

Medición de la productividad en las cadenas de suministro agrícolas bajo el enfoque del índice Malmquist

Andrés Polo R.¹

Dairo Muñoz P.²



Artículo de investigación

Fecha de recepción: abril del 2018 ▪ **Fecha de aceptación:** junio del 2019

Polo, A. y Muñoz, D. (2019). Medición de la productividad en las cadenas de suministro agrícolas bajo el enfoque del índice Malmquist. *Revista de Investigaciones de Uniagraria*, 7(1), 87-102.

Resumen

Este trabajo busca evaluar los cambios en la eficiencia y la productividad de las cadenas de suministro agrícolas mediante su integración, desarrollando un índice aplicable cuando se desean mejorar los costos y las compensaciones. El índice está inspirado en el de Malmquist, ampliado a la medición de la productividad mediante el uso del análisis envolvente de datos (DEA) en estado pesimista y optimista, lo que se denomina: el análisis envolvente de datos de doble frontera.

El índice de productividad de Malmquist, medido a partir de dos puntos de vista diferentes de la DEA, está geométricamente promediado para generar un índice integrado para determinar las fuentes de los cambios en la productividad de las diferentes configuraciones de cadena de suministro o unidades de toma de decisiones. El modelo considera factores económicos y ambientales incluyendo transporte, manipulación de variables, costos de compensación de emisiones, costos de inventario, costos de *lead-time*, total de kilómetros de camiones, compensaciones y productos enviados. Las mediciones se realizaron en la simulación de una cadena de suministro agrícola configurada como no integrada e integrada y para llevar a cabo los resultados, se calculó usando programación matemática no paramétrica, por lo tanto, se descompone el cambio de la productividad en la eficiencia global y el cambio del costo técnico.

Por otra parte, se descompone el cambio global de eficiencia en el cambio técnico y la eficiencia. Estas descomposiciones proporcionan una imagen más clara de las fuentes principales del cambio de la productividad. Por último, el estudio ofrece una visión contemporánea de la eficiencia de cadenas de suministro agrícolas y medidas de productividad para la toma de decisiones entre diferentes configuraciones.

Palabras clave: análisis envolvente de datos, índice de productividad de Malmquist, análisis envolvente de datos de doble frontera, logística, gestión de la cadena de suministro.

¹ Ingeniero industrial, Magister en Diseño y Gestión de Procesos. Docente de planta y coordinador de investigaciones de la Universidad Agraria de Colombia, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: Polo.andres@uniagraria.edu.co

² Ingeniero industrial. Docente de planta de la Universidad Agraria de Colombia, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: munoz.dairo@uniagraria.edu.co

Measuring productivity in agricultural supply chains under Malmquist index approach

Abstract

The paper seeks to evaluate the changes in efficiency and productivity of supply chain by integrating a supply chain developing an index applicable when supply chains desire to **improve cost and compensations. The index is inspired by the Malmquist index as extended** to productivity measurement by using both optimistic and pessimistic data envelopment analyses (DEA) simultaneously, which we refer to as the double frontiers data envelopment analysis. The Malmquist productivity index measured from the two different DEA points of view are geometrically averaged to generate an integrated Malmquist productivity index in order to determine the sources of the changes in the productivity of the different configurations of supply chain or decision making units. The model considers both economic and environmental factors by including the variables transport and handling costs, emission offset, inventory cost for lead-time, total truck kilometers, inventory costs, compensations and products shipped. The measurements were performed under the simulation of a supply chain configured as non-integrated and integrated; to perform the results are computed using non-parametric mathematical programming. Hence, productivity change is decomposed into overall efficiency and cost technical change. Furthermore, overall efficiency change is decomposed into technical and efficiency change. These decompositions provide a clearer picture of the root sources of productivity change. Efficiency improvement efforts in supply chains should target the least efficient configurations identified in this paper. Practices in the most efficient supply chains should be further investigated to be replicated when possible. The paper provides a contemporary overview of supply chains efficiency and productivity measures for decision makers' choice among different configurations.

Keywords: Data envelopment analysis, Malmquist productivity index, Double frontiers data envelopment analysis, logistics, supply chain management.

Introducción

En una cadena de suministro integrada, dos o más compañías independientes están trabajando juntas para planificar y ejecutar las mismas operaciones (Leitner, Meizer, Prochazka y Sihn, 2011). Esto puede proporcionar beneficios y ventajas importantes a sus socios, ya que las asociaciones pueden ayudar a compartir los riesgos de las empresas, el acceso a los recursos, reducir los costos de transacción, mejorar la eficiencia, el rendimiento de las ganancias, la productividad y la ventaja competitiva a lo largo del tiempo (Cao y Zhang, 2011).

El crecimiento de la productividad es una de las principales fuentes de desarrollo económico y una comprensión profunda de los factores que la afectan. En los últimos años, la medición y el análisis del cambio en la productividad han despertado un gran interés entre los investigadores que estudian el desempeño y el comportamiento de las empresas (Flynn, Huo y Zhao, 2010). El esfuerzo de investigación se ha centrado en las causas del cambio de productividad y en su descomposición (Maniadakis y Thanassoulis, 2004).

El objetivo de este estudio es analizar el cambio en la productividad en las cadenas de suministro basado en el informe de Caggemini (2006), el cual proporciona un modelo determinista para las cadenas no integradas (cómo son) e integradas (cómo deben ser). El informe proporciona un conjunto de herramientas que consta de áreas de soluciones, prácticas principales de las cadenas de suministro y modelos de computación necesarios para construir una futura cadena de modelos innovadores y pasos para que sea una realidad.

La integración de las soluciones de mejora identificadas y los conceptos de colaboración en un modelo cohesivo brindan la arquitectura futura necesaria para nuevas eficiencias y ahorro de costos a la industria y así mejorar la productividad (Jayaram y Tan, 2010).

