



Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión

ISSN: 0121-6805

ISSN: 1909-7719

Facultad de Ciencias Económicas Universidad Militar  
Nueva Granada

Fontalvo Herrera, Tomás; Morelos Gómez, José; Mendoza Mendoza, Adel  
Evaluación de la eficiencia de las empresas del sector carbón en Colombia\*

Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión, vol. XXVII, núm. 1, 2019, Enero-Junio, pp. 43-56

Facultad de Ciencias Económicas Universidad Militar Nueva Granada

DOI: <https://doi.org/10.18359/rfce.3027>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90961097003>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UDEM redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc  
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## Evaluación de la eficiencia de las empresas del sector carbón en Colombia\*

Tomás Fontalvo Herrera<sup>a</sup> ■ José Morelos Gómez<sup>b</sup> ■ Adel Mendoza Mendoza<sup>c</sup>

**Resumen:** Este trabajo de investigación presenta un análisis de la eficiencia técnica de las empresas del sector carbón y sus derivados en Colombia, durante el periodo 2011-2014. Como fundamentación teórica se utilizaron los conceptos de análisis envoltante de datos (DEA), específicamente el modelo CCR-O, enfocado en salidas y en la técnica multivariada de análisis discriminante. Para el desarrollo de la investigación se realizó un estudio empírico racional, con un enfoque evaluativo, que permitió establecer una estructura DEA para valorar las eficiencias. Para esta investigación se trabajó con 14 grandes empresas del sector minero en Colombia; como fuente de información primaria se tomó la reportada por la Superintendencia de Sociedades en los respectivos años. Con base en la estructura DEA, se valoraron las eficiencias de las empresas y se establecieron aquellas que se constituyeron en referentes de evaluación de las empresas ineficientes; seguidamente, se calcularon las proyecciones de las variables de salida que permiten que las empresas ineficientes alcancen las eficiencias de acuerdo con el modelo CCR-O enfocado en salidas. Por último, se utilizó la técnica análisis discriminante, que permitió validar la pertenencia de una empresa del sector a ser eficiente o no. La eficiencia promedio de las empresas bajo el modelo DEA en el periodo de estudio alcanzó un nivel alto, de 84,5 % y la técnica análisis discriminante indicó una validación del 80,3 %. Este trabajo aporta criterios a los responsables de la toma de decisiones para mejorar la eficiencia en el sector.

**Palabras clave:** carbón, eficiencia, análisis envoltante de datos.

**Fecha de recibido:** 2 de septiembre de 2017 **Fecha de aprobado:** 17 de octubre de 2018

**Cómo citar:** Fontalvo Herrera, T., Morelos Gómez, J. y Mendoza Mendoza, A. Evaluación de la eficiencia de las empresas del sector carbón en Colombia. *Revista Facultad de Ciencias Económicas*, XXVII(1), 43-56. *rev.fac.cienc.econ*, doi: <https://doi.org/10.18359/rfce.3027>

**Jel:** C67, L71, O11

\* Artículo de investigación.

- a Docente de tiempo completo de la Universidad de Cartagena. Ingeniero Industrial de la Universidad Antonio Nariño, magíster en Administración de Empresas de la Universidad Nacional de Colombia y candidato a doctor en Ciencias Sociales de la Universidad de Zulia. Correo electrónico: [tfontalvoh@unicartagena.edu.co](mailto:tfontalvoh@unicartagena.edu.co)
- b Docente de tiempo completo de la Universidad de Cartagena. Ingeniero Industrial de la Universidad Tecnológica de Bolívar, magíster en Administración de Empresas de la Universidad Nacional de Colombia y candidato a doctor en Ciencias Sociales de la Universidad de Zulia. Correo electrónico: [jmorelosg@unicartagena.edu.co](mailto:jmorelosg@unicartagena.edu.co)
- c Docente de tiempo completo de la Universidad del Atlántico. Ingeniero Químico de la Universidad del Atlántico y magíster en Ingeniería Industrial de la Universidad del Norte. Investigador del Grupo 3i+d de la Universidad del Atlántico. Correo electrónico: [adelmendoza@uniatlantico.edu.co](mailto:adelmendoza@uniatlantico.edu.co)

## *Efficiency Assessment of Colombian Companies operating within the Coal Sector*

**Abstract:** This research paper assesses the technical efficiency of Colombian companies mining coal and its derivatives during the 2011–2014 period. This study is theoretically grounded on concepts from data envelopment analysis (DEA), specifically the CCR-O model, focused on outputs and on multiple discriminant analysis, which is a multivariate technique. As part of research development, a rational empirical study was conducted using an evaluative approach to establish a DEA structure aimed at assessing efficiencies. Fourteen large mining companies in Colombia participated in this study, employing information reported by the Superintendence of Mining Companies for the corresponding period as a primary source of data. Based on the DEA structure, company efficiencies were assessed, and benchmarks for the evaluation of inefficient companies were established. Next, output variables were estimated to allow inefficient companies to reach the corresponding efficiency levels according to the output-based CCR-O model. Finally, the discriminant analysis technique was deployed to validate whether companies operating within the sector are susceptible to becoming more efficient or not. Average company efficiency under the DEA model during the study period reached a high level of 84.5 %, and the discriminant analysis technique indicated a validation of 80.3 %. This work provides criteria for decision makers to improve efficiency within the sector.

**Keywords:** coal, efficiency, data envelopment analysis

## *Avaliação da Eficiência das Empresas que Operam no Setor de Carvão na Colômbia*

**Resumo:** Este artigo de pesquisa apresenta uma análise da eficiência técnica de empresas do setor de carvão e seus derivados na Colômbia no período de 2011 a 2014. Como fundamentação teórica, foram utilizados os conceitos de análise por envoltória de dados (DEA), especificamente o modelo CCR-O, com foco em saídas e na técnica de análise discriminante multivariada. Para o desenvolvimento da pesquisa, foi realizado um estudo empírico racional, com abordagem avaliativa, que permitiu estabelecer uma estrutura de DEA para valorar as eficiências. Para este estudo, foram utilizadas catorze grandes empresas do setor de mineração da Colômbia; como fonte primária de informação, foi considerada a que foi reportada pela *Superintendencia de Sociedades* nos respectivos períodos. Com base na estrutura da DEA, a eficiência das empresas foi avaliada e foram estabelecidas marcas de referência para a avaliação de empresas ineficientes; em seguida, foram calculadas as projeções das variáveis de saída que permitem que empresas ineficientes alcancem níveis de eficiência de acordo com o modelo CCR-O com foco em saídas. Por fim, foi utilizada a técnica de análise discriminante, que permitiu validar que empresas pertinentes do setor são suscetíveis a se tornarem eficientes ou não. A eficiência média das empresas sob o modelo DEA durante o período do estudo atingiu um alto nível de 84,5% e a técnica de análise discriminante indicou uma validação de 80,3%. Este trabalho fornece critérios para que os tomadores de decisão melhorem a eficiência no setor.

