

# EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO MASIVO DE BOGOTÁ\*

## ENERGY EFFICIENCY IN BOGOTA'S PUBLIC TRANSPORT

Ricardo Andrés Pulido Castillo\*\* | Andrés Felipe Acosta Zapata\*\*\* | María del Pilar Sánchez Muñoz\*\*\*\*

### RESUMEN

Para garantizar un desarrollo sostenible se debe alcanzar crecimiento económico, reducción de las desigualdades y preservación del medio ambiente; el uso eficiente de los recursos energéticos aporta en esta vía. Este documento tiene como objetivo analizar el uso de la energía en el sector de transporte público de la ciudad de Bogotá (TransMilenio y Sistema Integrado de Transporte Público, SITP) entre 2012 y 2015, a partir de la presencia o no de la *Paradoja de Jevons* (efecto rebote), teniendo en cuenta cambios tecnológicos, a nivel de motores, y una mejora en el servicio. La metodología utilizada consiste en determinar el efecto rebote por medio de un modelo Log-Log en segundas diferencias para

estimar la elasticidad de la eficiencia energética, el efecto renta y sustitución con respecto a cambios en el coeficiente del precio de la energía (West Texas Intermediate) a la luz de la teoría. Se concluye que existe una relación directa entre la eficiencia energética y el consumo de energía por parte de los sistemas de transporte público en la ciudad, razón por la cual, se verifica la existencia de la *Paradoja de Jevons* y la ineficacia de la política pública de promover el uso racional y eficiente de la energía

Palabras Clave: Energía, Transporte, Cambio tecnológico.

JEL Code: L91, N76, Q48

---

\* El artículo es el resultado del trabajo de monografía “Eficiencia energética en el sistema de transporte público masivo de Bogotá”, realizado por Ricardo Andrés Pulido y Andrés Felipe Acosta para optar al título de *Economista*. Este trabajo fue dirigido por María del Pilar Sánchez Muñoz.

\*\* Economista. Universidad de La Salle. Información de contacto: (+57) 320 4 15 37 57. Bogotá, Colombia. rapulido@outlook.es

\*\*\* Economista. Universidad de La Salle. Información de contacto: (+57) 310 2 48 47 89. Bogotá, Colombia. aacosta41@unisalle.edu.co

\*\*\*\* Candidata a Doctora en Desarrollo Sostenible, Magíster en Economía, Economista. Docente de la Facultad de Ciencias Contables, Económicas y Administrativas de la Universidad de Manizales y de la Escuela de Administración de la Universidad del Rosario. Investigadora del Grupo Economía y Desarrollo Humano de la Universidad de La Salle. Información de contacto: madpilarsanchez@gmail.com. (+57) 315 7 97 29 68.

Fecha de recepción: 31 de octubre de 2017

Fecha de aceptación: 17 de noviembre de 2017

## ABSTRACT

To guarantee sustainable development, an economic growth needs to be achieved, social inequalities must reduce, and the environment requires a balance for its preservation; so the efficient use of energetic resources can contribute to the attainment of all these prerequisites. This document aims to analyze the usage of the energy in Bogota's public transportation (TransMilenio and Sistema Integrado de Transporte Público, SITP). This study will be focused on analyzing the presence of the Jevons Paradox between the years 2012 and 2015, taking into account the technological changes in the motors of their vehicles, and an improvement of the service achieved due to these updates. The chosen methodology will be to determine the rebound effect through a Log-Log model on second differences, so as to estimate the elasticity of the energetic efficiency, the rent, and the substitution effect based on the changes in the energy's price coefficient West Texas Intermediate. As a conclusion, this document has proved that there is a direct relation between the energetic efficiency and the energy consumption done by Bogota's system of public transport. To sum up, this is how the existence of the Jevons Paradox is verified, and demonstrates a certain inefficacy of the public policy in the promotion of a rational use of energy.

Key words: Energy, Transport, Technological Change.

JEL Code: L91, N76, Q48

## INTRODUCCIÓN

Los cambios presentados en la prestación del sistema de transporte público masivo de Bogotá han tenido, entre otros objetivos, la búsqueda de la eficiencia energética, la cual permite mitigar los efectos ambientales causados por la contaminación emitida por los combustibles fósiles, sin afectar la movilidad.