Según el informe, el impacto total de este rediseño de cadena de suministro (incluso teniendo en cuenta el uso del transporte y almacenamiento con la tecnología actual) podría reducir: los costos de transporte en más del 30 %, los costos de mantenimiento del inventario en un 20 % y el tiempo de espera en un 40 %. En vista del estudio, es necesario considerar la cuestión de cuál es el impacto de la integración de las cadenas de suministro en términos de productividad (Caggemini y GCI, 2006). Este estudio utilizó el apoyo de la teoría existente en Index Malmquist para proponer que existen diferencias significativas en las cadenas de suministro integradas o no integradas.

Para este estudio surgió una solución para generar un modelo de simulación basado en el artículo al que se hace referencia para obtener muestras de diferentes configuraciones de cadenas de suministro integradas y no integradas con DEA y con los resultados para la productividad del cálculo utilizando el índice de Malmquist.

Revisión de literatura

La estructura organizativa de las cadenas de suministro se concibió con el objetivo de garantizar una mayor eficiencia y, al mismo tiempo, satisfacer una demanda del mercado aún más cambiante. Esto ha provocado una fuerte desverticalización de las empresas manufactureras y recurre con frecuencia a la subcontratación, lo que lleva a una mayor flexibilidad de los sistemas de producción (Iannone, Miranda y Riemma, 2007).

El objetivo de las cadenas de suministro es crear grupos ágiles de empresas independientes pero cooperantes, capaces de reducir costos y aumentar su competitividad en el mercado. Para que funcione una cadena de suministro, la gestión coordinada de todos los elementos participantes es fundamental (Trkman, McCormack, de Oliveira y Ladeira, 2010).

Debido a la creciente competencia global y a las mayores expectativas de los clientes,

todas las empresas comerciales de hoy están buscando aumentar su red de colaboración interorganizativa y crear fluidez de material, información y flujos financieros a lo largo de la cadena de suministro. Para gestionar una cadena de suministro de manera eficiente y económica, la adecuación de la oferta con la demanda del mercado se refiere principalmente a la gestión de la cadena de suministro (Zhang y Zhang, 2007).

La gestión de la cadena de suministro o *supply chain management (SCM)* se define como un conjunto de enfoques utilizados para integrar de manera eficiente proveedores, fabricantes, almacenes y tiendas, de modo que la mercancía se produzca y distribuya en las cantidades correctas, en los lugares correctos y en el momento adecuado, para minimizar los costos de todo el sistema al tiempo que se satisfacen los requisitos del nivel de servicio (Iannone, Miranda y Riemma, 2007).

El impacto de la gestión de la cadena de suministro va más allá de la reducción de los costos y se ha sugerido que la excelencia en la gestión de las cadenas de suministro está directamente relacionada con el rendimiento superior de la organización. Si bien se entiende la importancia de la gestión de la cadena de suministro, su influencia en el desempeño financiero de la organización es menos clara. Hay tres áreas claves donde la administración de la cadena de suministro puede afectar la productividad de una organización (Johnson y Templar, 2011).

La medición del desempeño está intrínsecamente anclada en *SCM* como un paradigma predictivo y normativo. Es predictivo en el sentido de que la gestión del rendimiento proporciona estimaciones de productividad útiles para la predicción de rendimientos y tiempos de procesamiento mientras se planifica el material y los flujos de información para cumplir con los cambios de demanda, productos y procesos estocásticos. También es un paradigma normativo en el sentido de que la gestión de la cadena de suministro interactúa

tanto con la gestión de operaciones como con el suministro, proporcionando objetivos de mejora y amenazas potencialmente creíbles de sustitución o reducciones de volumen en caso de un rendimiento [relativo] deficiente. Las aplicaciones de los métodos de frontera, particularmente DEA, a sistemas complejos de varias etapas son relativamente raros (Agrell y Hatami-Marbini, 2013). La medición del cambio en la productividad de la cadena de suministro ha despertado un gran interés entre los investigadores que estudian el desempeño y el comportamiento de las empresas. En este marco, el índice de Malmquist se introdujo por primera vez en la literatura de productividad por Caves *et al.* (1982). Por su parte, Fare *et al.* (1989) descompusieron el cambio de productividad en cambio de eficiencia técnica (*TEC* por sus siglas en inglés *Technical Efficiency Change*) y cambio técnico, y utilizaron modelos de programación matemática no paramétrica para su cálculo.

El índice de productividad de Malmquist, introducido por Caves *et al.* (1982) no es circular, es decir, no se puede derivar el cambio de productividad entre los periodos t y $t + 2$ cuando se conoce el cambio de productividad entre los periodos t y $t + 1$, y entre los periodos $t + 1$ y $t + 2$. Por otro lado, sus componentes de periodo adyacente pueden proporcionar diferentes medidas de cambio de productividad (Tohidi y Razavyan, 2013).

El costo del índice de Malmquist en el índice Profit Malmquist (*pm*) puede utilizarse cuando los precios de entrada y salida están disponibles y cuando los productores desean maximizar el beneficio total de las DMU (Maniadakis y Thanassoulis, 2004). Para comparar la rentabilidad de las DMU (unidades de toma de decisiones) para los diferentes periodos de tiempo se utilizó la combinación convexa (promedio ponderado) de los costos de los insumos para diferentes periodos de tiempo y se obtuvo un costo común para las entradas (Wang y Lan, 2011). Asimismo, Tohidi y Razavyan (2013) utilizaron el costo común y obtuvieron

una frontera de costo eficiente global como única base y propusieron un índice de costo global de Malmquist, el cual es circular y proporciona una medida única del cambio de productividad y sus modelos son siempre factibles (Tohidi y Razavyan, 2013).

Metodología

El análisis se realiza en tres fases. La primera es formular el diseño adecuado de

un modelo probabilístico para la cadena de suministro descrito por Capgemini y GCI (2006). Para esto, el uso de la simulación se propone como una herramienta para ayudar a diseñar escenarios y reducir los efectos negativos de las alteraciones, tal como lo proponen Carvalho, Barroso, Machado, Azevedo y Cruz-Machado (2012).