**Palavras-chave:** carvão, eficiência, análise por envoltória de dados

## Introducción

El sector minero en Colombia es determinante en el incremento del producto interno bruto (PIB) del país. Asimismo, el subsector carbón es uno de los más dinámicos, que además inciden en los ingresos de la nación. Por este motivo, en nuestro contexto es importante analizar cuál es el manejo y los niveles de eficiencia que vienen generando las empresas del sector carbón de Colombia, lo cual direcciona el objeto de esta investigación.

Diversos estudios han aportado al análisis de la eficiencia de las organizaciones en diferentes sectores económicos (Wang, Ang, Wang y Zhou, 2017; Sohail y Anjum 2016) y han resaltado la pertinencia de este concepto para el mejoramiento en el desempeño y la agregación de valor en todos los procesos y las áreas de la empresa. Desde luego, es importante destacar estudios para el sector extractivo de minerales en Colombia y otras regiones (Morelos, De La Hoz y Fontalvo Herrera, 2018a; Sangare y Maisonnave, 2018), en beneficio de alcanzar mayor competitividad en el comercio internacional, que es una preocupación de muchos de los gerentes. De igual manera, otras investigaciones han analizado la productividad en sectores de extracción minera, apoyados para esto en el uso de la técnica de análisis discriminante para estudiar la clasificación en sectores similares (Morelos, De La Hoz y Fontalvo Herrera, 2018b).

De lo anterior surgen las siguientes preguntas problema, que direccionan y establecen el propósito para el desarrollo de esta investigación: ¿cuáles son las variables de entrada y salida que permiten valorar las eficiencias por medio de análisis envolvente de datos (DEA, por sus siglas en inglés) de las empresas del sector carbón? ¿Cómo son los niveles de eficiencia de las empresas estudiadas? ¿Cuáles son las organizaciones que tienen un comportamiento eficiente, que puedan utilizarse como grupo de referencia para evaluar las empresas ineficientes? ¿Cuáles son las proyecciones requeridas en las variables de salida para lograr que las empresas ineficientes alcancen la eficiencia? ¿Cómo analizar la precisión de clasificación de empresas eficientes e ineficientes objeto de esta investigación? Estas preguntas problema generan como

objetivo general de esta investigación evaluar el nivel de eficiencias de las grandes empresas del sector Colombia.

Es importante señalar que este trabajo se justifica porque genera nuevo conocimiento científico, con la articulación de una serie de conceptos asociados con análisis envolvente de datos, cálculo multivariado, rubros financieros para el establecimiento de una estructura de valoración y pronóstico de las eficiencias del sector. De igual manera, permite aportar criterios de referencia para medir las eficiencias de cada empresa del sector, lo que posibilita la toma de decisiones de todos los grupos de interés de estas empresas. Otra brecha en la literatura que aborda esta investigación es la necesidad de estructuras de valoración que articulen el análisis envolvente de datos, el cálculo multivariado en el sector carbón, lo cual es replicable en cualquier otro contexto internacional. En cuanto a limitación, es importante señalar que como resultado de un análisis racional propositivo se definió una serie de variables de entrada y salida en el modelo DEA, por los que sería importante evaluar el sector con otras variables y analizar el impacto que genera en términos de eficiencia, para compararlos con los resultados de esta investigación.

Considerando lo anterior, se definieron los siguientes objetivos específicos:

- a) Establecer una estructura DEA CCR-O, para evaluar las eficiencias técnicas de las empresas del sector carbón en Colombia.
- b) Valorar las eficiencias de las empresas del Carbón en Colombia entre 2011 y 2014.
- c) Establecer las mejores empresas, que se constituyen en grupos de referencias para aquellas ineficientes.
- d) Establecer las proyecciones de las variables de salida que permitan alcanzar la eficiencia a las empresas ineficientes.
- e) Validar la pertenencia de una empresa del sector carbón a los grupos “eficiente” o “no eficiente”, con base en la valoración de eficiencia de las empresas del sector.

Con el fin de dar respuesta a los objetivos de esta investigación, inicialmente, se presenta el

contexto acerca de la medición de la eficiencia a través del DEA. Luego, se definen las variables y salidas del modelo DEA. Más adelante, se muestra la correlación entre las variables utilizadas para el estudio, lo que permite calcular los resultados y la clasificación de eficiencias con el modelo radial DEA, CCR-O. Asimismo, se realiza un análisis de las empresas eficientes que se constituyeron en pares evaluadoras del grupo de empresas objeto de la investigación. Posteriormente, se determinan las proyecciones requeridas en la variable de salida para que las empresas ineficientes alcancen la eficiencia. Por último, se muestra el análisis de validación y clasificación de empresas eficientes y no eficientes, con base en la valoración de los resultados de eficiencia de las empresas del sector carbón en Colombia, para finalmente generar las conclusiones de esta investigación.

## Marco teórico

### Sector minero-energético en Colombia

El sector extractivo ha crecido de manera considerable en nuestro país, lo que ha convertido a Colombia en un actor fundamental en la explotación de carbón, pues el país pasó de extraer un poco más tres millones y medio de toneladas al año durante la década de los setenta a más de cien millones de toneladas en 2013 (Rudas y Hawkins, 2014). Esto convierte a dicho sector en un dinamizador de la inversión extranjera directa (IED). En los últimos años, la IED ha mostrado en Colombia una tendencia hacia los recursos naturales, y ha impactado particularmente en los sectores primarios, como el petróleo y la minería, pero particularmente la extracción de carbón (Plazas Díaz, 2016). Esta inversión, de acuerdo con las cifras del Ministerio de Minas, ha provocado que la participación del carbón en el PIB total sea del 54 % en 2011, 1,53 % en 2012, 1,41 % en 2013 y 1,40 % en 2014. Por lo anterior, en nuestro contexto es importante analizar cuál es la eficiencia de las principales empresas del sector carbón del país.

