

EFICIENCIA TÉCNICA DE LOS NIVELES DE ELECTRIFICACIÓN DE PAÍSES LATINOAMERICANOS

Gustavo Araujo

Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Vicerrectorado Barquisimeto.
garaujo@unexpo.edu.ve

RESUMEN. El propósito de este trabajo es emplear un análisis combinado de fronteras estocástica y análisis envolvente de datos para medir y comparar la eficiencia técnica de los niveles de electrificación de diez países latinoamericanos: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú, Uruguay y Venezuela. A partir de la estimación de una frontera estocástica de producción Cobb-Douglas se mide la eficiencia técnica del nivel de electrificación de cada país, con base al número de clientes servidos, longitud de líneas, potencia instalada, población total y producción de electricidad. Luego mediante el modelo DEA-CCR orientado a insumos se vuelve a determinar la eficiencia técnica del nivel de electrificación pero esta vez con base al número de clientes servidos, pérdidas de transmisión, consumo de electricidad per cápita y producción de electricidad. Los resultados obtenidos permitieron jerarquizar la eficiencia técnica de los países en estudio. Se destaca que los países Argentina, Bolivia, Brasil, Ecuador, Paraguay y Uruguay se encuentran por encima del promedio evaluado. Como conclusión del estudio se elabora una herramienta de aplicación de análisis combinado de fronteras estocásticas y DEA para medir la eficiencia técnica de los niveles de electrificación de los países de Latinoamérica.

Palabras claves: Nivel de electrificación, fronteras estocástica, DEA, eficiencia técnica.

TECHNICAL EFFICIENCY OF THE ELECTRIFICATION LEVELS OF LATIN AMERICAN COUNTRIES

ABSTRACT. The purpose of this work is to use a combined analysis of stochastic frontiers and data envelopment analysis to measure and compare the technical efficiency of the electrification levels of ten Latin American countries: Argentina, Bolivia, Brazil, Chile, Colombia, Ecuador, Paraguay, Peru, Uruguay and Venezuela. From the estimation of a Cobb-Douglas production stochastic frontier the technical efficiency of electrification level in each country is measured based on the number of served clients, length of lines, installed capacity, total population and electricity production. Then using the DEA-CCR input oriented model the technical efficiency of electrification level is determined again but based on the number of served clients, transmission losses, per capita electricity consumption and electricity production. The results allowed us to rank the technical efficiency of the countries studied. It is noted that the countries Argentina, Bolivia, Brazil, Ecuador, Paraguay and Uruguay are rated above average. As conclusion of the study an application tool of combined analysis of stochastic frontier and DEA is developed to measure the technical efficiency of electrification levels of the countries of Latin America.

Keywords: Level of electrification, stochastic frontiers, DEA, technical efficiency.

1. INTRODUCCION

Durante los últimos cinco años se ha creado una matriz de opinión sobre las causas de la crisis de energía eléctrica en Venezuela. Entre ellas, se puede mencionar el incumplimiento de los programas de mantenimiento para preservar la infraestructura eléctrica y la no ejecución de los planes de expansión en los sistemas de generación, transmisión y distribución, que ha llevado al deterioro del sistema eléctrico nacional. Por otro lado, también se destaca un consumo de energía eléctrica por habitante mayor al promedio de Latinoamérica y un crecimiento excesivo de la demanda de energía eléctrica nacional superior a los requerimientos reales. Pero poco se ha investigado sobre el nivel de electrificación del sistema eléctrico venezolano en comparación con otros países latinoamericanos, aun siendo éste un aspecto de vital importancia para definir las políticas públicas y el desarrollo económico y social de un país. A pesar que el nivel de electrificación en Venezuela está por encima del 98 por ciento, cabe preguntarse si el mismo es eficiente desde el punto de vista de su infraestructura y uso de la energía eléctrica. Las fronteras estocásticas permiten medir la desviación de la eficiencia de los niveles de electrificación en comparación a otros países bajo las mismas condiciones. De igual manera, el análisis envolvente de datos es capaz de medir la eficiencia relativa del uso de la energía eléctrica, adicionalmente, un plan de producción objetivo que permite alcanzar la eficiencia en aquellos países que resultasen ser ineficientes.