Tabla 1. Parámetro del modelo de simulación (basado en Capgemini y GCI, 2006)
Planta a almacén / rdc parámetros

Parámetros	Símbolo	Valor	
Número de plantas	PI	16	
Número de rdc	RDC	4	
Paletas de carga completa	W	25	paletas
Atracar un camión	D	30	\$
Distancia de la planta al almacén	d (p, w)	200	kilómetros
Distancia promedio desde el almacén a cualquier rdc	d (w, i)	250	kilómetros
Distancia al centro de distribución más cercano para la próxima caída	d (n)	150	kilómetros
Geometría y costos de transporte por kilómetro	K	1	\$
Kilómetro vacío después de la descarga	E	150	kilómetros
Carga de camiones por paleta	L	1	\$
In = descarga, recibo y almacenamiento	I	4	\$
Out = recuperación, envío y carga	O	4	\$
Transferencia = descarga, cruce y carga	T	3	\$
Distancia de la planta al almacén compartido	d (p, s)	250	kilómetros
Distancia de almacenamiento compartido a cualquier RDC	d (s, i)	300	kilómetros
En el almacén compartido	I (s)	3,5	\$
Fuera para el almacén compartido	O (s)	3,5	\$
Peso de ftl	W (t)	50	toneladas

Emisión de CO ² por tonelada y kilómetro para camiones	CE (t)	100	gramos
Emisión de CO ² por tonelada y kilómetro para barcasas	CE (b)	40	gramos
Emisión de CO ² por tonelada y kilómetro para el ferrocarril	CE (r)	20	gramos
Emisiones de CO ² por tonelada y kilómetro de transporte de la ciudad	CE (ct)	0	gramos
Emisión de CO ² para automóviles por kilómetro	CE (c)	200	gramos
Costos de compensación por tonelada de CO ²	OC	40	\$
Valor de una paleta de bienes	VP	1000	\$
Costo promedio ponderado del capital	WACC	8,0%	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Parámetro del modelo de simulación de tiendas urbanas

Parámetro	Símbolo	Valor	
Camión completo de la ciudad de carga completa	Wftc	20	Jaulas
(Actual) jaulas antivuelco en carga de camión de rdc	W	15	Jaulas
Despachos / contenedores de carga de tranvía / vagón completo	Ftram	75	Jaulas
Carga completa para los transportistas de la ciudad	Wc	2	Jaulas
Cruce de un camión en un almacén / centro	Dw	30	\$
Cruce de un tranvía en el centro	Dth	30	\$
Cruce de un tranvía en una parada	Dts	3	\$
Cruce de un camión en una tienda	Ds	10	\$
Cruce de un transportador de la ciudad en una tienda	Dcs	5	\$
Número de minoristas involucrados	Re	4	
Número de tiendas por minorista	Sr	4	
Número de paradas por tranvía	Tls	4	
Distancia promedio entre el almacén y la tienda urbana	d (w, su)	100	kilómetros
Distancia promedio entre el almacén compartido y el centro de la ciudad	d (sw, h)	300	kilómetros
La distancia promedio entre los almacenes	d (w, w)	10	kilómetros
Distancia media vacía para el camión	et	30	kilómetros
Distancia promedio entre tiendas de un minorista	d (sun)	5	kilómetros

La distancia promedio para tranvía	d (tl)	40	kilómetros
La distancia promedio entre el tranvía y la tienda	d (s,i)	1	kilómetros
Geometría del factor de escala y de transporte por carretera y costes por kilómetro	k	1	\$
Geometría del factor de escala para los costes por kilómetro de tranvía	kt	0,3	\$
Geometría del factor de escala para vehículos eléctricos urbanos	ke	0,3	\$
Tasas de congestión (para los kilómetros de la ciudad en camión)	kc	2	\$
Carga de camiones por paleta	L	1	\$
In = descarga, recibo y almacenamiento en el almacén	I	4	\$
En la tienda	Is	2	\$
Out = recuperación, envío y carga	O	4	\$
Transferencia = descarga, cruce y carga en el centro del tranvía	T	3	\$
Transferencia en tranvía	Ts	1	\$
Peso del camión fti	W (tc)	25	Toneladas
Peso de la carga total del tranvía	Wtram	100	Toneladas
Peso del transportador de la ciudad	Wct	1	Toneladas
Emisión de CO2 por tonelada y kilómetro para camiones	ce (t)	100	Gramos
Emisión de CO2 por tonelada y kilómetro para barcazas	ce (b)	40	Gramos
Emisión de CO2 por tonelada y kilómetro para el ferrocarril	ce (r)	20	Gramos
Emisiones de CO2 por tonelada y kilómetro de transporte de la ciudad	ce (ct)	0	Gramos

Fuente: elaboración propia.

La herramienta de simulación apoyará la identificación de las brechas de desempeño entre el estudio de las cadenas de suministro (Capgemini y GCI, 2006) y el estado deseado de estas. Para este fin, es necesario identificar y definir medidas de rendimiento adecuadas. Por su parte, el análisis de las estrategias de la cadena de suministro depende del modelo utilizado para representar sus características.

El estudio de simulación utilizado para este trabajo se realizó en siete pasos: (I) planificación

del proyecto, (II) modelo conceptual, (III) validación del modelo conceptual, (iv) desarrollo de modelos de hojas de cálculo como parámetros (Ganga y Carpinetti, 2011), (V) verificación, (VI) estudio de validación basado en Capgemini y GCI, y (VII) experimentación y análisis de datos de salida.

En las figuras 1 y 2 se muestra la cadena de modelo de configuración no integrada e integrada respectivamente, planteado por Capgemini y

GCI (2006), y el desarrollo sobre el que se basa la simulación. Los parámetros del modelo de simulación para el estudio se pueden ver en las tablas 1 y 2. Con este modelo se obtuvieron 100 muestras de cadenas para el estudio de la medición de la productividad.

La razón final para usar este conjunto de datos es garantizar que todos sean esencialmente similares, ya que esto es necesario cuando se usa una función de distancia basada en DEA. Las figuras 1 y 2 muestran los tipos de configuraciones de la cadena de suministro.