### Medición de la eficiencia a través del análisis envolvente de datos

La eficiencia es una medición del desempeño de una empresa, para analizar durante un determinado periodo el comportamiento de las entradas y salidas de un sistema. Con esta información es posible establecer planes de trabajo para incrementar los niveles de competitividad y productividad de las organizaciones (Oviedo y Rodríguez, 2011).

La técnica DEA determina una medición de eficiencia de organizaciones que son objeto de un estudio, comparando una organización con relación a otras. Esta técnica, que inició en 1978, ha ido creciendo en su aplicación como herramienta para medición de eficiencias, y aumentado a un ritmo muy rápido el número de investigaciones relacionadas con DEA (Liu, Lu y Lu, 2016). El DEA es una técnica no paramétrica, a través de la cual se pueden analizar rendimientos constantes a escala o rendimientos variables a escala, dependiendo de la dinámica de la organización o de los criterios del evaluador. De esta resulta una frontera de las organizaciones que se considera que poseen un desempeño eficiente; de esta forma, se puede establecer fácilmente cuáles de las organizaciones estudiadas son eficientes y cuáles no (Sotelsek Salem y Laborda Castillo, 2010). Este análisis tiene múltiples aplicaciones, su empleo es muy extenso y variado, por ejemplo, en educación, en el sector energético, sector industrial, sector financiero, sector agropecuario, entre otros (Fontalvo Herrera y De La Hoz Herrera, 2016; Rezitis y Kalantzi, 2016; Thanassoulis et al., 2016; Kaffash y Marra, 2017; Mardani, Zavadskas, Streimikiene, Jusoh y Khoshnoudi, 2016; León y Lozano, 2017).

La estructura de capital en una empresa afecta significativamente los resultados que esta pueda tener en materia operativa (Akhtar, Zahir, Tareq y Rabbi, 2016). Esa estructura constituye la línea de mando y, por consiguiente, la manera como se toman decisiones en las organizaciones. Así, con el análisis DEA se pueden obtener ciertas ventajas con respecto a algunas técnicas contables que miden el desempeño de la empresa, en un área

específica y no de una forma integral, para tomar las mejores decisiones.

De acuerdo con Suzuki, Nijkamp, Rietveld y Pels (2010), existen dos formas de desarrollar la técnica DEA. La primera es denominada *rendimientos constantes a escala*, con la cual se espera que los cambios en las entradas produzcan variables proporcionales en las salidas del sistema conocida como modelo CCR; mientras que en la segunda, denominada *rendimientos variables a escala*, las variaciones en las entradas no necesariamente producen cambios similares en las salidas. Esta forma es conocida como modelo BCC, en la cual cada unidad ineficiente solo se compara con una unidad eficiente, pero con sus mismas características. El modelo DEA puede ser orientado a entradas o salidas. Si es orientado a la salida aumenta las salidas, en la medida de lo posible, mientras se controlan las entradas. Por lo ya descrito en este artículo, la eficiencia de las empresas consideradas objeto de estudio será evaluada mediante el modelo DEA CCR-O.

El análisis DEA presenta la ventaja de que se puede combinar con otras técnicas estadísticas, como el análisis discriminante, con el fin de obtener una frontera de eficiencia mucho más confiable (Sánchez, Villarreal y Cabrera, 2008); de esta forma, se puede utilizar como una herramienta de predicción. Asimismo, el análisis DEA constituye una alternativa para los análisis tradicionales que utilizan razones financieras que todavía siguen siendo útiles (Guzmán y Escobar, 2011); sin embargo, dichas razones presentan una serie de limitaciones al medir el desempeño de la organización solo en dos dimensiones, mientras que el análisis envolvente permite tomar varias razones financieras y arrojar un desempeño que evalúa la organización como un todo integral (Cool y Blasco, 2007).

Para llevar a cabo el análisis de la eficiencia en las organizaciones, se debe definir cuáles son las áreas o unidades tomadoras de decisión que se quieran analizar y determinar cuáles son sus entradas, sus salidas; además, se ponderan cada una de estas mediante vectores para asegurar que ninguna quede por encima de la frontera de eficiencia óptima (Nazarko y Šaparauskas, 2014; Cook, Tone

y Zhu, 2014). El análisis DEA y el cálculo de la eficiencia de los procesos o unidades arroja la información necesaria a los responsables de la toma de decisiones para que puedan ejecutar su trabajo de manera más razonable y objetiva, para que así los resultados sean los mejores (Peng y Yew, 2007; Min y Joo, 2009).

El análisis DEA es una técnica muy flexible y adaptable a cualquier situación dentro de las organizaciones (Chen, 2008; Narasimhan, Talluri, Méndez, 2001); sus resultados pueden ser muy útiles para el proceso de toma de decisiones, ya que a través de este se puede desarrollar un estudio o una evaluación histórica para conocer el comportamiento de los procesos. Además, se puede utilizar en situaciones específicas para conocer el impacto de la implementación de ciertos proyectos de mejora o de innovación en las empresas (Zhou, Min, Xu y Cao, 2008; Mostafa, 2009; Shorouyehzad, Lotfi, Aryanezhad y Dabestani, 2011).