El propósito de este trabajo consiste en aplicar una herramienta de análisis combinado de fronteras estocástica y análisis envolvente de datos para medir y comparar la eficiencia técnica de los niveles de electrificación de diez países latinoamericanos: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú, Uruguay y Venezuela. El análisis de frontera estocástica se emplea para medir la eficiencia técnica de la infraestructura eléctrica del nivel de electrificación de los países, a partir de la formulación y estimación de una función de producción Cobb-Douglas con base al número de clientes servidos, longitud de líneas, potencia instalada, población total y producción de electricidad. Mientras que el análisis envolvente de datos se utiliza como una herramienta de análisis complementario para estimar, por medio de un modelo DEA-CCR orientado a insumos, la eficiencia en el uso de la energía eléctrica de los países, con base al número de clientes servidos, las pérdidas de transmisión, el consumo per cápita y la producción de electricidad. Adicionalmente, se elabora un plan de producción objetivo para llevar los países ineficientes a alcanzar su eficiencia.

El trabajo está estructurado de la siguiente manera, luego de esta introducción introducción, en la siguiente sección se presentan los aspectos teóricos sobre los conceptos de eficiencia y los modelos de frontera estocástica y análisis envolvente de datos empleados para estimar la eficiencia técnica. A continuación, en la sección tres se presenta la metodología y procedimientos utilizados y, en la cuarta sección se esbozan las características principales del conjunto de datos y variables empleados en la estimación de la frontera de producción eficiente. En la quinta sección se recojen los principales resultados y su análisis y, en la última sección, se dan las conclusiones.

2. FRONTERA DE PRODUCCION EFICIENTE

2.1 Conceptos de eficiencia

Una de las principales herramientas para medir la eficiencia son los estudios de fronteras de producción. Una frontera de producción representa algún tipo ideal en los que se alcanza la máxima cantidad de un producto dados unos insumos. De esta forma, en la práctica las fronteras de producción no son más que una regresión o un modelo de programación matemática que se ajusta a los datos reconociendo la restricción de que todas las observaciones deben encontrarse debajo de la frontera y al menos una debe estar sobre ella.

El primer autor que sugiere la utilización de las fronteras de producción para el análisis de la eficiencia fue Farrell, utilizando para ello funciones de producción [1]. Propuso un método para medir la eficiencia teniendo en cuenta varios factores de producción al mismo tiempo. Descompuso la eficiencia económica de una empresa en dos componentes: eficiencia técnica, que representa la habilidad de la empresa para producir más, dados unos niveles determinados de insumos, y eficiencia asignativa que representa la habilidad de la empresa para producir lo mismo usando las proporciones óptimas de sus insumos, dado el precio relativo de los insumos.

Así, la eficiencia económica también denominada eficiencia productiva, es la habilidad de la empresa para producir un producto a un costo mínimo. Para alcanzar el mínimo costo la empresa no solo debe alcanzar la frontera de posibilidades de producción, sino que también debe elegir la combinación óptima de los insumos que le permita minimizar los costos incurridos para un nivel de producción dado. Este concepto de eficiencia económica, propuesto por Farrell, fue el punto de partida para el desarrollo posterior de las técnicas de medición de la eficiencia y productividad bajo dos enfoques metodológicos: las técnicas paramétricas de fronteras estocásticas y las técnicas

no paramétricas del análisis envolvente de datos.

Los estudios de fronteras se pueden clasificar de acuerdo a la forma en que se especifica y estima la frontera. La especificación se refiere a si la frontera se calcula a partir de una función de producción, que muestra las cantidades producidas como función de los insumos utilizados, o a partir de una función de costos, que muestra el costo total de producción como función del nivel de producto y el precio de los insumos. Mientras que la estimación se refiere a si la frontera es estimada con herramientas econométricas o matemáticas.

2.2 Análisis de frontera de producción estocástica

Todas las definiciones anteriores de la eficiencia asumen que la frontera de producción es conocida. Dado que en la práctica esta frontera no se conoce, es necesario estimarla a partir de un conjunto de datos observados con un modelo paramétrico, lo que ha dado lugar al análisis estocástico de fronteras.

Las fronteras de producción estocásticas fueron propuestas de forma independiente en dos artículos, casi simultáneamente, por Meeusen y Van den Broeck [2] y Aigner, Lovell y Schmidt [3]. Lograron caracterizar la función de producción para considerar la posibilidad de que el desempeño de una empresa pueda ser afectada no sólo por ineficiencias en el manejo de los insumos, sino además por factores externos favorables o desfavorables que se encuentran totalmente fuera de su control, por ejemplo, condiciones climáticas adversas.