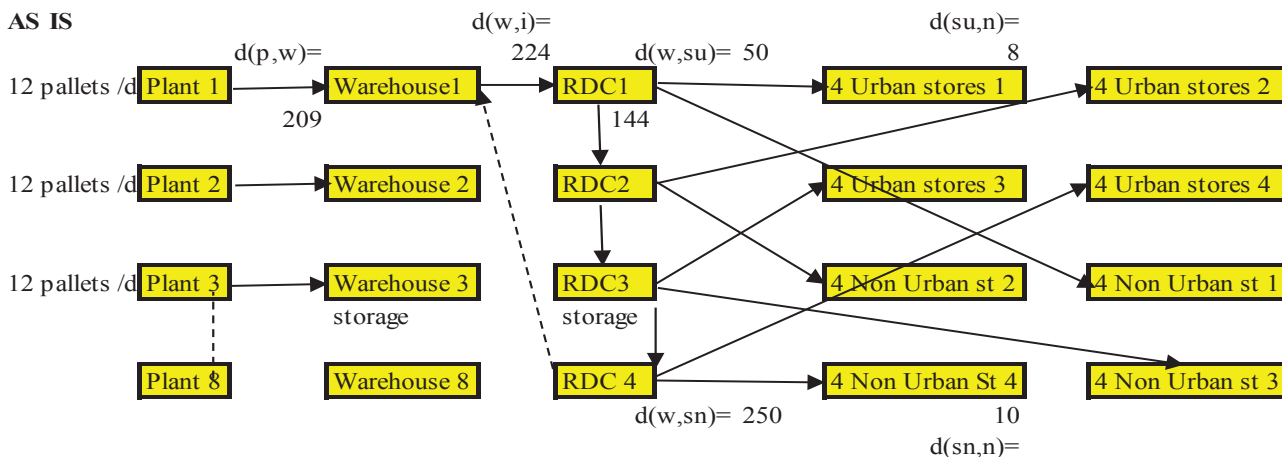


Figura 1. Cadena de suministro no integrada del modelo de configuración

Fuente: elaboración propia.

La segunda fase es la implementación de eficiencias del modelo DEA para cada configuración resultante del modelo de simulación, este es un modelo no paramétrico basado en la programación

lineal que mide la eficiencia de una muestra basada en la relación de entradas a salidas, con dos objetivos básicos: minimizar las entradas o maximizar los resultados (Chen y Yan, 2011).

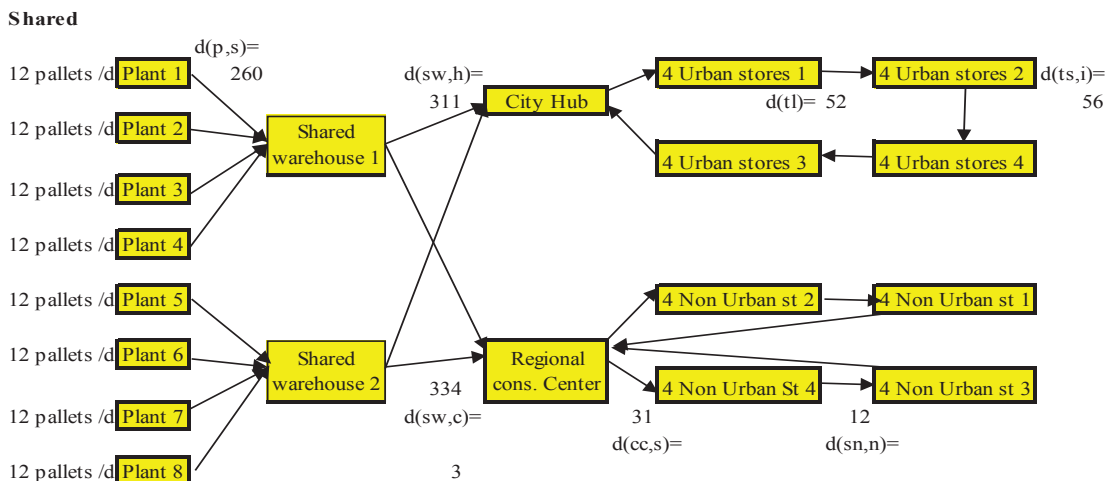


Figura 2. Modelo de configuración de cadena de suministro integrada

Fuente: elaboración propia.

La frontera eficiente es un hiperplano (en el caso de más de dos variables) formado por las DMU, las cuales para este estudio son diferentes configuraciones de cadena de suministro resultantes de cada réplica del modelo de simulación, que, en el modelo seleccionado, tienen la mejor relación de entrada-salida.

El tercer paso es calcular los índices de Malmquist para cada una de las DMU simuladas. La medición de la productividad es un tema de investigación importante del DEA y un enfoque muy útil para medir la productividad en DEA es el índice de productividad de Malmquist (MPI) (Wang y Lan, 2011). El MPI calcula el rendimiento relativo de una DMU en diferentes periodos de tiempo utilizando la tecnología de un periodo base, en este documento, estos periodos son las observaciones realizadas a las configuraciones de la cadena de suministro no integrada (t) e integrada (t + 1).