## Metodología

En este trabajo de investigación se utilizó la técnica no paramétrica DEA para evaluar la eficiencia de las empresas del sector carbón en Colombia durante el periodo 2011-2014, mediante el modelo DEA-CCR enfocado en salidas, el cual fue desarrollado por Charnes, Cooper y Rhodes. Se describe a continuación (Yang, Wang, Lan, Chen, Fu, 2017):

Si  $Y_o$  y  $X_o$  representan, respectivamente, las cantidades de productos y recursos de la unidad tomadora de decisión (DMU<sub>0</sub>), la unidad evaluada, la medida escalar de la eficiencia de la DMU<sub>0</sub> puede ser obtenida como la solución óptima del siguiente modelo conceptual:

$$\begin{aligned} \text{Max } \theta &= \frac{\sum_{r=1}^S u_{ro} y_{ro}}{\sum_{i=1}^m v_{io} x_{io}} \\ \text{s.t. } & \frac{\sum_{r=1}^S u_{rj} y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_{ij} x_{ij}} \leq 1 \quad j = 1, \dots, n \\ & u_{rj} \geq 0, \quad v_{ij} \geq 0 \quad r = 1, \dots, S \quad i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (1)$$

Donde  $u_{ro}$  y  $v_{ro}$  es el conjunto de los pesos más favorables para la DMU<sub>0</sub> en el sentido de maximizar la razón anterior.



## Población y muestra

Para el desarrollo de la investigación se realizó un análisis empírico racional, con un enfoque evaluativo, que permitió establecer una estructura DEA para valorar las eficiencias. Como población de estudio se identificaron 14 grandes empresas del sector minero en Colombia; como fuente de información primaria se tomó la reportada por la Superintendencia de Sociedades en los respectivos años. Además, se estableció una estructura DEA CCR-O enfocada en la optimización de las variables de salida. Con la estructura DEA se valoraron las eficiencias de las empresas objeto de esta investigación y se establecieron las empresas que se constituyeron en referentes de evaluación de las empresas ineficientes; seguidamente se calcularon las proyecciones de las variables de salida que hacen que las empresas ineficientes alcancen las eficiencias de acuerdo con el modelo CCR-O. Por último, se utilizó la técnica análisis discriminante que ayudó a validar la pertenencia de una empresa del sector a un grupo determinado: eficiente o ineficiente. Todo lo anterior permitió establecer un método de evaluación de las eficiencias técnicas de las empresas en el sector.

Las siguientes son las empresas que fueron consideradas para la investigación: Carbocoque SA, Carbones Andinos, Carbones Colombianos del Cerrejón, Carbones de la Jagua, Carbones del Cerrejón Limited, Cerrejón Zona Norte, Colombian Natural Resources, Comercializadora Colombiana de Carbones y Coque, Consorcio Minero Unido, Drummond Coal Mining, Drummond Ltd, Masering Holding, Masering Mining y Prodeco SA. Estas se nombran de forma aleatoria en este estudio como DMU1 hasta DMU14, para confidencialidad de los resultados obtenidos.

## Variables seleccionadas

Para la identificación de las variables, se consultaron estudios realizados por otros autores en sus investigaciones, los cuales se tomaron como guía, y a partir de allí se seleccionaron las variables por utilizar en el modelo DEA CCR-O, empleando la metodología de juicio de expertos propuesta por

Escobar-Pérez y Cuervo-Martínez (2008), con el propósito de disminuir el número de variables de entradas y salidas del análisis de eficiencia, y de esta forma mejorar el poder discriminatorio del DEA (Jenkins & Anderson, 2003). A continuación, se describen las variables incluidas en el estudio.

### *Variables de entrada*

- Activo total.
- Gastos de ventas.
- Gastos totales.

### *Variable de salida*

- Ingresos operacionales.

En la tabla 1 se muestran los valores de cada variable, tanto de entrada, como de salida, de las empresas del sector carbón en Colombia. Se determinaron las eficiencias bajo el modelo CCR-O, utilizando para ello el software DEA Solver 8.0. Asimismo, para este grupo de empresas se realizó una clasificación por tipo de eficiencias y se calcularon las proyecciones requeridas de la variable de salida para que las empresas ineficientes alcancen la eficiencia óptima.

## Resultados

En esta sección se analizan las estadísticas descriptivas, la matriz de correlación y los resultados de los índices de eficiencia obtenidos por el modelo DEA-CCR, orientado a salidas con las variables incluidas en el estudio. Por la orientación del modelo se determina el valor que debe aumentar la variable de salida para que una DMU ineficiente logre ser eficiente.

Los estadísticos descriptivos de las variables incluidas en el modelo DEA-CCR se muestran en la tabla 2.

Las dispersiones de los datos de la muestra indican una gran variabilidad, lo cual se evidencia en la amplitud entre los límites mínimo y máximo de cada variable; por este motivo, es recomendable utilizar el modelo DEA-CCR.