Para incorporar estos nuevos conceptos, los modelos de fronteras estocásticas emplean un término de error aditivo compuesto de una variable estocástica con distribución normal, representativo de las fluctuaciones aleatorias incontrolables que desvían a la empresa de su producción máxima y una variable estocástica de una sola cola con distribución asimétrica, usualmente seminormal, normal truncada, gamma o exponencial, representativa de la ineficiencia técnica de la empresa que hacen que su producción esté situada por debajo del valor que potencialmente es capaz de alcanzar.

El modelo teórico de este enfoque paramétrico estocástico para el caso de una función de producción Cobb-Douglas se representa de la siguiente forma, donde el término de error (ϵ) entra en el modelo multiplicando:

$$Y_i = f(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}; \beta) e^{(v_i + u_i)} \quad (1)$$

$$Y_i = X_i \beta + \underbrace{(V_i + U_i)}_{\varepsilon_i} \quad i = 1, \dots, N$$

Donde se asume una tecnología de la producción en la que se produce un único producto. Y_i es el logaritmo natural de la producción de la i -ésima empresa, X_i es un vector que contiene el logaritmo natural de los insumos mano de obra y capital y a las variables ambientales, β es un vector de parámetros desconocidos a estimar, V_i es la variable aleatoria incontrolable y U_i es la variable aleatoria no positiva para tomar en cuenta la ineficiencia técnica en la producción.

La especificación original en (1), fue propuesta para una estructura de datos de corte transversal y, ha sido modificada y extendida en diferentes formas. Estas incluyen asumir diferentes distribuciones para el término de ineficiencia U_i , tales como distribución normal truncada, gamma o exponencial; estructura de panel de datos; eficiencia técnica variante en el tiempo; y otros.

Así, Battese y Coelli propusieron un modelo de frontera de producción estocástica para un panel de datos, la cual considera la evolución de la eficiencia en el tiempo y asume una distribución normal truncada [4]. Este modelo se expresa de la siguiente manera:

$$Y_{it} = X_{it} \beta + (V_{it} + U_{it}) \quad i = 1, \dots, N \quad t = 1, \dots, T \quad (2)$$

$$U_{it} = U_i e^{-\eta(t-T)}$$

Donde Y_{it} es el logaritmo natural de la producción de la i -ésima empresa en el periodo t , X_{it} es el vector del logaritmo natural de las cantidades de entrada o insumos de la i -ésima empresa en el periodo t , β es el vector de los parámetros desconocidos a estimar, V_{it} y U_{it} son las variables aleatorias definidas anteriormente y η es un parámetro a ser estimado.

La eficiencia técnica (ET) se obtiene al descomponer el error compuesto, mediante el cociente entre la producción observada y la frontera estocástica estimada. De esta forma:

$$ET_i = \frac{Y_i}{f(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}; \beta) e^{(v_i)}} = e^{(u_i)} \quad (3)$$

La medida de la eficiencia técnica es un número que toma valores entre cero y uno, donde una medida de uno denota que la empresa es cien por ciento eficiente. Por lo tanto, esta medida indica la magnitud de la producción de la empresa i relativa a la producción que pudo ser generada por una empresa plenamente eficiente usando los mismos insumos. Aquellas empresas que se encuentran más alejadas de la frontera serán más ineficientes.

2.3 Análisis envolvente de datos

El análisis envolvente de datos (DEA, por sus siglas en inglés) es una técnica de programación matemática que permite la construcción de una superficie envolvente o frontera de producción eficiente, a partir de los datos disponibles del conjunto de empresas objeto de estudio, de forma que las empresas que determinan la envolvente son denominadas empresas eficientes y aquellas que no permanecen sobre la misma son consideradas empresas ineficientes. El DEA permite la evaluación de la eficiencia relativa de cada una de las empresas que consumen los mismos insumos, en diferentes cantidades, para producir los mismos productos, en distintas cantidades.

Según Charnes, Cooper y Rhodes, los modelos DEA se pueden clasificar de acuerdo a la naturaleza de la medida de eficiencia, la orientación del modelo para calcularla y la tipología de los rendimientos a escala que caracterizan la frontera eficiente [5]. El tipo de medida de eficiencia se refiere a modelos radiales y no radiales. De acuerdo a la orientación del modelo, estos pueden ser orientados a los insumos, en los que se busca, dado un nivel de los productos, la máxima reducción proporcional en los insumos; u orientados a los productos, en los que se busca, dado un nivel de insumos, el máximo incremento proporcional de los productos, permaneciendo en ambos casos en la frontera de posibilidades de producción. En ese sentido, una empresa se considera eficiente si, y solo si, no es posible incrementar el nivel de los productos manteniendo fija las cantidades de los insumos utilizados ni es posible disminuir las cantidades de los insumos empleados sin alterar el nivel de los productos obtenidos.