Esta investigación se enfoca en el uso de los recursos energéticos en el sector de transporte público de la ciudad de Bogotá (TransMilenio y Sistema Integrado de Transporte Público, SITP). Para evaluar dicha utilización de recursos, se analiza la presencia o no de la *Paradoja de Jevons* o *efecto rebote*, teniendo en cuenta cambios tecnológicos, a nivel de motores, y un cambio a nivel de servicio con la entrada del SITP, estableciendo paradas para los buses de tipo zonal, la planeación de rutas y horarios, que supondrían no solo un servicio de más calidad, sino un uso más eficiente de los recursos energéticos.

Se buscó verificar la existencia de la *Paradoja de Jevons* en el sector de transporte público de Bogotá entre 2012 y 2015; para esto se realizó una caracterización del sector, utilizando variables como ingresos y demanda del sistema; precio del insumo, medido en West Texas Intermediate (WTI); cantidad de energía demanda para prestar el servicio, medida en toneladas equivalentes de petróleo (*tep*); y la intensidad energética, siendo ella la inversa de la eficiencia en el uso de combustible. De igual forma, se realizó un contraste de dicha intensidad con la demanda de insumos energéticos por los sistemas de transporte, encontrando los primeros vestigios de la existencia del *efecto rebote*.

Así mismo, por medio de un modelo Log-Log en segundas diferencias, se determinaron las elasticidades precio de la demanda y renta del combustible utilizado; las cuales explican el comportamiento del consumo del insumo energético, que a su vez, determinan la presencia del

*efecto rebote*, supuesto básico de esta investigación. Se empleó información suministrada por la Secretaría Distrital de Movilidad y TransMilenio S.A., para el periodo de estudio.

La investigación es relevante debido a que, en primer lugar, determina cómo es la utilización de los recursos energéticos dentro del marco del desarrollo sostenible; en segundo lugar, utiliza un modelo econométrico que permite calcular el ahorro del sistema durante el periodo de estudio; en tercer lugar, permite identificar qué tipo de bien es el combustible y; finalmente, da luces sobre la efectividad de la política pública guiada hacia el uso de recursos energéticos.

El análisis del *efecto rebote* se logró de tres formas diferentes; la primera, por medio de la relación entre la intensidad energética y el consumo de combustible, poniendo en evidencia la magnitud del efecto; la segunda, a través de un modelo que establece la relación de cantidad demandada de combustible usada para la prestación del servicio y sus determinantes, tales como el ingreso de los sistemas, el precio del combustible, entre otros, para poder estimar la elasticidad de eficiencia energética y; finalmente, a través del efecto renta y sustitución analizando el coeficiente del precio de la energía (WTI) a la luz de la teoría.

En un primer momento se presenta el contexto a partir del cual la eficiencia energética aporta al desarrollo sostenible y a la explicación de la *Paradoja de Jevons*; luego se presenta una caracterización de los sistemas de transporte públicos de Bogotá (TransMilenio y SITP) en el periodo 2012-2015, teniendo en cuenta los mercados externos, como el del combustible y sus impactos en el servicio; en un tercer momento, se presenta una revisión del *efecto rebote* en los sistemas anteriormente nombrados, el cual ofrece un análisis del efecto encontrado. Finalmente, se presentan algunas conclusiones y recomendaciones.

## UNA APROXIMACIÓN SOBRE EL DESARROLLO SOSTENIBLE EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

En los últimos años el enfoque de desarrollo sostenible que ha prevalecido es aquel que se caracteriza por analizar las actividades antrópicas en tres elementos fundamentales: económico, social y ambiental. En este sentido, desde el *Informe Brundtland* se ha hablado de un desarrollo “que satisface las necesidades de las presentes generaciones sin comprometer la habilidad de las futuras para satisfacer sus propias necesidades” (Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo, 1988, p. 24).

Recientemente, no solo se busca la satisfacción de la raza humana, también es importante la conservación y preservación de los recursos naturales de los cuales dispone la economía, sin afectar los rendimientos en el futuro y que los mismos puedan regenerarse para suplir las necesidades, esto como se puede intuir en la definición dada por Bojő, Måler & Unemo (1992), en la cual mencionan que no es dejar de usar, sino tener un uso programado sobre los recursos naturales.

