

Análisis Comparativo de Ensayos de Fito-Remediación en Lodos de Lixiviado Aplicando Análisis Envoltante de Datos

Comparative Analysis of Phytoremediation Assays in Leach Sludge Applying Data Envelopment Analysis

DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.13.2.2017.07>

Artículo de investigación científica. Fecha de recepción: abril 15 de 2017. Fecha de aceptación: junio 17 de 2017.

Álvaro Chávez Porras 

Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.
alvaro.chavez@unimilitar.edu.co

Luis Felipe Pinzón Uribe 

Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.
luis.pinzon@unimilitar.edu.co

Yessica Liceth Velásquez Castiblanco

Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.
tmp.yessica.velasquez@unimilitar.edu.co

Para citar este artículo:

A. Chávez Porras, L. Pinzón Uribe y Y. Velásquez Castiblanco, "Análisis Comparativo de Ensayos de Fito-remediación en Lodos de Lixiviado Aplicando Análisis Envoltante de Datos," *INGE CUC*, vol. 13, no. 2, pp. 79-83, 2017 DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.13.2.2017.07>

Resumen

Introducción– El avance de las ciudades ha generado progresiva producción de residuos sólidos que requieren técnicas de manipulación y disposición que atiendan sus volúmenes, forjando la alternativa de manejo en rellenos sanitarios. En ellos, el líquido resultante de la degradación del material orgánico, el lixiviado, es procesado bajo tratamiento de lodos activados, formando el lodo de lixiviado, el cual debe someterse a mecanismos de degradación en el control de sus compuestos contaminantes.

Objetivo– En el presente estudio se tuvo como objetivo principal un análisis comparativo de ensayos de fito-remediación en los sustratos de lodos de lixiviados provenientes del Relleno Sanitario Doña Juana, RSDJ, Bogotá D.C, con tres especies vegetales y con datos analizados bajo la alternativa de análisis envoltante de datos.

Metodología– Se preparó el método de siembra de tres especies (rábano, acelga y rúcula), midiendo la reducción de metales pesados (MP) en un tiempo de cosecha de 62 días. Se empleó la herramienta de análisis envoltante de datos, teniendo en cuenta características fisicoquímicas y el porcentaje de reducción, que permiten mostrar la eficiencia del sistema fito-remediador.

Resultados– Se realiza una prueba de verificación del funcionamiento, comprobando los resultados con el software GAMS. Se pone en evidencia que es funcional, ya que permite establecer un sistema de análisis de los escenarios con el supuesto de 6 entradas y 4 salidas enfocadas a la remoción de MP.

Conclusiones– Se logró establecer que, a nivel de eficiencia de uso de recursos y generación de resultados, los escenarios de rábano y acelga se encuentran en la frontera Pareto eficiente; por su parte la rúcula, se consideró ineficiente. Se recomienda una redistribución de recursos, en un 33% como el escenario de rábano y un 50% como el escenario de acelga. Asimismo, se debe establecer un mayor número de entradas y considerar salidas indeseadas, y, así, realizar una comparación más acertada.

Palabras clave– Análisis Envoltante de Datos, Fito-remediación, Lodos de Lixiviado, Metales Pesados, Residuos Sólidos.

Abstract

Introduction– The advance of cities has created a progressive production of solid wastes that require the use of several manipulation techniques and disposition methods in order to attend waste volumes. The main disposition alternative is the use of landfills. The liquid resulting from the degradation of the organic material (leachate), is processed using an activated sludge treatment, producing leachate sludge. This element should undergo mechanisms of degradation in order to monitor its pollutants.

Objective– The aim of this article is to carry out a comparative analysis between phytoremediation tests on the leachate sludge substrates from the Doña Juana Sanitary Landfill, Bogotá D.C, with three vegetable species, and Data Envelopment Analysis (DEA) results.

Methodology– A sowing method for three vegetable species (radish, chard, and arugula) was set up, and the reduction of heavy metals was measured during a harvest period of 62 days. Data Envelopment Analysis was used and took into account physicochemical characteristics and the percentage of reduction, allowing to assess the efficiency of the phyto-remedial system.