Cálculo de eficiencias

En primer lugar, se utiliza DEA, el cual estima que los límites en relación con los puntajes de los productores que midieron la eficiencia teniendo en cuenta los recursos utilizados. Como evidencia, el DEA es ahora un método reconocido para medir la eficiencia de acuerdo con Saranga y Moser (2010) y Cook y Seiford (2009). El modelo DEA-CCR, llamado así por ser desarrollado por Charnes, Cooper y Rhodes (1978), proporciona medidas de eficiencia radial, mientras la eficiencia técnica de cada unidad se define como la relación entre la suma ponderada de los productos y la suma ponderada de las entradas; el modelo de transformación lineal es:

$$D_0^t(x_0^t, y_0^t) = \text{Minimizando } \theta \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij}^t \leq \theta x_{i0}^t, i = 1, 2 \dots, m,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}^t \geq y_{r0}^t, r = 1, 2 \dots, s,$$

$$\lambda_j \geq 0,$$

$$D_0^t(x_0^{t+1}, y_0^{t+1}) = \text{Minimizando } \theta \quad (2)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij}^t \leq \theta x_{i0}^{t+1}, i = 1, 2 \dots, m,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}^t \geq y_{r0}^{t+1}, r = 1, 2 \dots, s,$$

$$\lambda_j \geq 0,$$

$$D_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1}) = \text{Minimizando } \theta \quad (3)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij}^{t+1} \leq \theta x_{i0}^{t+1}, i = 1, 2 \dots, m,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}^{t+1} \geq y_{r0}^{t+1}, r = 1, 2 \dots, s,$$

$$\lambda_j \geq 0,$$

$$D_0^{t+1}(x_0^t, y_0^t) = \text{Minimizando } \theta \quad (4)$$

Sujeto a:

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij}^{t+1} \leq \theta x_{i0}^t, i = 1, 2 \dots, m,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}^{t+1} \geq y_{r0}^t, r = 1, 2 \dots, s,$$

$$\lambda_j \geq 0,$$

Donde $D_0^t(x_0^t, y_0^t)$ y $D_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})$ miden las eficiencias optimistas de DMU_0 ($0 \in [1, 2, \dots, 100]$) en el periodo t y $t+1$ respectivamente, $D_0^t(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})$ mide sus eficiencias optimistas en el periodo de tiempo $t+1$ usando la tecnología de producción del periodo de tiempo (t) que se llama índice de crecimiento de DMU_0 , y $D_0^{t+1}(x_0^t, y_0^t)$ mide las eficiencias optimistas de DMU_0 en el periodo t usando la tecnología del periodo de tiempo $t+1$. Como los vectores de entrada fueron tomados de los costos de transporte del modelo de simulación (CTC) y seguridad de reposición de costos de inventario (CSS), los vectores de salida para el estudio son los costos de compensación en efectivo en miles de pesos (CXP) y entregas totales (TD).

Índice de Malmquist

Basado en las eficiencias optimistas anteriores, Maniadakis y Thanassoulis (2004) propusieron el siguiente índice optimista de productividad de Malmquist basado en DEA:

$$MPI_0 = \left[\frac{D_0^t(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})}{D_0^t(x_0^t, y_0^t)} \cdot \frac{D_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})}{D_0^{t+1}(x_0^t, y_0^t)} \right]^{1/2} \quad (5)$$

Este mide el cambio de productividad de DMU_0 desde el periodo de tiempo t a $t+1$ $MPI_0 > 1$, que indica el progreso de productividad, $MPI_0 = 1$ representa que la productividad no cambia y $MPI_0 < 1$ indica la disminución de la productividad. Wang y Lan (2011) descompusieron el MPI en dos componentes:

$$MPI_0 = \frac{D_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})}{D_0^t(x_0^t, y_0^t)} \cdot \left[\frac{D_0^t(x_0^t, y_0^t)}{D_0^{t+1}(x_0^t, y_0^t)} \cdot \frac{D_0^t(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})}{D_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})} \right]^{1/2} \quad (6)$$

El primer componente:

$$OEC_0 = \frac{D_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})}{D_0^t(x_0^t, y_0^t)} \quad (7)$$

Este mide el cambio de eficiencia. $OEC_0 > 1$ significa que la eficiencia de DMU_0 ha mejorado, mientras $OEC_0 < 1$ significa que la eficiencia de DMU_0 lo ha rechazado, es decir que ha desmejorado. El segundo componente es:

$$OTC_0 = \left[\frac{D_0^t(x_0^t, y_0^t)}{D_0^{t+1}(x_0^t, y_0^t)} \cdot \frac{D_0^t(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})}{D_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})} \right]^{1/2} \quad (8)$$

El cual mide el cambio técnico optimista de DMU_0 , desde el periodo t al $t+1$.

Resultados

Los modelos de programación lineal y el ipm se ejecutaron en GAMS 22.5, en un Intel Core 2 Duo. Una vez que se ejecutó el modelo DEA, se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 3 para los modelos orientados a la entrada y salida de retornos constantes a escala (CRS / CCR) y retornos variables a escala (VRS / BCC).

Para este documento solo se trabajó con los resultados de retornos constantes orientados a la entrada a escala de CRS-CCR. Según la tabla 3, los datos (Input CRS-CCR) tienden a seguir una línea recta que indica que los índices de eficiencia se distribuyen normalmente. El menor valor de eficiencia para las cadenas identificadas con el número 35 indica una gran amplitud en el rango de valores de eficiencias de acuerdo con los resultados de la simulación, esto significa que hay una gran diferencia entre las diferentes configuraciones obtenidas por la simulación, por lo que puede asegurarse de que todas sean esencialmente comparables.