Adicionalmente, desde la visión de la *economía ecológica* el equilibrio humano con lo ecológico es indispensable, es decir que tanto los recursos naturales, como el capital humano deben de ser sustentables para poder mantener un ritmo de crecimiento en equilibrio y que por consiguiente debe crear una sinergia entre los ecosistemas, culturas, e instituciones que son representaciones de la sociedad (CEPAL, 1991).

De acuerdo con Gudynas (2003) se define el desarrollo sustentable como la satisfacción de las necesidades humanas por medio de la alteración de la biósfera, utilizando todo tipo de recursos en pro de mejorar la calidad de vida de los seres humanos; y para que este sea sostenido, no debe observarse

como un problema netamente económico, sino debe trascender a lo ecológico y social.

Desde la mirada del desarrollo sostenible la eficiencia energética reduce los efectos negativos que diferentes procesos de producción pueden tener sobre el medio ambiente, por lo que uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se refiere a un uso responsable de este recurso. En este sentido, ante un incremento en la eficiencia de la energía, aumenta el nivel de ahorro y disminuye la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Intergovernmental Panel on Climate Change, s.f.), pero la paradoja presentada por Jevons en 1865 mostró un efecto que podría desmitificar este hecho.

Existe un vínculo entre el concepto de desarrollo sostenible y el consumo de energía, el cual se utiliza como medida del progreso social de una zona económica, pero es necesario que el uso de este recurso no exceda de una forma en la cual deteriore el medio ambiente (International Atomic Energy Agency, 2008).

De acuerdo con los Objetivos del Desarrollo Sostenible, las ciudades para el 2030 se enfrentan a concentrar el 80% de la población mundial. De esta forma se promueve el objetivo 11: *Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles*. Luego el reto que asumen debe ser visto entre otros desde la perspectiva del transporte público masivo, la capacidad de ser eficiente y al mismo tiempo sostenible. Sin embargo, dicho reto hace fundamental saber si las políticas de transporte público masivo y sus cambios tecnológicos han sido encaminados hacia el objetivo anteriormente nombrado.

Cabe resaltar, que tanto la Organización de Naciones Unidas en cuanto a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) y el Protocolo de Kyoto, no ofrecen soluciones a las cantidades de energía utilizadas por el transporte, siendo este el pionero en el consumo de combustibles derivados del petróleo, sino que

influyen de manera indirecta, ya que hablan de emisiones de gases contaminantes, pero no del consumo de combustibles; proponen simplemente el aumento de tecnologías que generen menos contaminantes, siendo consecuentes con la idea de desarrollo sostenible.

Se encuentra fundamental revisar los indicadores energéticos del desarrollo sostenible (Organización Internacional de Energía Atómica, 2008), ya que en él se encuentra uno de los principales intereses para el presente estudio. Se trata de las intensidades energéticas del transporte, el cual corresponde al uso de energía por unidad de carga en relación con los kilómetros transportados, o bien sea unidad de pasajero por kilómetro desplazado, sin embargo, existen definiciones alternativas, como, por ejemplo, el promedio total de combustible para todas las modalidades por pasajero en relación con los kilómetros recorridos.

Este indicador es importante puesto que el transporte es uno de los principales consumidores de energía, lo que hace que sea el principal generador de demanda de petróleo a nivel mundial. Además de esto, el transporte se relaciona con el desarrollo sostenible, en la medida en que este está al servicio del desarrollo económico y social por medio de la distribución de bienes y servicios y, finalmente, en movilidad personal, aunque no se puede dejar de lado el hecho de que él repercute en el agotamiento de los recursos, la contaminación del aire y el cambio climático.

La relación del indicador con la economía en su conjunto es que hace parte del conjunto de sectores y subsectores económicos, los cuales están conectados con la intensidad energética total de la economía, como una construcción del PIB, y a su vez, con indicadores de emisiones de gases efecto invernadero y emisiones contaminantes de la atmósfera.

## JEVONS Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Jevons (1865), se enfocó en el tema de la utilización de la energía teniendo en cuenta los cambios tecnológicos. Encontró que en Inglaterra se incrementó el consumo de carbón, luego de que James Watt introdujera en el mercado la máquina de vapor que funcionaba con este combustible. Este avance tecnológico hizo que, en efecto, el carbón fuera más eficiente en términos de costo, lo que finalmente ocasionó una gran masificación en diferentes industrias de dicha máquina.