Los rendimientos a escala indican el aumento de la producción como resultado del incremento de todos los factores de producción en el mismo porcentaje. Según la tipología de los rendimientos a

escala que caracterizan la tecnología de producción, los modelos DEA pueden ser de rendimiento constante a escala en los que un incremento porcentual del producto es igual al incremento porcentual de los recursos productivos; y rendimiento variable a escala en los que el incremento porcentual del producto es mayor que el incremento porcentual de los factores (rendimiento creciente a escala) o en los que el incremento porcentual del producto es menor que el incremento porcentual de los factores (rendimiento decreciente a escala).

El modelo DEA empleado en este trabajo para determinar la eficiencia técnica del uso de la energía eléctrica es el modelo DEA-CCR, así denominado por haber sido desarrollado por Charnes, Cooper y Rhodes [6]. Este modelo proporciona medidas de eficiencia radiales, orientado a los insumos y bajo el supuesto de rendimientos constante a escala. El modelo DEA-CCR orientado a insumos, se puede escribir de la siguiente forma envolvente:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min}_{\theta, \lambda} \quad Z_0 = \theta \\
 & \text{Sujeto a:} \\
 & \quad Y\lambda \geq y_0 \\
 & \quad \theta x_0 \geq X\lambda \\
 & \quad \lambda > 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

Donde θ denota la medida de eficiencia técnica de la empresa evaluada, λ es el vector ($n \times 1$) de las intensidades, Y es una matriz de los productos de orden ($s \times n$), X es una matriz de los insumos de orden ($m \times n$), y_0 representa el vector de los productos de la empresa evaluada, x_0 representa el vector de los insumos de la empresa evaluada. El problema de optimización dado por el modelo (4) debe ser resuelto para cada una de las empresas objeto del análisis.

3. METODOLOGIA DE ESTIMACION

El estudio de la eficiencia técnica de los niveles de electrificación se realiza en dos etapas. En la primera etapa, se estima una frontera de producción estocástica para medir y comparar la eficiencia técnica de cada país, con base al número de clientes servidos, longitud de líneas, potencia instalada, población total y producción de electricidad. Se formula una forma funcional de producción Cobb-Douglas, en la que la variable aleatoria V_i se asume independiente e idénticamente distribuida a una normal $N(0, \sigma_v^2)$ e independiente del término de ineficiencia U_i , la

cual se asume con una distribución normal truncada. Mediante el método de estimación de máxima verosimilitud y un panel de datos correspondiente al período de años que va del 2006 al 2011, se estiman los parámetros de interés de la frontera (coeficientes β) y la eficiencia técnica del nivel de electrificación de cada país.

Luego, en la segunda etapa, se complementa el estudio de la eficiencia técnica con un análisis envolvente de datos para determinar la eficiencia en el uso de la energía eléctrica y el plan de producción objetivo, es decir, los niveles de insumos que convertirán a la empresa ineficiente en eficiente en caso de alcanzarlos. Para ello se estima una frontera de producción eficiente empleando el modelo DEA-CCR orientado a insumos, con base al número de clientes servidos, la producción de electricidad, las pérdidas de transmisión y el consumo per cápita. Para los países ineficientes se determinan las coordenadas del punto de proyección sobre la frontera eficiente que lo convertirán en eficiente. Este punto de proyección se obtiene a partir de la combinación lineal de los valores observados y el valor de las intensidades de los países pertenecientes a su conjunto de referencia (dado por el valor de sus intensidades mayor a cero). Las coordenadas del punto de proyección conforman el plan de producción objetivo que lo convierte en un país eficiente. De esta manera se determina la eficiencia técnica de los niveles de electrificación de los países latinoamericanos desde el punto de vista de la infraestructura del sistema eléctrico y el uso eficiente de la energía eléctrica.

4. DESCRIPCION DE LAS VARIABLES Y DATOS

Un aspecto importante previo a la estimación de la frontera de producción es la elección de las variables de salida, de entrada y las variables ambientales. Las variables de entrada son aquellas asociadas con los factores, recursos o insumos que requiere la empresa para obtener los productos. Estos a su vez, corresponden a las variables de salida. Las variables ambientales son aquellas del entorno, sobre las cuales la empresa no tiene capacidad de actuación, pero que afectan a la transformación de los recursos en productos.