**Tabla 1.** Variables de entradas y salidas. Valores en pesos

Empresa	AÑO 2011				AÑO 2012				AÑO 2013				AÑO 2014			
	(I) Costos de ventas	(I) Gastos totales	(I) Activo total	(O) Ingresos operacionales	(I) Costos de ventas	(I) Gastos totales	(I) Activo total	(O) Ingresos operacionales	(I) Costos de ventas	(I) Gastos totales	(I) Activo total	(O) Ingresos operacionales	(I) Costos de ventas	(I) Gastos Totales	(I) Activo Total	(O) Ingresos Operacionales
DMU1	1.974.929.812	591.252.152	633.125.021	2.470.422.036	2.142.386.194	492.900.211	2.743.361.340	2.187.194.747	2.656.901.122	2.249.410.193	2.593.337.397	2.837.880.702	2.613.076.781	3.741.340.564	2.811.201.481	2.819.576.914
DMU2	3.130.905.838	392.057.199	4.975.669.657	3.872.183.353	3.493.309.148	485.614.128	5.559.123.504	4.620.880.321	3.103.203.771	253.080.582	6.049.669.727	3.803.105.426	3.092.461.109	559.691.147	4.977.422.111	3.221.425.240
DMU3	279.032.292	52.762.871	347.223.248	318.889.192	285.363.680	35.995.904	375.332.225	304.778.106	223.490.530	40.172.157	396.763.480	243.274.744	79.172.020	60.820.943	337.760.214	32.471.708
DMU4	33.885.120	7.875.201	22.792.243	39.172.611	2.699.905	4.069.613	17.015.026	6.095.006	10.400.239	3.684.161	30.117.450	13.820.439	86.832.584	6.655.419	38.847.315	95.015.193
DMU5	303.996.378	44.331.425	617.568.350	333.044.691	306.362.739	90.761.940	610.956.782	298.075.055	378.523.087	356.416.302	696.016.626	354.464.440	468.954.219	198.152.656	710.472.180	391.792.560
DMU6	54.350.814	5.487.668	251.376.641	65.403.389	122.404.495	6.031.042	284.090.924	145.063.518	127.040.876	3.170.543	260.822.142	146.217.996	133.907.624	11.646.596	239.089.222	146.324.384
DMU7	608.376.668	101.340.819	1.716.025.240	1.135.679.839	594.979.231	82.937.755	1.802.754.791	905.861.425	691.137.498	102.012.912	2.323.491.653	1.060.394.758	1.312.493.650	181.729.890	2.465.528.000	2.019.221.000
DMU8	89.790.402	9.539.982	26.467.323	101.650.050	68.219.065	10.149.420	38.828.333	73.661.282	87.416.779	8.584.861	46.207.896	94.414.391	55.065.621	40.200.952	36.760.946	89.549.206
DMU9	2.151.428.374	421.809.494	3.227.738.802	4.051.576.000	2.180.089.021	300.113.613	3.742.932.879	3.438.468.669	2.134.845.395	323.032.681	4.045.792.747	2.984.308.477	2.238.372.709	402.413.218	3.938.198.167	2.907.679.766
DMU10	184.865.821	29.348.756	444.155.631	399.082.775	320.206.853	264.212.653	416.690.217	485.877.549	357.463.781	169.107.577	369.229.251	384.826.168	93.466.345	212.998.203	490.271.228	68.577.431
DMU11	200.084.803	117.987.467	117.622.833	313.934.024	196.001.899	131.171.884	513.577.767	251.455.470	337.690.984	412.767.760	595.296.034	580.452.245	339.660.136	539.995.623	545.359.876	489.624.030
DMU12	204.932.557	129.069.596	222.585.810	307.982.478	116.322.846	85.336.864	188.511.757	156.645.999	93.001.216	73.628.650	198.574.804	166.369.223	138.077.257	82.067.633	183.744.661	198.697.289
DMU13	191.072.635	24.086.122	146.405.395	224.745.233	167.712.917	26.523.964	144.143.219	183.633.627	109.720.693	21.899.395	150.889.571	108.966.088	104.007.959	26.023.760	146.452.664	104.207.873
DMU14	351.142.337	80.922.356	314.708.716	402.614.361	405.415.280	56.769.416	354.199.346	400.087.596	479.890.624	52.139.780	393.842.387	512.746.539	275.460.079	60.364.295	314.744.190	276.654.365

Fuente: elaboración propia, a partir de Superintendencia de Sociedades (2017).



**Tabla 2.** Estadísticos descriptivos

Año	Estadístico descriptivo	Costos de ventas	Gastos totales	Activo total	Ingresos operacionales
2011	Media	697.056.704	143.419.365	933.104.636	1.002.598.574
	Mediana	241.982.425	66.842.614	330.965.982	325.966.942
	Desv. Std	974.983.486	185.434.174	1.448.582.632	1.401.181.058
	Máximo	3.130.905.838	591.252.152	4.975.669.657	4.051.576.000
	Mínimo	33.885.120	5.487.668	22.792.243	39.172.611
2012	Media	742.962.377	148.042.029	1.199.394.151	961.269.884
	Mediana	295.863.210	84.137.310	396.011.221	301.426.581
	Desv. Std	1.063.875.948	170.248.867	1.681.700.595	1.429.613.494
	Máximo	3.493.309.148	492.900.211	5.559.123.504	4.620.880.321
	Mínimo	2.699.905	4.069.613	17.015.026	6.095.006
2013	Media	971.182.893	174.056.931	1.509.412.023	1.285.680.034
	Mediana	697.056.704	143.419.365	933.104.636	961.269.884
	Desv. Std	1.197.072.204	191.884.475	1.911.507.775	1.573.512.629
	Máximo	3.493.309.148	591.252.152	5.559.123.504	4.620.880.321
	Mínimo	2.699.905	4.069.613	17.015.026	2.699.905
2014	Media	1.167.270.594	203.792.655	1.825.815.570	1.541.516.048
	Mediana	857.072.635	159.145.448	1.323.988.391	1.123.474.959
	Desv. Std	1.264.224.828	204.798.283	2.025.414.478	1.664.916.791
	Máximo	3.493.309.148	591.252.152	5.559.123.504	4.620.880.321
	Mínimo	2.699.905	4.069.613	17.015.026	2.699.905

**Fuente:** elaboración propia.

La tabla 3 muestra los coeficientes de la matriz de correlación de las observaciones de cada variable de interés de la investigación. En los datos se percibe que existe alta correlación positiva entre las variables de entrada y la variable de salida; lo anterior sugiere que un incremento en los valores de entrada mostrará un aumento en los valores de salida. Este comportamiento es lo que se podría esperar, teniendo en cuenta que la inversión y los gastos en una empresa deberían representar un mayor nivel de ingresos.

Los índices de eficiencia obtenidos para cada unidad evaluada se presentan en la tabla 4, que muestra, a partir del modelo DEA CCR-O, la eficiencia por año y promedio durante el periodo 2011-2014 de cada una de las empresas del sector carbón en Colombia, así como también la

eficiencia promedio del sector para cada año. Siendo calificadas como eficientes 19 observaciones, en promedio una de cada tres empresas se ubica en la frontera eficiente por año. La DMU 8 es eficiente durante todo el periodo de estudio. Una DMU es eficiente si el puntaje de eficiencia es igual a 1. La eficiencia promedio de las empresas en el periodo de estudio es del 84,5 %, lo que indica que con los mismos insumos sus ingresos operacionales potencialmente podrían ser 18,3 % mayores.