Results– A performance verification test was carried out using GAMS software. The obtained results prove functionality since the system allows to establish an analysis system for the scenarios, considering six inputs and four outputs, focused on removal of heavy metals.

Conclusions– Considering the efficiency of resource usage, radish, and chard scenarios are in the Pareto front; furthermore, arugula results were considered inefficient. A redistribution of resources is strongly recommended, by 33% in the radish scenario and 50% in chard scenario. In order to make a more accurate comparison, establishing a greater number of entries and considering unwanted outputs is advised.

Keywords– Data Envelopment Analysis DEA, phytoremediation, leach sludge, heavy metals, solid waste.



I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico en las poblaciones ha incrementado la generación de cantidades considerables de residuos que deben ser dispuestos adecuadamente. Dichos residuos contaminantes, de diferente composición, han sido ubicados directamente en los suelos para su degradación. Los rellenos sanitarios son una alternativa para el manejo y disposición final de *residuos sólidos* (RS) en los diferentes asentamientos urbanos.

Durante su funcionamiento se generan subproductos, como lixiviados, los cuales requieren un tratamiento terciario antes del vertimiento en las corrientes de agua por sus contenidos de metales pesados (MP), considerados nocivos para los seres vivos y el medio ambiente.

Como sistema de tratamiento de estos lodos de lixiviado existe la fito-remediación, que consiste en el uso de plantas con el propósito de reducir agentes contaminantes en el ambiente, y más específicamente, tratamientos propuestos para MP en lodos de las plantas de aguas residuales, en los que se sugiere la posibilidad de hacer comparaciones acerca de la eficiencia en la degradación de dichos agentes [1]-[6].

A partir de esto, como objetivo, para la presente propuesta se plantea un escenario de análisis teniendo como método la utilización de plantas para la descontaminación y la reducción de la concentración de MP presentes en lodos de lixiviado provenientes de un relleno sanitario. El método utilizado es comparado con otros métodos ya evaluados en diferentes investigaciones. [7]-[10].

El proceso fue realizado mediante la técnica de siembra de tres especies vegetales: rábano (*Raphanus sativus*), acelga (*Beta vulgaris*) y rúcula (*Eruca sativa*).

De esta manera, se pretendió analizar la eficiencia de dichas especies en el sustrato suministrado.

El rábano es una especie vegetal de la familia de las crucíferas con tallo ramoso y numerosos pelos; la base del tallo se une con la raíz constituyendo un tubérculo globuloso. Es una planta de gran importancia por sus propiedades farmacéuticas y altos contenidos de vitaminas y minerales, asimismo, es un cultivo de rápido crecimiento y alta capacidad productiva.

La acelga es una hortaliza de hojas verdes y tallos muy engrosados que pertenece a la familia de las quenopodiáceas; tiene un ciclo corto de crecimiento, entre 60 y 80 días; la raíz presenta forma napiforme de color blanco amarillento, moderadamente profunda y fibrosa.

La rúcula es una hortaliza que pertenece a la familia de las coles o las crucíferas; rica en vitamina C y hierro.

El presente estudio propuso un análisis comparativo de los ensayos de fito-remediación con sustratos provenientes del Relleno Sanitario Doña Juana -RSDJ, Bogotá D.C., realizados con esas especies vegetales descritas para buscar reducciones de MP.

Se debe considerar que el relleno realiza un tratamiento a los lixiviados mediante un proceso físico-químico de coagulación-precipitación química combinado con una fase biológica de desnitrificación con aireación extendida [11]-[13].

II. MARCO REFERENCIAL

A. Fito-remediación

La fito-remediación es una tecnología de descontaminación a través de la capacidad que presentan algunas especies vegetales para crecer en ambientes contaminados. De esta forma, al estar en contacto con la sustancia contaminante puede generar efectos de remoción, inmovilización o biotransformación. Adicionalmente, puede aplicarse a sustratos sólidos, líquidos o gaseosos.

Entre sus características esta su bajo costo y el hecho de no requerir personal calificado. La diversidad de especies a ser empleadas es alta, siendo amigable con el ambiente, y es aplicado únicamente en la capa superficial del suelo. El tiempo requerido para tratar grandes extensiones de suelo y alta contaminación puede ser elevado. Las plantas, una vez se ha aplicado el tratamiento, deben tener un correcto manejo y disposición final, considerando que presentan alta concentración de contaminantes [14].