Tabla 3. Resultados para eficiencias

DMU	No integrado (t)			$D_0^t(x_0^t, y_0^t)$			Integrado (t+1)			$D_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})$			$D_0^t(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})$			$D_0^{t+1}(x_0^t, y_0^t)$		
	Entrada	Entrada	Salida	Entrada	Entrada	Salida	Entrada	Entrada	Salida	Entrada	Entrada	Salida	Entrada	Entrada	Salida	Entrada	Entrada	Salida
	crs/ccr	vrs/bcc	crs/ccr	vrs/bcc	crs/ccr	vrs/bcc	crs/ccr	vrs/bcc	crs/ccr	vrs/bcc	crs/ccr	vrs/bcc	crs/ccr	vrs/bcc	crs/ccr	vrs/bcc	crs/ccr	vrs/bcc
M1	0,226	0,8042	4,4240	4,1373	0,2473	0,7882	4,0430	3,2282	0,3005	1,3147	0,8556	6,3906	0,1802	0,5075	0,6263	3,6783		
M2	0,1809	0,4450	5,5277	3,0599	0,3072	0,5376	3,2554	2,1019	0,4045	0,8821	0,0786	2,4739	0,1409	0,2806	0,9797	1,2843		
M3	0,2633	0,7356	3,7977	3,5224	0,4582	0,7880	2,1825	1,9751	0,5640	1,2116	0,1446	3,2720	0,2098	0,4466	0,5373	2,7965		
M4	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9092	0,9325	1,0998	1,0399	1,4992	1,5864	0,1362	6,1848	0,5987	0,6904	0,8109	1,4566		
M5	0,4643	0,9891	2,1538	2,0853	0,3818	1,0000	2,6193	1,0000	0,5900	1,5494	3,0062	5,0913	0,2812	0,5750	1,1153	1,8050		
M20	0,5378	0,6052	1,8593	1,4427	0,8214	0,9155	1,2174	1,1904	1,0004	1,1470	0,6575	1,5873	0,4578	0,5256	0,6250	0,8540		
M21	0,2153	0,5546	4,6452	3,2691	0,2662	0,5475	3,7563	3,2226	0,3024	0,8318	3,8695	5,5022	0,2018	0,4532	2,8279	3,7903		
M22	0,2634	0,5428	3,7961	2,6228	0,3483	0,5246	2,8710	2,0053	0,4077	0,7667	0,2279	2,5041	0,2166	0,3584	0,6194	1,3180		
M23	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,6303	0,8959	1,5866	1,4749	0,7691	1,3416	0,1316	2,2391	0,7315	4,6255	0,1946	0,6029		
M24	0,2445	0,4979	4,0893	2,5885	0,3580	0,7497	2,7934	2,4490	0,4529	1,2353	0,0518	3,7558	0,1973	0,3227	0,6873	1,1172		
M25	0,2816	0,6276	3,5511	2,7318	0,4041	0,5741	2,4744	1,7993	0,4834	0,8457	1,4078	2,2722	0,2271	0,4107	1,2983	1,5449		
M26	0,3927	0,8384	2,5467	2,3925	0,4067	0,8212	2,4591	2,4309	0,5531	1,1802	2,8786	4,2753	0,3237	0,5402	2,1631	2,6477		
M27	0,5377	0,7503	1,8599	1,6462	0,5412	0,8991	1,8479	1,8422	0,8705	1,2405	0,3092	5,5773	0,3401	0,5289	0,5355	2,0186		
M28	0,1396	0,5873	7,1630	4,8679	0,1329	0,5278	7,5232	5,1889	0,1590	0,7993	0,1727	6,0532	0,1083	0,3656	1,2723	2,5555		
M29	0,4437	0,6578	2,2539	1,8234	0,5742	0,6935	1,7417	1,3455	0,8269	1,1552	0,0429	1,6096	0,3769	0,5694	0,3377	1,2489		
M60	0,1675	0,8104	5,9703	5,4764	0,3517	1,0000	2,8434	1,0000	0,4471	1,6230	2,8334	4,5444	0,1313	0,4999	1,0478	3,7616		
M90	0,2975	0,6101	3,3613	2,7989	0,4078	0,7289	2,4524	2,3322	0,4428	1,0350	0,8321	3,7295	0,2740	0,4297	0,3918	2,3993		
M91	0,5777	0,7652	1,7310	1,5618	0,4042	0,8837	2,4743	2,0240	0,4801	1,3335	2,2039	0,7401	0,4479	0,4993	0,7960	1,1069		
M92	0,2948	0,9665	3,3920	3,3024	0,3326	1,0000	3,0064	1,0000	0,3791	1,5966	0,0594	6,0212	0,2437	0,6203	0,4405	4,0628		
M93	0,4352	0,4733	2,2976	1,4241	0,4981	0,5832	2,0077	1,4400	0,7120	0,8983	0,1496	7,6892	0,2727	0,3471	0,8092	1,8045		
M94	0,2132	0,8061	4,6910	4,4258	0,2602	0,7617	3,8432	3,7563	0,2803	1,0982	0,3354	7,9161	0,1994	0,5714	0,6994	6,1238		
M95	0,2441	0,5696	4,0972	2,8830	0,2426	0,5508	4,1224	2,7299	0,3832	0,8008	0,1659	5,8359	0,1745	0,3706	1,0816	3,8413		
M96	0,5626	0,9648	1,7774	1,6165	0,6210	0,9794	1,6102	1,5209	1,1176	1,7447	2,6394	2,2722	0,3128	0,5340	1,2622	1,3940		
M97	0,7760	1,0000	1,2886	1,0000	0,7278	0,7612	1,3740	1,0944	1,1567	1,2542	0,1749	1,0689	0,4959	0,5102	0,2964	0,4916		
M98	0,2423	0,5534	4,1274	3,1216	0,4696	0,6429	2,1293	1,7684	0,5885	0,9105	0,1486	2,2029	0,1927	0,3448	0,5829	1,9953		
M99	0,3299	0,8482	3,0316	2,8469	0,3619	0,8483	2,7633	2,5690	0,4633	1,2688	0,2656	5,0494	0,2768	0,5276	0,4755	3,2548		
M100	0,4578	0,9500	2,1845	2,1728	0,5100	0,9086	1,9606	1,8269	0,6554	1,4386	0,0465	2,5688	0,3740	0,7227	0,3164	2,1777		

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Índice de productividad Malmquist