Weyman-Jones utilizó en su estudio sobre empresas eléctricas del Reino Unido al número de clientes como variable producto, a la cantidad de empleados como insumo, y la cantidad de kilómetros de la red, capacidad de transformación, ventas totales, densidad de población, ventas industriales/ventas totales y demanda de punta como variables ambientales [7]. En otro trabajo, Hjalmarsson y Veiderpass examinan la eficiencia de las empresas de distribución de energía

eléctrica en Suecia y utilizan al número de clientes como producto, a las horas trabajadas y la cantidad de kilómetros de la red como insumos y añaden finalmente la capacidad de transformación [8]. En general, las variables utilizadas como producto son el número de clientes y las ventas en MWh, siendo el número de clientes la más utilizada en la práctica.

A los efectos de la estimación de la frontera de producción estocástica, y de acuerdo a lo comentado en el punto anterior, en este trabajo se ha seleccionado al número de clientes servidos como variable producto, la cantidad de kilómetros de línea, la potencia instalada en (MW) y la producción de electricidad en (GWh) como variables de insumo, y la población en (miles) como variable ambiental. En cambio, para evaluar la eficiencia técnica mediante el modelo DEA-CCR se utilizó como producto el número de clientes servidos y como insumos las pérdidas de transmisión en (GWh), el consumo per cápita en (kWh/hab) y la producción de electricidad en (GWh).

La información estadística empleada para la estimación de la frontera de producción comprende una estructura de panel de datos de diez países: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú, Uruguay y Venezuela, para el período que va desde el año 2006 hasta el 2011. Dicha información procede de diferentes fuentes y organismos por lo que ha sido necesario un exhaustivo trabajo de correlación y homogenización de los datos. En la tabla 1, se muestra una sección del panel de datos, correspondiente al año 2011.

La información para la producción de electricidad, pérdidas de transmisión, consumo per cápita y población total están disponibles en la base de datos del Banco Mundial [9]. En cambio, la información para el número de clientes servidos, potencia instalada y kilómetros de línea se obtuvo a partir de los informes de la Secretaria General de la Comisión de Integración Eléctrica Regional (CIER). Los informes de la CIER no tienen datos disponibles para el número de clientes servidos del sector eléctrico venezolano. Sin embargo, esta información se puede obtener a partir del Anuario Estadístico del Sistema Eléctrico Nacional 2011, disponible en la página oficial del MPPEE [10].

Tabla 1: Sección de datos para el año 2011 (valores observados).

País	1	2	3	4	5	6	7
Argentina	14200	30552	33810	129555	18701	2967	40729
Bolivia	2138	2822	1682	7222	786	623	10324
Brasil	70312	160086	117135	531758	87524	2438	196935
Chile	5504	15699	18423	65713	4687	3568	17308
Colombia	11173	24392	14419	61822	7430	1123	47079
Ecuador	3679	3654	5232	20266	3369	1192	15246
Paraguay	1313	4106	8818	57626	3433	1228	6573
Perú	5498	10204	8556	39223	2277	1248	29615
Uruguay	1330	4339	2677	10344	1287	2810	3383
Venezuela	5894	14224	25754	122059	24084	3313	29501

1= Clientes servidos, 2= km de líneas, 3= Potencia instalada (MW), 4= Producción de electricidad (GWh), 5= Pérdidas de transmisión (GWh), 6= Consumo per cápita (kWh/hab), 7= Población (miles). Fuente: Banco Mundial [9] y MPPEE [10].

5. RESULTADOS

5.1 Evaluación de la eficiencia mediante frontera estocástica

Una vez establecidas las variables se procede a estimar la frontera de producción estocástica para una función de producción Cobb-Douglas mediante el programa de computación FRONTIER versión 4.1.

Modelo estimado con datos de corte transversal

Se estimó los parámetros β de una función de producción estocástica Cobb-Douglas usando un conjunto de datos de corte transversal correspondiente al año 2011, y asumiendo una distribución normal y normal truncada para el término de error compuesto V_i y U_i , respectivamente. La tabla 2, muestra los resultados después de la estimación final de máxima verosimilitud (MLE).

El modelo de frontera de producción estocástica, bajo el supuesto de eficiencia invariante en el tiempo, y asumiendo una distribución normal y normal truncada para el término de error compuesto V_i y U_i , respectivamente, tiene la siguiente forma:

$$Y = 5.9676 + 0.3536 \log(x_1) + 0.7905 \log(x_2) - 0.8013 \log(x_3) + 0.7008 \log(x_4) + (V_i + U_i)$$

Tabla 2: Estimación Cobb-Douglas. Datos de corte transversal.