En el proceso de fito-remediación se llevan a cabo tres fases: absorción, excreción y desintoxicación. La absorción de contaminantes a través de las raíces, posteriormente excretados por las hojas; y finalmente, la desintoxicación, realizada por medio de la mineralización [15].

B. Análisis Envolvente de Datos

El Análisis Envolvente de Datos (DEA), por sus siglas en inglés, también conocido como el análisis de frontera, hace relación a una metodología matemática, la cual determina la eficiencia de unidades productivas (DMU), considerando que hacen uso de recursos o entradas para generar productos o salidas. De esta forma, es posible establecer diferencias de desempeño entre estas unidades.

En esta técnica se reconoce la aplicación de dos modelos genéricos, *Constant Return to Scale* (CRS) y *Variable Return to Scale* (VRS).

En el primer escenario, variaciones en las entradas generan alteraciones proporcionales en las salidas; por lo que se esperan retornos constantes a escala. Caso contrario ocurre con el VRS, en el cual no existe proporcionalidad entre las variaciones de entradas y salidas [16].

Sus ventajas principales se centran en el valor único de eficiencia para cada una de las unidades. La relación matemática entre las entradas y las salidas puede ser desconocida, permitiendo así hacer inclusiones simultáneas de estas dos variables y de unidades de medida diferentes en la determinación de la eficiencia.

Sin embargo, al ser un análisis determinista, no considera la presencia de posibles errores en la información utilizada [17].

Dentro de este análisis es posible determinar un “Conjunto de Pareto” o “Frontera de Pareto” en el conjunto de alternativas que satisfacen la condición de optimalidad para un objetivo específico sin afectar otro definido de forma conjunta.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó con el objetivo de realizar un análisis comparativo de ensayos de fito-remediación de sustratos provenientes del Relleno Sanitario Doña Juana –RSDJ, Bogotá D.C.

Se incluyeron tres especies vegetales: rábano (*Raphanus sativus*), acelga (*Beta vulgaris*) y rúcula (*Eruca sativa*). De esta manera, se buscó una alternativa de análisis envolvente de datos.

El modelo se estableció a partir de datos obtenidos como parte de un proyecto de la Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, sede Campus Cajicá, en diferentes reactores piloto de prueba.

El análisis comparativo se basó en la evaluación del proceso de fito-remediación elaborado para la reducción de MP a través de las tres especies mencionadas (rábano, acelga y rúcula).

La medición de los MP se realizó a través de la técnica de la espectrofotometría en un equipo de absorción atómica, atendiendo los protocolos de muestreo establecidos en el *Standard Methods* [18].

Para la especie *rábano* se sembraron en orificios 384 semillas en total, con una distancia entre ellos de 5 cm hacia los lados y con tres semillas por cada uno de ellos.

Para la especie *acelga* se sembraron 170 semillas en total en hileras de orificios con una distancia entre ellas de 15 cm y 5 cm entre orificios y con cinco semillas por cada uno de ellos.

Para la especie *rúcula* se sembraron 255 semillas en total en hileras de orificios con una distancia entre ellas de 25 cm y 5 cm entre orificios y con cinco semillas por cada uno de ellos.

Las tres camas de siembra recibieron como sustrato el lodo de lixiviado, con un peso total de 402 kg.

El tiempo total del proceso de cosecha fue de 62 días desde el momento de la siembra de las semillas de la especie hasta la cosecha de las plántulas. Posteriormente, se caracterizó nuevamente el sustrato y, de igual forma, se realizó una caracterización físico-química de las plantas.

A partir de la información previamente establecida, se aplicó el modelo de Análisis Envolvente de Datos (CRS) orientado a entradas, definiendo como DMU a cada escenario de fito-remediación.

De la misma manera, se definieron las entradas y salidas a analizar, presentadas en la Tabla 1.

Teniendo en cuenta las condiciones previamente descritas, se presenta la descripción de la construcción del modelo de comparación.

A continuación, se presenta la primera sección del modelo correspondiente a CRS orientado a entradas, donde para cada DMU se definen las condiciones de función, objetivo y restricciones.