En pocas palabras, ante mejoras de tipo tecnológico que disminuyeron los costos de los recursos, se vieron aumentos en el consumo total del mismo – intensidad energética–. Lo que se ideó con el fin de disminuir el consumo de un recurso en específico – eficiencia energética–, ocasionó el efecto contrario. Esto es lo que la literatura llama la “*Paradoja de Jevons*” o “*efecto rebote*”, que, aunque no sea una “paradoja” desde el punto de vista lógico, desde el económico sí, puesto que la intuición económica propone que, ante mejoras tecnológicas, se permite usar menos cantidad de recursos para el mismo fin.

El análisis de la *Paradoja de Jevons* tiene dos componentes: micro y macro. El primero se realiza revisando las elasticidades y el *efecto rebote*; habrá un efecto indirecto si el cambio está expresado en el efecto renta, y será directo si la relación es consecuencia de la sustitución entre la energía y otros insumos que se usan en la producción; esto genera más utilización del recurso al momento en que el productor plantee que es más eficiente el uso la energía y decida hacer la sustitución de otros factores por esta última, y el *efecto rebote* total será por consiguiente la suma del *efecto rebote* directo o indirecto (UK Energy Research Centre, 2007).

En el componente macro, uno de los efectos sería por precios y el otro por crecimiento, el primero se da cuando a raíz de la eficiencia energética se espera que su demanda disminuya, sin embargo, aumenta por el aumento en la oferta de energía (la cual se considera inelástica), incentiva una mayor demanda (elástica) de este insumo (Gillingham, Rapson & Wagner, 2014). El efecto por crecimiento está explicado por la relación de mayor eficiencia energética generando un efecto sustitución en otros factores de producción en la economía (*Backfire*), trayendo como resultado en el largo plazo mayores niveles de crecimiento económico, y a su vez un incremento de la demanda energética, explicado por los incrementos de productividad por este factor (Gillingham, Rapson & Wagner, 2014).

Para verificar la existencia del *efecto rebote* en el sector de transporte público de la ciudad de Bogotá entre 2012 y 2015, en este trabajo se utiliza la definición general usada en el cual la intensidad energética (ecuación 1) es la relación que existe en el cociente del consumo de energía utilizado y la proporción del PIB que lo utiliza, y al mismo tiempo, la eficiencia energética, es la misma proporción del PIB, pero esta se estima en una medida de energía, que es tomada como media tonelada equivalente de petróleo (tep), la cual corresponde a la energía liberada por la combustión de una tonelada de petróleo (por definición de la Agencia Internacional de la Energía (s.f.), equivale a 107 Kcal). La conversión de unidades habituales a *tep* se hace sobre la base de los poderes caloríficos inferiores de cada uno de los combustibles considerados (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, s.f.):

$$I_e = \frac{PIB}{Q_e}$$

## INSTITUCIONES DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN COLOMBIA

En Colombia, como estándar, se ha planteado la necesidad de seguir el camino hacia un desarrollo sostenible, para ello desde el 2001 se ha emprendido la tarea de mejorar los sistemas en los cuales deben estar enfocadas las políticas públicas de la Nación en torno a los objetivos de desarrollo.

La Resolución 180609 del 2006, orienta las acciones hacia el uso eficiente de la energía y promueve formas alternativas de energía como los Biocombustibles; el Decreto 477 del 2012 plantea que el SITP debe asumir los objetivos basados en energías más limpias basándose en emisiones cero o bajas en ruta, además de la reconversión de los buses que venían haciendo recorridos.

Ahora bien, Bogotá debe ser consecuente con los propósitos nacionales e internacionales que promueven los aumentos en bienestar y la idea de un desarrollo sostenible, de cara al COP21, para reducir los efectos del cambio climático y poder lograr la meta mundial de disminuir 2°C la temperatura global, produciendo menores cantidades de gases efecto invernadero (GEI), los cuales son

claramente generados en gran medida por el sector de transporte, por esta razón se deben evaluar las políticas implantadas que generaron cambios en la movilidad bogotana desde los estadios anteriormente nombrados.