MLE	Coefficient	Standard-error	t-ratio
beta 0	6.408799	0.919803	6.967577
beta 1	0.303760	0.038031	7.987277
beta 2	0.884382	0.081825	10.808152
beta 3	-0.825895	0.059156	-13.961315
beta 4	0.685551	0.038985	17.585032
sigma-squared	0.030204	0.025998	1.161792
Gamma	0.999999	0.031693	31.552386
Mu	-0.022937	0.383184	-0.059858
log likelihood function = 10.199274			

Tabla 3: Estimación de la eficiencia.

País	Eficiencia
Argentina	0.916104
Bolivia	0.954003
Brasil	0.995909
Chile	0.763263
Colombia	0.806015
Ecuador	0.998510
Paraguay	0.914836
Perú	0.773776
Uruguay	0.998090
Venezuela	0.724606
Media	0.884511

Se puede observar de la tabla 3, Argentina, Bolivia, Brasil, Ecuador, Paraguay y Uruguay resultaron con una eficiencia por encima del promedio. Mientras que Chile, Colombia, Perú y Venezuela se encuentran con una eficiencia por debajo del promedio calculado. A pesar de que Venezuela cuenta con un nivel de electrificación superior al 98 por ciento, por encima de otros países de Latinoamérica, resultó con la eficiencia más baja. Una observación más detallada sobre

los resultados y con base a los valores mostrados en la tabla 1, permite afirmar que para una cantidad similar de número de clientes servidos, Venezuela utiliza una mayor cantidad de los insumos de potencia instalada y producción de electricidad, y como consecuencia lo hace un país más ineficiente comparado con los países homólogos Chile y Perú, e inclusive por debajo de Colombia que posee un número de clientes servidos mayor. La indisponibilidad de la capacidad instalada de las plantas de generación y el crecimiento excesivo de la demanda eléctrica son posibles causas de esta ineficiencia.

Modelo estimado con panel de datos

En este caso se estimaron los parámetros β de una función de producción estocástica Cobb-Douglas usando un panel de datos correspondiente al periodo desde el 2006 al 2011, para incluir el efecto del tiempo como indicador de cambios en la producción y con la oportunidad de estudiar la evolución de la eficiencia en el tiempo. Se asumió una distribución normal y normal truncada para el término de error compuesto V_i y U_i , respectivamente. Las tablas 4 y 5, muestran los resultados después de la estimación final de máxima verosimilitud (MLE).

Tabla 4: Estimación Cobb-Douglas. Panel de datos periodo 2006 al 2011.

MLE	Coefficient	Standard-error	t-ratio
beta 0	-8.782972	1.529129	-5.743773
beta 1	0.105835	0.061756	1.713763
beta 2	-0.093639	0.101409	-0.923379
beta 3	0.045508	0.092175	0.493712
beta 4	0.986841	0.064757	15.239130
sigma-squared	0.051311	0.011837	4.334891
Gamma	0.959580	0.014279	67.201442
Mu	0.443787	0.089169	4.976944
Eta	0.049406	0.011005	4.489490
log likelihood function = 73.618704			

Tabla 5. Estimación de la eficiencia. Panel de datos periodo 2006 al 2011.

País	Eficiencia					
	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Argentina	0.734926	0.745911	0.756519	0.766757	0.776631	0.786148
Bolivia	0.360318	0.378487	0.396632	0.414709	0.432680	0.450508
Brasil	0.645907	0.659655	0.673012	0.685977	0.698549	0.710730
Chile	0.662036	0.675323	0.688218	0.700721	0.712832	0.724554
Colombia	0.451363	0.469002	0.486432	0.503623	0.520550	0.537189
Ecuador	0.569501	0.585162	0.600469	0.615411	0.629978	0.644163
Paraguay	0.455676	0.473268	0.490642	0.507771	0.524629	0.541196
Perú	0.349796	0.367960	0.386124	0.404246	0.422283	0.440199
Uruguay	0.899621	0.904211	0.908602	0.912802	0.916819	0.920659
Venezuela	0.428716	0.446577	0.464268	0.481758	0.499017	0.516018
Media	0.555786	0.570556	0.585092	0.599377	0.613397	0.627136

Cuando se toma en cuenta el efecto de la evolución de la eficiencia Bolivia, Colombia, Paraguay, Perú y Venezuela resultan con una eficiencia por debajo del promedio, siendo Perú el país más ineficiente.