El método DEA se emplea para determinar eficiencia en la producción; este estudio tiene aplicabilidad en la eficiencia, ejercida por las especies vegetales, produciendo un lodo más limpio, es decir, un sustrato con menores concentraciones de contaminantes.

Consideraciones de la nomenclatura de los símbolos empleados en el modelo, incluyendo descripción de su interpretación matemática:

$\text{Min } \theta_{DMU_i}$: representa la eficiencia técnica para la especie n , $i = 1, 2, 3$ es el número de especie.

i : especie (rábano 1, acelga 2, rúcula 3)

λ_i : ponderadores por especie vegetal

Θ_{DMU_i} : es un escalar menor a uno que define la eficiencia técnica de la especie ($n = 1, 2$)

TABLA 1. ENTRADAS Y SALIDAS CONSIDERADAS EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DEA PARA FITO-REMEDIACIÓN.

ESCENARIOS	ENTRADAS						SALIDAS			
	Nº de semillas sembradas	Cantidad de lodo de lixiviado a tratar kg	Valor inicial de Cadmio (Cd) mg/kg	Valor inicial de Cromo (Cr) mg/kg	Valor inicial de Plomo (Pb) mg/kg	Valor inicial de Mercurio (Hg) ug/kg	% de Remoción Cadmio (Cd)	% de Remoción Cromo (Cr)	% de Remoción Plomo (Pb)	% de Remoción Mercurio (Hg)
DMU 1 (Rábano)	384	402	0,25	210	18,1	690	27	6	42	29
DMU 2 (Acelga)	170	402	0,25	210	18,1	690	18	4	31	18
DMU 3 (Rúcula)	255	402	0,25	210	18,1	690	12	4	20	16

Fuente: Autores

Ensayo 1 – Rábano

$$\text{Min } \theta_{DMU1}$$

s.a.

$$\begin{aligned} 384\lambda_1+170\lambda_2+255\lambda_3 &\leq 384*\theta_{DMU1} \\ 402\lambda_1+402\lambda_2+402\lambda_3 &\leq 402*\theta_{DMU1} \\ 0,25\lambda_1+0,25\lambda_2+0,25\lambda_3 &\leq 0,25*\theta_{DMU1} \\ 210\lambda_1+210\lambda_2+210\lambda_3 &\leq 210*\theta_{DMU1} \\ 18,1\lambda_1+18,1\lambda_2+18,1\lambda_3 &\leq 18,1*\theta_{DMU1} \\ 690\lambda_1+690\lambda_2+690\lambda_3 &\leq 690*\theta_{DMU1} \\ 27\lambda_1+18\lambda_2+12\lambda_3 &\geq 27 \quad 6\lambda_1+4\lambda_2+4\lambda_3 \geq 6 \\ 42\lambda_1+31\lambda_2+20\lambda_3 &\geq 42 \quad 29\lambda_1+18\lambda_2+16\lambda_3 \geq 29 \end{aligned}$$

Ensayo 2 – Acelga

$$\text{Min } \theta_{DMU2}$$

s.a.

$$\begin{aligned} 384\lambda_1+170\lambda_2+255\lambda_3 &\leq 170*\theta_{DMU2} \\ 402\lambda_1+402\lambda_2+402\lambda_3 &\leq 402*\theta_{DMU2} \\ 0,25\lambda_1+0,25\lambda_2+0,25\lambda_3 &\leq 0,25*\theta_{DMU2} \\ 210\lambda_1+210\lambda_2+210\lambda_3 &\leq 210*\theta_{DMU2} \\ 18,1\lambda_1+18,1\lambda_2+18,1\lambda_3 &\leq 18,1*\theta_{DMU2} \\ 690\lambda_1+690\lambda_2+690\lambda_3 &\leq 690*\theta_{DMU2} \\ 27\lambda_1+18\lambda_2+12\lambda_3 &\geq 18 \quad 6\lambda_1+4\lambda_2+4\lambda_3 \geq 4 \\ 42\lambda_1+31\lambda_2+20\lambda_3 &\geq 31 \quad 29\lambda_1+18\lambda_2+16\lambda_3 \geq 18 \end{aligned}$$