Los resultados del análisis de eficiencia muestran que los niveles logrados por las empresas son altos para los cuatro años; sin embargo, es importante resaltar que las DMU4, DMU6, DMU7, DMU8, DMU9, DMU11 Y DMU12 presentaron una eficiencia media por encima del promedio, mientras que las DMU3 y DMU5 muestran un

**Tabla 3.** Matriz de correlación

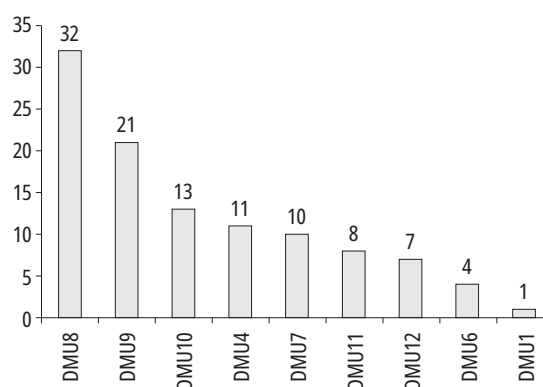
Año		Costos de ventas	Gastos totales	Activo total	Ingresos operacionales
2011	Costos de ventas	1			
	Gastos totales	0,88618897	1		
	Activo total	0,88789485	0,60683246	1	
	Ingresos operacionales	0,9692778	0,87320865	0,892065	1
2012	Costos de ventas	1			
	Gastos totales	0,89329985	1		
	Activo total	0,98069991	0,84024253	1	
	Ingresos operacionales	0,98531073	0,84661817	0,989306	1
2013	Costos de ventas	1			
	Gastos totales	0,60510129	1		
	Activo total	0,92818743	0,30896057	1	
	Ingresos operacionales	0,99032814	0,52548313	0,960123	1
2014	Costos de ventas	1			
	Gastos totales	0,60417966	1		
	Activo total	0,9693706	0,40957196	1	
	Ingresos operacionales	0,98586309	0,55966917	0,974934	1

**Fuente:** elaboración propia.

desempeño bastante discreto. Para 2014 las DMU3 y DMU10 evidencian un deterioro de su eficiencia, que se podría relacionar con la disminución drástica de la actividad operacional de las empresas durante este año.

El análisis DEA proporciona grupos de referencia, de tal manera que cada unidad NO eficiente es comparada con otras de unidades con recursos semejantes y mejores resultados. Así, pueden darse casos en los que una unidad eficiente forma parte del grupo de referencia de más de una unidad ineficiente (Pino Mejías, Solís Cabrera, Delgado Fernández y Barea Barrera, 2010). En la tabla 5 se muestran los grupos de referencia para cada empresa en los años estudiados.

La figura 1 muestra las veces que cada empresa eficiente evalúa a las empresas ineficientes. Al realizar un análisis del conjunto de referencia, este nos indica que la DMU8 es la empresa del sector que más sirve como referente de comparación a las empresas ineficientes, con una frecuencia de 32 veces. Este resultado es coherente con la información de la tabla 4; por esta razón, DMU8 podría ser considerada como la empresa líder del sector.



**Figura 1.** Número de veces que una empresa eficiente es evaluadora de las ineficientes. Fuente: elaboración propia.

Las mejoras potenciales que las empresas debieron alcanzar en sus ingresos operacionales en cada año para lograr ser eficientes se muestran en la tabla 6.

En este estudio se verificaron los resultados obtenidos del modelo DEA CCR-O con el análisis discriminante, mediante el cual se puede validar la pertenencia de un elemento a un grupo determinado, como se explica a continuación.

**Tabla 4.** Puntajes de eficiencia modelo DEA-CCR-O

Empresa	Eficiencia				Promedio
	2011	2012	2013	2014	
DMU1	1,000	0,727	0,814	0,664	0,801
DMU2	0,759	0,869	0,975	0,697	0,825
DMU3	0,660	0,809	0,785	0,252	0,627
DMU4	0,813	1,000	0,826	1,000	0,910
DMU5	0,564	0,601	0,550	0,529	0,561
DMU6	0,877	1,000	1,000	0,935	0,953
DMU7	0,865	0,965	1,000	1,000	0,957
DMU8	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
DMU9	1,000	1,000	1,000	0,846	0,962
DMU10	1,000	1,000	0,811	0,451	0,816
DMU11	1,000	0,749	1,000	0,886	0,909
DMU12	0,863	0,861	1,000	0,896	0,905
DMU13	0,850	0,907	0,756	0,674	0,797
DMU14	0,740	0,836	0,932	0,722	0,807
Eficiencia media	0,857	0,880	0,889	0,754	

**Fuente:** elaboración propia.**Tabla 5.** Grupos de referencia

Empresa	2011	2012	2013	2014
DMU1	DMU1	DMU8, DMU9, DMU10	DMU8, DMU11	DMU8
DMU2	DMU8, DMU10	DMU8, DMU9, DMU10	DMU6, DMU8, DMU9	DMU4, DMU7, DMU8
DMU3	DMU8, DMU9, DMU11	DMU8, DMU9	DMU8, DMU9, DMU12	DMU8
DMU4	DMU8, DMU9, DMU12	DMU4	DMU7, DMU12	DMU4
DMU5	DMU8, DMU10	DMU4, DMU9, DMU10	DMU8, DMU11, DMU12	DMU7, DMU8
DMU6	DMU10	DMU6	DMU6	DMU4, DMU7
DMU7	DMU10	DMU4, DMU9	DMU7	DMU7
DMU8	DMU8	DMU8	DMU8	DMU8
DMU9	DMU9	DMU9	DMU9	DMU4, DMU7, DMU8
DMU10	DMU10	DMU10	DMU8, DMU11, DMU12	DMU8
DMU11	DMU11	DMU4, DMU9, DMU10	DMU11	DMU8
DMU12	DMU9, DMU11	DMU4, DMU9, DMU10	DMU12	DMU7, DMU8
DMU13	DMU8, DMU9, DMU10	DMU8, DMU9, DMU10	DMU8, DMU9, DMU12	DMU4, DMU7, DMU8
DMU14	DMU8, DMU9, DMU11	DMU8, DMU9	DMU6, DMU8, DMU9	DMU4, DMU7, DMU8

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 6.** Aumento necesario en el ingreso operacional para alcanzar la eficiencia

Empresa	2011	2012	2013	2014
DMU1	0	819876900	647076088	1429879402
DMU2	1230980068	698872464	96575362	1398577113
DMU3	163955695	71886859	66842623	96279977,7
DMU4	8995558	0	2914770	0
DMU5	257073468	197783532	289935814	349439328
DMU6	9217620	0	0	10140992,2
DMU7	177665416	33061300	0	0
DMU8	0	0	0	0
DMU9	0	0	0	528102477
DMU10	0	0	89749092	83420073,6
DMU11	0	84067189	0	62740493,2
DMU12	48721349	25321884	0	23068060,7
DMU13	39668775	18919911	35135007	50507874,4
DMU14	141861630	78479087	37229833	106515323

**Fuente:** elaboración propia.

La variable de agrupación son los datos de la tabla 4 de donde obtenemos “eficiente” (19 observaciones) e “ineficiente” (37 observaciones). Las variables independientes son los datos de la tabla 1. Con esta información se procedió a la aplicación del análisis discriminante con el software SPSS20; los resultados se muestran en la tabla 7.