5.2 Evaluación de la eficiencia mediante el análisis envolvente de datos

A continuación se presentan los resultados obtenidos y el análisis complementario de la eficiencia técnica de los niveles de electrificación de los diez países latinoamericanos, estimada mediante el modelo DEA-CCR orientada a insumo y tecnología de rendimientos constante a escala, usando la herramienta Abaco DEA. Los resultados para el modelo DEA-CCR de cada país latinoamericano, durante el periodo 2011, son mostrados en las tablas 6 y 7.

A primera vista es apreciable que Argentina, Chile, Ecuador, Paraguay, Uruguay y Venezuela resultaron ser países ineficientes, según el criterio de eficiencia de Farrell, su eficiencia es menor a uno. No obstante, una observación más detallada sobre el modelo CCR, específicamente sobre los valores de holgura mostrados en la tabla 7, permite afirmar que los países Bolivia, Brasil, Colombia y Perú son eficientes técnicamente según la condición de eficiencia de Pareto-

Kopmans, su eficiencia es igual a uno y sus valores de holgura son igual a cero. Sin embargo, para cada uno de los países ineficientes se determinan las coordenadas del punto de proyección sobre la frontera eficiente que lo convierten en eficiente.

Tabla 6. Estimación de la eficiencia mediante el modelo DEA-CCR insumo, período 2011.

País	Eficiencia	Parámetros de ponderación									
		λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}
Argentina	0,581	0,000	0,725	0,000	0,000	1,132	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Bolivia	1,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Brasil	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Chile	0,463	0,000	1,101	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,573	0,000	0,000
Colombia	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ecuador	0,727	0,000	1,218	0,000	0,000	0,096	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Paraguay	0,193	0,000	0,000	0,000	0,000	0,043	0,000	0,000	0,152	0,000	0,000
Perú	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000
Uruguay	0,434	0,000	0,622	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Venezuela	0,246	0,000	0,549	0,000	0,000	0,423	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 7: Valores de holgura modelo DEA-CCR período 2011.

País	Eficiencia	Holguras			
		H1	H2	H3	S1
Argentina	0,581	1877,302	0,000	0,000	0,000
Bolivia	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Brasil	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Chile	0,463	0,000	0,000	250,709	0,000
Colombia	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ecuador	0,727	778,854	0,000	0,000	0,000
Paraguay	0,193	0,000	2541,264	0,000	0,000
Perú	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Uruguay	0,434	70,022	0,000	832,713	0,000
Venezuela	0,246	2365,355	0,000	0,000	0,000

Este punto de proyección se obtiene a partir de la combinación lineal de los valores observados y el valor de las intensidades de los países perteneciente a su conjunto de referencia (dado por el valor de sus intensidades mayor a cero). Por ejemplo, para Venezuela, las coordenadas de su punto de proyección sobre la frontera eficiente resultan de la combinación lineal de los valores observados para los países Bolivia y Colombia en proporciones dadas por sus intensidades. Así, las coordenadas de proyección para Venezuela se obtienen de la siguiente manera:

Pérdidas de transmisión= $786*0.5488 + 7430*0.4225= 3570.58$ GWh

Producción de electricidad= $7222*0.5488 + 61822*0.4225= 30083,65$ GWh

Consumo per capital= $623*0.5488 + 1123*0.4225= 817,06$ kWh/hab

Las coordenadas del punto de proyección sobre la frontera eficiente para Venezuela representan los valores objetivos para ser eficiente, es decir, los niveles de insumo que lo convertirán en eficiente en caso de alcanzarlos. Así, los valores objetivos de Venezuela conforman su plan de producción objetivo para convertirlo en eficiente.

Venezuela, para llegar a ser eficiente, debe reducir sus pérdidas de transmisión a 3571 GWh y su consumo per cápita a 817 kWh/hab. Algo similar sucede con los demás países ineficientes. La tabla 8 muestra el plan de producción objetivo recomendado a cada país ineficiente para lograr ser eficiente.

Tabla 8: Plan de producción objetivo período 2011.