Ensayo 3 – Rúcula

$$\text{Min } \theta_{DMU3}$$

s.a.

$$\begin{aligned} 384\lambda_1+170\lambda_2+255\lambda_3 &\leq 255*\theta_{DMU3} \\ 402\lambda_1+402\lambda_2+402\lambda_3 &\leq 402*\theta_{DMU3} \\ 0,25\lambda_1+0,25\lambda_2+0,25\lambda_3 &\leq 0,25*\theta_{DMU3} \\ 210\lambda_1+210\lambda_2+210\lambda_3 &\leq 210*\theta_{DMU3} \\ 18,1\lambda_1+18,1\lambda_2+18,1\lambda_3 &\leq 18,1*\theta_{DMU3} \\ 690\lambda_1+690\lambda_2+690\lambda_3 &\leq 690*\theta_{DMU3} \\ 27\lambda_1+18\lambda_2+12\lambda_3 &\geq 12 \quad 6\lambda_1+4\lambda_2+4\lambda_3 \geq 4 \\ 42\lambda_1+31\lambda_2+20\lambda_3 &\geq 20 \quad 29\lambda_1+18\lambda_2+16\lambda_3 \geq 16 \end{aligned}$$

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A partir del modelamiento de comparación planteado, se realiza una prueba de verificación del funcionamiento, comprobando los resultados con el software GAMS.

Tomando como base los parámetros de entradas y salidas, se realizó la ejecución del modelo en GAMS, cuyos resultados se pueden observar en la tabla 2.

TABLA 2. RESULTADOS VARIABLES DE DECISIÓN.

	Eficiencia	λ_1	λ_2	λ_3
DMU ₁	1,00	1,00	-	-
DMU ₂	1,00	-	1,00	-
DMU ₃	0,83	0,33	0,50	-

Fuente: Autores

Se pone en evidencia que el modelo CRS, para comparación de ensayos, es funcional, ya que permite establecer un sistema de análisis de los escenarios con el supuesto de 6 entradas y 4 salidas enfocadas a la remoción de MP.

Se logró establecer que, a nivel de eficiencia de uso de recursos y generación de resultados, los escenarios de rábano y acelga, se encuentran en la frontera Pareto eficiente. Por su parte el escenario de rúcula, se considera ineficiente respecto a los otros ensayos.

V. CONCLUSIONES

Se realizó un análisis comparativo de ensayos de fitorremediación de sustratos provenientes del Relleno Sanitario Doña Juana (RSDJ), Bogotá D.C., realizados con especies vegetales de rábano (*Raphanus sativus*), acelga (*Beta vulgaris*) y rúcula (*Eruca sativa*), buscando reducciones de metales pesados.

La propuesta planteó como herramienta el análisis de envolvente de datos, tipo CRS, orientado a entradas.

Se puso en evidencia que el modelo es funcional, permitiendo establecer un sistema de comparación de ensayos con el supuesto de 6 entradas y 4 salidas enfocadas a la remoción de MP.

Se estableció que, a nivel de eficiencia de uso de recursos y generación de resultados, los escenarios de rábano y acelga, se encuentran en la frontera Pareto eficiente, considerados como adecuados, principalmente de acuerdo al número de semillas ingresadas, respecto a los porcentajes de remoción obtenidos.

Por su parte, el escenario de rúcula se considera ineficiente respecto a los otros escenarios.

De acuerdo con los valores obtenidos para λ (tabla 2), considerando que la eficiencia es menor a 1, para la DMU3 se recomienda una redistribución de recursos, en un 33% como el escenario de rábano y un 50% como el escenario de acelga.

De la misma manera, se recomienda, para mejora del análisis en el futuro, establecer un mayor número de entradas y considerar salidas indeseadas del sistema, y así realizar una comparación más acertada.

VI. FINANCIACIÓN

Artículo de investigación científica derivado del proyecto de investigación INV ING 2098 titulado: “Procesos de fitorremediación para control de metales pesados presentes en lodos de lixiviados - Relleno Sanitario Doña Juana, Bogotá D.C.” y financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada. Fecha de inicio: 24 de febrero de 2016; fecha de finalización: 23 de febrero de 2017.