**Tabla 7.** Clasificación con análisis discriminante

	Eficiente	Ineficiente	Total
Eficiente	13	6	19
Ineficiente	5	32	37

**Fuente:** elaboración propia.

La tasa global de correcta clasificación es del 80,34 %; la tasa de verdaderos positivos es de 72,22% y la de verdaderos negativos es de 84,21 %. Esto es bueno si lo comparamos con los resultados de otras investigaciones similares, donde se aplicó la técnica de cálculo multivariado análisis discriminante y los resultados de clasificación solo alcanzaron el 62,25 % (Fontalvo Herrera, 2016), 60,6 % (Fontalvo Herrera, Vergara y De la Hoz,

2012), 52,6 % (Fontalvo Herrera, 2014) y 75 % (Fontalvo Herrera, 2012a)

Sin embargo, otra investigación muestra mejores resultados de clasificación, con la utilización de la técnica análisis discriminante (Fontalvo Herrera, 2012b); en esta, la capacidad de clasificación del modelo fue de 92,6 %, es decir, muy buena. Lo anterior muestra la pertinencia y utilidad de la técnica de análisis discriminante para pronosticar la pertenencia o clasificación de un grupo.

## Conclusión

Como aporte significativo de esta investigación, se establece una integración del modelo DEA CCR-O con optimización de las salidas, el cual se articula con la técnica de cálculo multivariado análisis discriminante. Este permitió aportar como nuevo conocimiento un método que ayuda a evaluar la eficiencia técnica de las empresas del sector Carbón en Colombia y a validar la pertenencia de una empresa de este contexto en eficiente o ineficiente.

Asimismo, el modelo de eficiencia técnica desarrollado (DEA-CCR O), con el cual se consideró

como variable de salida el ingreso operacional, indica que las empresas están operando con un nivel de eficiencia promedio relativamente alto (84,5 %), muy cercano a la escala óptima de operación, y así se hace parte de la frontera de eficiencia el 33 % de las empresas analizadas. Estos resultados se validaron mediante la técnica del análisis discriminante, y de esta manera se logró una tasa correcta de clasificación del 80,34 %, que indica que el nivel de pertenencia de eficiencia o no de las empresas del sector es relativamente alto, para los cuatro años.

Otro aporte significativo de esta investigación es la elaboración de un *ranking* de referencia de eficiencias de todas las empresas estudiadas, que permite a todos los grupos de interés tener información y los niveles de desempeño de la eficiencia técnica, lo que les posibilita tomar decisiones para el desarrollo de sus actividades e intercambios comerciales.

Los valores de las eficiencias de la mayoría de las empresas del sector mostraron un comportamiento estadístico regular durante el periodo de estudio, y son independientes del tamaño de la compañía medida en términos de activo total.

Así, pues, se invita a los investigadores a analizar otros factores que inciden en la mejora y eficiencia técnica de las empresas. De igual forma, como futuras proyecciones, sería pertinente analizar el sector con otros modelos DEA y con otras variables de entrada y salida que permitan tomar decisiones para incrementar los niveles de eficiencia del sector y, por ende, la economía.

## Referencias

- Akhtar, T., Zahir, A., Tareq, M. A. y Rabbi, F. (2016). Capital structure and firm efficiency: A case of Pakistan. *Indian Journal of Finance*, 10(2), 50-66.
- Contreras León, A. L. y Rodríguez Lozano, G. I. (2017). Medición de la eficiencia relativa de fincas ganaderas con servicio de asistencia técnica. *Revista Facultad de Ciencias Económicas*, 25(1), 117-128.
- Cook, W. D., Tone, K. y Zhu, J. (2014). Data envelopment analysis: Prior to choosing a model. *Omega*, 44, 1-4.
- Cool, V. y Blasco, O. (2007). Evaluación de la eficiencia de la industria textil española a partir de la información económica financiera: una aplicación del análisis envolvente de datos. *Revista de Investigación Operacional*, 28(1), 61-91.
- Chen, H. H. (2008). Stock selection using data envelopment analysis. *Industrial Management & Data Systems*, 108(9), 1255-1268.
- Escobar-Pérez, J. y Cuervo-Martínez, A. (2008). Validez de contenido y juicio de expertos: una aproximación a su utilización. *Avances en Medición*, 6(1), 27-36.
- Fontalvo Herrera, T. J. (2012a). Evaluación de la gestión financiera: empresas del sector automotriz y actividades conexas en el Atlántico. *Dimensión Empresarial*, 10(2), 11-20.
- Fontalvo Herrera, T. J. (2012b). Evaluación de la productividad de las entidades prestadoras de servicios de salud (EPS) del régimen subsidiado en Colombia, por medio del análisis discriminante. *Hacia la Promoción de la Salud*, 17(2), 60-78.
- Fontalvo Herrera, T. J. (2016). Análisis de la productividad para las empresas certificadas y no certificadas en la Coalición Empresarial Anti-Contrabando (CEAC) en la ciudad de Cartagena, Colombia. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 24(1), 113-123.
- Fontalvo Herrera, T. J. y De la Hoz Herrera, G. (2016). Eficiencia de los hospitales de Bolívar-Colombia por medio análisis envolvente de datos. *Dimensión Empresarial*, 14(1), 95-108.
- Fontalvo, T., Vergara, J. y De la Hoz, E. (2012). Evaluación del mejoramiento de los indicadores financieros en las empresas del sector almacenamiento y actividades conexas en Colombia por medio de análisis de discriminante. *Prospectiva*, 10(1), 124-131.
- Fontalvo Herrera, T. J. (2014). Aplicación de análisis discriminante para evaluar la productividad como resultado de la certificación BASC en las empresas de la ciudad de Cartagena. *Contaduría y Administración*, 59(1), 43-62.
- Guzmán, I. y Escobar, B. (2011). Cambios de productividad y creación de valor social en las cajas de ahorro españolas. *El Trimestre Económico*, 78(309), 235-253.
- Jenkins, L. y Anderson, M. (2003). A multivariate statistical approach to reducing the number of variables in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 147(1), 51-61.
- Kaffash, S. y Marra, M. (2017). Data envelopment analysis in financial services: a citations network analysis of banks, insurance companies and money market funds. *Annals of Operations Research*, 253(1), 307-344.
- Liu, J. S., Lu, L. Y., & Lu, W. M. (2016). Research fronts in data envelopment analysis. *Omega*, 58, 33-45.