DMU	MPI	DMU	MPI	DMU	MPI	DMU	MPI	DMU	MPI
M1	1,489	M2	2,534	M3	2,400	M4	1,938	M5	1,633
M6	1,951	M7	1,086	M8	1,268	M9	2,395	M10	1,059
M11	2,369	M12	1,610	M13	1,137	M14	1,251	M15	1,200
M16	1,232	M17	2,123	M18	1,318	M19	1,147	M20	2,016
M21	1,451	M22	1,707	M23	0,899	M24	2,062	M25	1,912
M26	1,551	M27	2,036	M28	1,293	M29	2,022	M30	1,576
M31	2,735	M32	1,458	M33	1,089	M34	2,361	M35	5,996
M36	2,258	M37	1,635	M38	1,819	M39	1,553	M40	2,475
M41	1,265	M42	2,018	M43	1,476	M44	1,388	M45	1,268
M46	2,784	M47	1,531	M48	1,261	M49	2,707	M50	1,291
M51	2,112	M52	1,275	M53	1,602	M54	1,757	M55	2,460
M56	1,738	M57	1,623	M58	1,329	M59	1,294	M60	3,015
M61	1,047	M62	1,464	M63	1,606	M64	1,312	M65	1,682
M66	1,646	M67	0,949	M68	1,266	M69	1,372	M70	1,117
M71	3,499	M72	2,258	M73	3,121	M74	1,263	M75	1,185
M76	1,936	M77	2,023	M78	4,042	M79	1,269	M80	1,360
M81	2,695	M82	1,832	M83	1,432	M84	1,355	M85	1,356
M86	1,667	M87	1,323	M88	1,192	M89	1,481	M90	1,551
M91	0,944	M92	1,414	M93	2,067	M94	1,359	M95	1,857
M96	2,664	M97	1,865	M98	2,724	M99	1,533	M10	1,584

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Cambio de la eficiencia

DMU	MPI	DMU	MPI	DMU	MPI	DMU	MPI	DMU	MPI
M1	1,094	M2	1,698	M3	1,740	M4	0,909	M5	0,822
M6	0,787	M7	0,830	M8	1,066	M9	1,063	M10	0,812
M11	1,700	M12	1,046	M13	0,804	M14	0,960	M15	1,048
M16	1,007	M17	1,000	M18	1,063	M19	0,807	M20	1,527
M21	1,236	M22	1,322	M23	0,630	M24	1,464	M25	1,435
M26	1,036	M27	1,007	M28	0,952	M29	1,294	M30	1,239
M31	1,219	M32	0,780	M33	0,723	M34	1,316	M35	4,154
M36	1,596	M37	1,445	M38	1,339	M39	1,153	M40	1,106
M41	0,949	M42	0,859	M43	1,112	M44	1,048	M45	0,580

M46	1,993	M47	1,322	M48	0,970	M49	2,012	M50	1,012
M51	1,603	M52	0,875	M53	0,764	M54	1,252	M55	1,682
M56	0,859	M57	1,187	M58	1,183	M59	1,112	M60	2,100
M61	0,778	M62	1,063	M63	0,713	M64	0,970	M65	1,055
M66	1,187	M67	0,667	M68	0,922	M69	0,609	M70	1,072
M71	2,807	M72	1,077	M73	2,388	M74	0,875	M75	0,874
M76	1,000	M77	1,159	M78	2,310	M79	1,000	M80	0,995
M81	1,112	M82	1,310	M83	1,072	M84	1,214	M85	1,043
M86	1,356	M87	0,897	M88	1,133	M89	1,061	M90	1,371
M91	0,700	M92	1,128	M93	1,145	M94	1,220	M95	0,994
M96	1,104	M97	0,938	M98	1,938	M99	1,097	M10	1,114

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Cambio tecnológico

DMU	MPI	DMU	MPI	DMU	MPI	DMU	MPI	DMU	MPI
M1	1,361	M2	1,492	M3	1,379	M4	2,131	M5	1,986
M6	2,480	M7	1,308	M8	1,190	M9	2,253	M10	1,304
M11	1,394	M12	1,539	M13	1,414	M14	1,304	M15	1,145
M16	1,223	M17	2,123	M18	1,240	M19	1,421	M20	1,320
M21	1,173	M22	1,291	M23	1,427	M24	1,408	M25	1,332
M26	1,498	M27	2,022	M28	1,358	M29	1,563	M30	1,272
M31	2,244	M32	1,869	M33	1,506	M34	1,795	M35	1,443
M36	1,415	M37	1,132	M38	1,358	M39	1,347	M40	2,237
M41	1,332	M42	2,349	M43	1,327	M44	1,325	M45	2,185
M46	1,397	M47	1,158	M48	1,300	M49	1,345	M50	1,276
M51	1,318	M52	1,458	M53	2,096	M54	1,404	M55	1,463
M56	2,024	M57	1,367	M58	1,123	M59	1,163	M60	1,436
M61	1,346	M62	1,377	M63	2,253	M64	1,352	M65	1,595
M66	1,387	M67	1,422	M68	1,373	M69	2,254	M70	1,043
M71	1,247	M72	2,096	M73	1,307	M74	1,445	M75	1,356
M76	1,936	M77	1,745	M78	1,750	M79	1,269	M80	1,367
M81	2,423	M82	1,399	M83	1,335	M84	1,116	M85	1,300
M86	1,229	M87	1,476	M88	1,052	M89	1,395	M90	1,131
M91	1,349	M92	1,254	M93	1,806	M94	1,114	M95	1,868
M96	2,414	M97	1,988	M98	1,405	M99	1,398	M10	1,422

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos de los modelos DEA, se calculó la descomposición del índice de productividad. La tabla 4 muestra los resultados para esta fase y se puede ver cómo las configuraciones de la cadena de suministro identificadas con los números 23, 67 y 91 obtuvieron un índice de productividad de menos de 1, lo que las convierte en configuraciones improductivas. Las otras configuraciones mejoraron su productividad, para explicar esto se realizan cálculos de eficiencia de cambio y cambio tecnológico (tablas 5 y 6).

La productividad promedio de pasar de una cadena no integrada a integrada es 1,7755 con una desviación estándar de 0,7235, lo que indica que los resultados son bastante dispersos, esto debido a la diferente cantidad de configuraciones obtenidas de la simulación en el paso 1.

En la revisión de los resultados para las tres configuraciones improductivas se observa que para DMU 23 el cambio de eficiencia fue de 0,630, mientras que el cambio tecnológico fue de 1,427; para de DMU 67 su eficiencia de cambio fue de 0,667, mientras que su cambio tecnológico fue de 1,424 y DMU 91 la eficiencia de cambio fue de 0,700, mientras que su cambio tecnológico fue de 1,349. A pesar de encontrar otras configuraciones de cadena (DMU) con cambios de eficiencia inferiores a 1, el cambio tecnológico aseguró que las cadenas integradas tuvieran una productividad superior a 1 a pesar de mostrar una divergencia de la frontera eficiente.

Conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones

- Este documento ha desarrollado un índice de productividad que es una extensión natural del trabajo en los índices de Malmquist. Este documento desarrolla un índice de productividad que considera no solo la eficiencia técnica y los cambios tecnológicos, sino también la eficiencia distributiva y los efectos de los insumos obtenidos para las cadenas de suministro. El DEA resulta ser una

herramienta muy útil para medir los cambios de productividad de las unidades DMU a lo largo del tiempo. Los resultados solo reflejan los cambios de productividad desde el punto de vista orientado a la entrada del DEA.

- La evidencia de lo desarrollado hasta el momento muestra que la integración de la cadena de suministro, siempre que esté bien administrada y produzca costos más bajos, mejora la productividad. Se tiene la intención de continuar el estudio bajo un nuevo enfoque dual para la frontera DEA a la medición de MPI desde puntos de vista orientados a entrada y orientados a resultados simultáneamente y desarrollar los correspondientes modelos de medición MPI basados en DEA.

Referencias bibliográficas

- Agrell, P. y Hatami-Marbini. (2013). A. Frontier-based performance analysis models for supply chain management: State of the art and research directions. *Computers & Industrial Engineering*, 66(3), 567-583. DOI: 10.1016/j.cie.2013.02.014
- Cao, M. y Zhang, Q. (2011). Supply chain collaboration: Impact on collaborative advantage and firm performance. *Journal of Operations Management*, 29(3), 163-180. DOI: 10.1016/j.jom.2010.12.008
- Capgemini. y GCI. (2006). Serving consumers in a sustainable way. *2016 Future Supply Chain*, 4 -57.
- Carvalho, H., Barroso, A., Machado, V., Azevedo, S. y Cruz-Machado, V. (2012). Supply chain redesign for resilience using simulation. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1), 329-341. DOI: 10.1016/j.cie.2011.10.003
- Caves, D. W., Christensen, L. R. y Diewert, W. E. (1982). The Economic Theory of Index Numbers and the Measurement of Input,

- Output, and Productivity. *Econometrica*, 50(6), 1393-1414. DOI: 10.2307/1913388
- Charnes, A., Cooper, W. y Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429-444. DOI: 10.1016/0377-2217(78)90138-8
- Chen, C. y Yan, H. (2011). Network DEA model for supply chain performance evaluation. *European Journal of Operational Research*, 213(1), 147-155. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.03.010
- Cheung, M., Myers, M. y Mentzer, J. (2010). Does relationship learning lead to relationship value? A cross-national supply chain investigation. *Journal of Operations Management*, 28(6), 472-487. DOI: 10.1016/j.jom.2010.01.003
- Cook, W. y Seiford, L. (2009). Data envelopment analysis (DEA) – Thirty years on. *European Journal of Operational Research*, 192(1), 1-17. DOI: 10.1016/j.ejor.2008.01.032
- Cooper, J. (1991). Innovation in Logistics: The Impact on Transport and the Environment. *Studies in Environmental Science*, 45, 235-253. DOI: 10.1016/S0166-1116(08)70371-6
- Färe, R., Grosskopf, S., Lindgren, B. y Roos, P. (1989). Productivity developments in Swedish hospitals: A Malmquist output index approach. En: A. Charnes, W.W. Cooper, A. Lewin y L. Seiford (eds.), *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology and Applications*, Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Flynn, B., Huo, B. y Zhao, X. (2010). The impact of supply chain integration on performance: A contingency and configuration approach. *Journal of Operations Management*, 28(1), 58-71. DOI: 10.1016/j.jom.2009.06.001
- Ganga, G. y Carpinetti, L. (2011). A fuzzy logic approach to supply chain performance management. *International Journal of Production Economics*, 134(1), 177-187. DOI: 10.1016/j.ijpe.2011.06.011
- Iannone, R., Miranda, S. y Riemma, S. (2007). Supply chain distributed simulation: An efficient architecture for multi-model synchronization. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(3), 221-236. DOI: 10.1016/j.simpat.2006.10.004
- Jayaram, J. y Tan, K. (2010). Supply chain integration with third-party logistics providers. *International Journal of Production Economics*, 125(2), 262-271. DOI: 10.1016/j.ijpe.2010.02.014
- Johnson, M. y Templar, S. (2011). The relationships between supply chain and firm performance. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 41(2), 88-103. DOI: 10.1108/09600031111118512
- Leitner, R., Meizer, F., Prochazka, M. y Sihm, W. (2011). Structural concepts for horizontal cooperation to increase efficiency in logistics. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 4(3), 332-337. DOI: 10.1016/j.cirpj.2011.01.009
- Maniadakis, N. y Thanassoulis, E. (2004). A cost Malmquist productivity index. *European Journal of Operational Research*, 154(2), 396-409. DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00177-2
- Saranga, H. y Moser, R. (2010). Performance evaluation of purchasing and supply management using value chain DEA approach. *European Journal of Operational Research*, 207(1), 197-205. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.04.023

Tohidi, G. y Razavyan, S. (2013). A circular global profit malmquist productivity index in data envelopment analysis. *Applied Mathematical Modelling*, 37(1-2), 216-227. DOI: 10.1016/j.apm.2012.02.026

Trkman, P., McCormack, K., de Oliveira, M. y Ladeira, M. (2010). The impact of business analytics on supply chain performance. *Decision Support Systems*, 49(3), 318-327. DOI: 10.1016/j.dss.2010.03.007

Wang, Y. y Lan, Y. (2011). Measuring Malmquist productivity index: A new approach based on double frontiers data envelopment análisis. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(11-12), 2760-2771. DOI: 10.1016/j.mcm.2011.06.064

Zhang, C. y Zhang, C. (2007). Design and simulation of demand information sharing in a supply chain. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(1), 32-46. DOI: 10.1016/j.simpat.2006.09.011