País	Valores observados				Valores objetivos			
	Pérdidas	Producción	Consumo	Clientes	Pérdidas	Producción	Consumo	Clientes
Argentina	18701	129555	2967	14200	8982	75230	1723	14200
Bolivia	786	7222	623	2138	786	7222	623	2138
Brasil	87524	531758	2438	70312	87524	531758	2438	70312
Chile	4687	65713	3568	5504	2170	30424	1401	5504
Colombia	7430	61822	1123	11173	7430	61822	1123	11173
Ecuador	3369	20266	1192	3679	1672	14743	867	3679
Paraguay	3433	57626	1228	1313	664	8601	237	1313
Perú	2277	39223	1248	5498	2277	39223	1248	5498
Uruguay	1287	10344	2810	1330	489	4493	388	1330
Venezuela	24084	122059	3313	5894	3571	30084	816	5894

Según el modelo DEA-CCR el plan de producción objetivo para hacer eficiente el uso de la energía eléctrica en Venezuela consiste en reducir las pérdidas de transmisión y el consumo per capital a 3571 GWh y 817 kWh/hab, respectivamente.

Finalmente, para determinar la tecnología de los rendimientos a escala con la que opera cada uno de los países analizados se debe calcular la sumatoria de sus intensidades. Así, para Paraguay, Uruguay y Venezuela, todos ellos operan para bajo rendimientos crecientes a escala (sumatoria de sus intensidades menor a uno); en tanto que los países Bolivia, Brasil, Colombia y Perú lo

hacen bajo rendimientos constantes a escala (sumatoria de sus intensidades igual a uno). Argentina, Chile y Ecuador operan bajo rendimientos decrecientes a escala (sumatoria de sus intensidades mayor a uno).

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una forma de medir y comparar la eficiencia de los niveles de electrificación de varios países latinoamericanos, mediante un análisis combinado de fronteras estocásticas y análisis envolvente de datos, con base al número de clientes servidos, longitud de líneas, potencia instalada, pérdidas de transmisión, consumo per capital y producción de electricidad. Esta herramienta de análisis proporciona un enfoque sencillo para analizar la crisis eléctrica venezolana desde el punto de vista de la infraestructura del sistema eléctrico y el uso eficiente de la energía eléctrica.

La medida de la eficiencia estimada mediante el análisis de frontera estocástica permitió jerarquizar la eficiencia técnica del nivel de electrificación de los países estudiados. En los resultados se destacan los países Argentina, Bolivia, Brasil, Ecuador, Paraguay y Uruguay con una medida de la eficiencia por encima del promedio calculado. Venezuela con un alto nivel de electrificación posee la medida de eficiencia relativa más baja.

Mediante el modelo DEA-CCR orientado a los insumos se pudo reproducir parte de la situación actual del sistema eléctrico venezolano, caracterizado por un alto consumo per capital y un elevado valor de las pérdidas de transmisión. En los resultados del DEA se destaca, para Venezuela, un uso ineficiente de la energía eléctrica y se elabora un plan de producción objetivo para alcanzar la eficiencia mediante la reducción de las pérdidas de transmisión y el consumo per capital.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Farrell, M.J. The Measurement of Productive Efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society*, VOL. 3, No. 120. Pp: 253-90.
- [2] Meeusen, W. and van den Broeck, J. Efficiency Estimation from Cobb-Douglas Production Functions With Composed Error. *International Economic Review*. No. 32, 1977. Pp: 715-723.
- [3] Aigner, D. J., Lovell, C. A. K., and Schmidt, P. Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models. *Journal of Econometrics*. No. 5, 1977. Pp: 21-38.

- [4] Batesse, G. E. and Coelli, T. J. Frontier Production Functions, Technical Efficiency and Panel Data: With Application to Paddy Farmers in India. *Journal Productivity Analysis*. No. 3, 1992. Pp: 153-169.
- [5] Charnes, A., Cooper, W. and Rhodes, E. Evaluating Program and Managerial Efficiency: An Application of Data Envelopment Analysis to Program Follow Through. *Management Science*. VOL. 27, No. 6, 1981. Pp: 668-697.
- [6] Charnes, A., Cooper, W. and Rhodes, E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units. *European Journal of Operational Research*. No. 2, 1978. Pp: 429-444.
- [7] Weyman-Jones, T. Problems of Yardstick Regulation in Electricity Distribution, In Bishop, Kay and Mayer. *The regulatory challenge*. Oxford University Press. 1992.
- [8] Hjalmarsson, L. and Veiderpass, A. Efficiency and Ownership in Swedish Electricity Retail Distribution. *Journal of Productivity Analysis*. No. 3, 1992.
- [9] Indicadores, base de datos. Banco Mundial. <http://datos.bancomundial.org/indicador>.
- [10] Anuario Estadístico del Sistema Eléctrico Nacional 2011. <http://www.mppee.gob.ve/anuario-estadistico/>.