEA-BCC
Munisamy & Singh (2010)	TEU's movilizados	Longitud del muelle Área de la terminal Total de grúas pórtico Equipos de manejo de carga	DEA-CCR y DEA-BCC con orientación al <i>output</i>
Bichou (2012)	Rendimiento de carga, TEU's movilizados anualmente	Área de la terminal Profundidad del calado Longitud del muelle Capacidad de almacenamiento Equipo de manejo Número de carriles (vías férreas) Vehículos de soporte	DEA-CCR y DEA-BCC
Yuen et. al. 2012	TEU's movilizados	Número de amarraderos Longitud del muelle Superficie portuaria Número de grúas pórtico Número de carretillas pórtico	DEA-CCR
S chøyen & Odeck (2013)	Camiones para la manipulación de contenedores TEU's movilizados por año.	Longitud del muelle Área de la terminal Grúas pórtico Carretillas pórtico	DEA-CCR y DEA-BCC

Polyzos & Niavis (2013)	Número de TEU's movilizados anualmente	Longitud de muelle Número de grúas pórtico	DEA-CCR y DEA-BCC
Medda & Liu (2012)	TEU's movilizados	Profundidad máxima del muelle Longitud del muelle Área de la terminal Número de grúas pórtico	SFA
Mokhtar & Shah (2013)	Rendimiento mediante la movilización de TEU's	Área de la terminal Profundidad Longitud del muelle Número de <i>gate lanes</i> Número de grúas Capacidad del equipo de manejo	DEA-CCR y DEA-BCC
Min & Park (2014)	Movilización de TEU's Capacidad de TEU's	Número de grúas pórtico Longitud del muelle Área de la terminal Tamaño de la mano de obra	Análisis de involucramiento de datos híbridos (DEA)
Kutin, Nguyen y Vallé (2017)	Movilización de TEU's	Profundidad del muelle Área de la terminal Número grúas pórtico Número grúas patio Número camiones	DEA-BCC y DEA-CCR
Cabone, Frutos & Casal (2013)	Movimiento de contenedores TEU's	La longitud de los muelles Número grúas pórtico	DEA-BCC
Zheng y Park (2016)	Movilización TEU's	Inputs: Longitud del muelle Área de la terminal Número grúas pórtico Número grúas patio	DEA-BCC y DEA-CCR
Li, Kwak, Nam y An (2015)	Movilización TEU's	número de amarraderos Longitud muelle Profundidad Área terminal Número grúas pórtico	DEA-BCC y DEA-CCR
Ortega y Navarro (2016)	Movilización TEU's	Longitud muelle (m) Personal Ocupado	SFA