REFERENCIAS

- [1] M. N. V. Prasad and H. M. O. Freitas, “Metal hyperaccumulation in plants - Biodiversity prospecting for phytoremediation technology,” *Electronic Journal of Biotechnology*, Vol 6, No 3, 2003. <https://doi.org/10.2225/vol6-issue3-fulltext-6>
- [2] A. Núñez, Y. Vong, R. Ortega and E. Olgún, “Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones,” *Ciencia*, 2004. pp. 69–82. http://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_3/Fitorremediacion.pdf
- [3] M. S. Sánchez, “Contaminación por metales pesados en el botadero de basuras de Moravia en Medellín: transferencia de flora y fauna y evaluación del potencial fitorremediador de especies nativas e introducidas,” Tesis doctoral, Depart. Química, Fac. Ciencias, Programa de Posgrado, Pont. Univer. Javeriana, GIBUJ, 2010.
- [4] H. Gómez and G. Pinzón “Análisis de la mitigación del impacto ambiental en el lago del Parque La Florida por fitorremediación usando buchón de agua,” <http://repositorio.unimilitar.edu.co/8080/handle/10654/7129>
- [5] H. Ali, E. Khan and M. Anwar Sajad, “Phytoremediation of heavy metals. Concepts and applications,” *Chemosphere*, 91, 2013. pp. 869-881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- [6] L. Ziyang, W. Luochun, Z. Nanwen and Z. Youcai, “Marital recycling from renewable landfill and associated risks: A review,” *Chemosphere*, 2015, pp. 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.02.036>
- [7] A. Fernandes, M. Pacheco, L. Ciriaco and A. Lopes, “Review on the electrochemical processes for the treatment of sanitary landfill leachates: Present and future,” *Applied Catalysis B. Environmental*, 2015, pp. 183–200. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.03.052>
- [8] S. Iskander, B. Brazil, J. Novak and Z. He, “Resource recovery from landfill leachate using bioelectrochemical systems: Opportunities, challenges, and perspectives,” *Bioresource Technology*, 2016, pp. 347–354. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.051>
- [9] W. Liu, W. Cai, Z. Guo, L. Wang, C. Yang, and C. Varrone, “Microbial electrolysis contribution to anaerobic digestion of waste activated sludge, leading to accelerated methane production,” *Renewable Energy*, 2016, pp. 334–339. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.082>
- [10] B. Seshadri, N. Bolan, R. Thangarajan, U. Jena, K. Das, H. Wang and R. Naidu, “Biomass Energy from Revegetation of Landfill Sites,” *Bioremediation and Bioeconomy*, Chap. 5, 2016, pp. 99–109. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802830-8.00005-8>
- [11] D. Cristancho M, “Estimación del efecto del lixiviado del Relleno Sanitario Doña Juana sobre la calidad del agua del río Tunjuelo y su posible tratamiento en la PTAR Canoas,” Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [12] Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP), “Informe de gestión 2014”, Bogotá D.C., Colombia, UAESP, 2014.
- [13] Defensoría del Pueblo de Colombia, “Resolución No. 61, Situación actual del aprovechamiento de los residuos sólidos y la disposición final en el relleno sanitario Doña Juana en la ciudad de Bogotá D.C.,” 2014.
- [14] R. González, *Recuperación de suelos contaminados con metales utilizando especies vegetales – fitorremediación*, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2014.
- [15] V. Campos, *Fitorremediación de contaminantes persistentes: Una aproximación biotecnológica utilizando chopo como sistema modelo*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid, 2010.
- [16] J. Quintanilha da Silveira, J. C. Correia Baptista Soares de Mello, and L. Angulo-Meza, “Evaluación de la eficiencia de las compañías aéreas brasileñas a través de un modelo híbrido de análisis envolvente de datos (DEA) y programación lineal multiobjetivo,” *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.*, vol. 20, No. 3, pp. 331–342, Dec. 2012.
- [17] R. González, *Utilización del análisis envolvente de datos (DEA) en el desarrollo de una metodología para el establecimiento de costos eficientes de remuneración, en la administración, operación y mantenimiento de los sistemas de distribución eléctrica*, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., 2010.
- [18] Apha. “Standard Methods for examination of Water and Wastewater”. Editorial Board, 2012, pp 3-21.