- Mardani, A., Zavadskas, E. K., Streimikiene, D., Jusoh, A. y Khoshnoudi, M. (2016). A comprehensive review of data envelopment analysis (DEA) approach in energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1298-1322.
- Min, H. y Joo, S. J. (2009). Benchmarking third-party logistics providers using data envelopment analysis: an update. *Benchmarking an International Journal*, 16(5), 572-587.
- Morelos, J., De La Hoz, E. y Fontalvo, T. (2018a). Método de cálculo multivariante para analizar y proyectar el comportamiento de las razones financieras de grupos empresariales del sector extracción en Colombia. *Inter-ciencia: Revista de ciencia y tecnología de América*, 43(10), 696-700.
- Morelos, J., De La Hoz, E. y Fontalvo, T. (2018b). Behavior of Productivity Indicators and Financial resources in the field of extraction and exploitation of minerals in Colombia. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 25(3), 349-367.
- Mostafa, M. M. (2009). Benchmarking the US specialty retailers and food consumer stores using data envelopment analysis. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 37(8), 661-679.
- Narasimhan, R., Talluri, S. y Méndez, D. (2001). Supplier evaluation and rationalization via data envelopment analysis: an empirical examination. *Journal of Supply Chain Management*, 37(2), 28-37.
- Nazarko, J. y Šaparauskas, J. (2014). Application of DEA method in efficiency evaluation of public higher education institutions. *Technological and Economic development of Economy*, 20(1), 25-44.
- Oviedo, W. y Rodríguez, G. (2011). Medición de la eficiencia técnica relativa de las fincas asociadas a COOUNIÓN en Guasca Cundinamarca. *Revista MVZ Córdoba*, 16(2), 2615-2627.
- Plazas Díaz, F. A. P. (2016). Análisis de la evolución de la inversión extranjera directa en el sector minero del carbón en Colombia de 2004 a 2013. *Apuntes del Cenes*, 35(61), 51-84.
- Peng Wong, W. y Yew Wong, K. (2007). Supply chain performance measurement system using DEA modeling. *Industrial Management & Data Systems*, 107(3), 361-381.
- Pino Mejías, P., L. J., Solís Cabrera, F. M., Delgado Fernández, M. y Barea Barrera, R. del C. (2010). Evaluación de la eficiencia de grupos de investigación mediante análisis envolvente de datos (DEA). *El Profesional de la Información*, 19(2), 160-167.
- Rezitis, A. N. y Kalantzi, M. A. (2016). Investigating technical efficiency and its determinants by data envelopment analysis: An application in the Greek food and beverages manufacturing industry. *Agribusiness*, 32(2), 254-271.
- Rudas, G. y Hawkins, D. (2014). *La minería de carbón a gran escala en Colombia: impactos económicos, sociales, laborales, ambientales y territoriales*. Bogotá, Colombia: Friedrich-Ebert-Stiftung.
- Sangare, S. y Maisonnave, H. (2018). Mining and petroleum boom and public spending policies in Niger: a dynamic computable general equilibrium analysis. *Environment and Development Economics*, 23(5), 1-11.
- Sánchez, M., Villarreal, G. y Cabrera, M. (2008). Optimización multicriterio por análisis envolvente de datos. *Ingenierías*, 11(39), 59-65.
- Shorouyehzad, H., Lotfi, F. H., Aryanezhad, M. y Dabestani, R. (2011). Efficiency and ranking measurement of vendors by data envelopment analysis. *International Business Research*, 4(2), 137-146.
- Sohail, M. K. y Anjum, M. S. (2016). Efficiency Dynamics of Initial Public Offerings Using Data Envelopment Analysis and Malmquist Productivity Index Approach. *Engineering Economics*, 27(2), 175-184.
- Sotelsek Salem, D. y Laborda Castillo, L. (2010). Technical Efficiency and Value Chain of Eastern European Union Companies: An Empirical Application using Semi-Parametric Frontier Methods. *Documento de trabajo*, (4).
- Superintendencia de Sociedades (2017). *Portal de información PIE*. Recuperado de [https://www.supersociedades.gov.co/delegatura\\_aec/estudios\\_financieros/Paginas/sirem.aspx](https://www.supersociedades.gov.co/delegatura_aec/estudios_financieros/Paginas/sirem.aspx)
- Suzuki, S., Nijkamp, P., Rietveld, P. y Pels. E. (2010). A distance friction minimization approach in Data Envelopment Analysis: A comparative study on airport efficiency. *European Journal of Operational Research*, 207(2), 1104-1115.
- Thanassoulis, E., De Witte, K., Johnes, J., Johnes, G., Karagiannis, G. y Portela, C. S. (2016). Applications of data envelopment analysis in education. *Data Envelopment Analysis*, 238(1), 367-438.
- Wang, H., Ang, B. W., Wang, Q. W. y Zhou, P. (2017). Measuring energy performance with sectoral heterogeneity: A non-parametric frontier approach. *Energy Economics*, 62, 70-78.
- Yang, L. H., Wang, Y. M., Lan, Y. X., Chen, L. y Fu, Y. G. (2017). A data envelopment analysis (DEA)-based method for rule reduction in extended belief-rule-based systems. *Knowledge-Based Systems*, 123, 174-187.
- Zhou, G., Min, H., Xu, C. y Cao, Z. (2008). Evaluating the comparative efficiency of Chinese third-party logistics providers using data envelopment analysis. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(4), 262-279.