## COMPOSICIÓN DE LA FLOTA DE TRANSMILENIO Y SITP

Los operadores de TransMilenio por el Decreto 477 del 2012 están obligados a mejorar sus buses para la emisión de cero contaminantes, por esto la tecnología de los buses ha tenido cambios para poder cumplir con la legislación, los cuales se han visto en la incorporación de buses que intentan mitigar el efecto contaminante de la gasolina con la adopción de motores que reducen el consumo de combustible, como los adoptados en la Avenida Séptima. Según la tipología presentada por TransMilenio son buses híbridos; acordes a las características de las zonas en las cuales transitan, al número de pasajeros, velocidad máxima permitida, y contaminación producida, como se observa en la tabla 1, que especifica los diferentes buses que componen el sistema.

**Tabla 1. Tipología Buses**

Sistema	Tipo de bus	Nº pasajeros	Nº de cuerpos (vagones)	Motor	Nº puertas
SITP y TransMilenio	Padrón (SITP y TransMilenio)	80-120	1	Diesel Gas	3
SITP	Convencional	40-50	1	Diesel Gas	2
SITP	Microbús	19	1	Diesel Gas	1
TransMilenio	Articulado	160	2	Diesel Gas	3
TransMilenio	Biarticulado	250	3	Diesel Gas	4
TransMilenio	Hibrido	80	1	Diesel- Eléctrico	3

Fuente: elaboración propia a partir de TransMilenio S.A (2014)

El tipo de flota que se maneja en el SITP se compone de tres tipos de vehículos: bus de 80 pasajeros, busetón (50 pasajeros), buseta (40 pasajeros) y microbús (19 pasajeros), los dos primeros tipos también suelen ser conocidos como padrón y convencional, respectivamente. Los tres tipos de buses cuentan con motores que funcionan con diésel o gas y la velocidad que pueden alcanzar con carga máxima es de 40 Km/h.

Dentro de las características más destacadas de la tipología de los buses, se encuentran que, en primer lugar, deben cumplir con la normatividad ambiental colombiana en temas de emisión de gases contaminantes y a su vez de ruido, en segundo lugar, los buses, sin importar el combustible que usen, deben alcanzar una velocidad de 40km/h en un tiempo inferior a 22 segundos con su carga máxima. Los buses propulsados con motores diésel deben tener una tecnología igual o superior a la exigida por la normatividad ambiental, aunque también pueden ser propulsados por gas natural comprimido con la tecnología de inyección electrónica o por sistemas de motorización eléctricos o híbridos.

Los articulados fueron los primeros en funcionar en el sistema y los que eran el símbolo de este hasta que se introdujeron en la autopista Norte, en el 2009, los buses Biarticulados, que eran buses con una mayor capacidad de pasajeros que lo que transportaba el articulado; para el 2013 se genera la última introducción de tecnología, que sería la flota Híbrida que empieza su funcionamiento en Usaquén, pero se utilizaría en flota hacia San Cristóbal Sur y rutas que empiezan en el Portal El Dorado.

## RENDIMIENTO DEL COMBUSTIBLE DE LA FLOTA

Aunque no es exacto, según los estudios contratados por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2010) no existe una fuente técnica, adicional a los múltiples tipos de vehículos que se utilizan del parque automotor; así que se analiza de acuerdo con encuestas a distintos actores del sector de transporte para así estandarizar los rendimientos por tipo de vehículos utilizados y poder estimar un valor para este indicador tal como lo muestra la tabla 2.

**Tabla 2. Rendimiento estimado parque automotor**

Tipología	Rendimiento	Medida
Bus menos de 21 pasajeros	24	Km/galón
Bus de 21 a 35 pasajeros	20	Km/galón
Bus de más de 35 pasajeros	12	Km/galón

Fuente: Unidad de Planeación Minero-Energética, 2010.

Tomando estos valores como referencia se puede identificar los rendimientos de los motores de los buses que están en el SITP cuyas referencias son las mismas que las que se relacionan en la tabla 2, y los alimentadores en el sistema Troncal que su capacidad es de 35 a 50 pasajeros. Para las demás tipologías, que son los padrones articulados, biarticulados e híbridos, se toma el estudio de Grütter (2015) respecto del rendimiento real de grandes flotas operacionales de transporte de pasajeros tal como lo muestra la tabla 3. Además, se puede visualizar que la adopción de buses híbridos en la troncal de TransMilenio aumento el rendimiento del combustible.

**Tabla 3. Rendimiento promedio del combustible vehículos de TransMilenio**

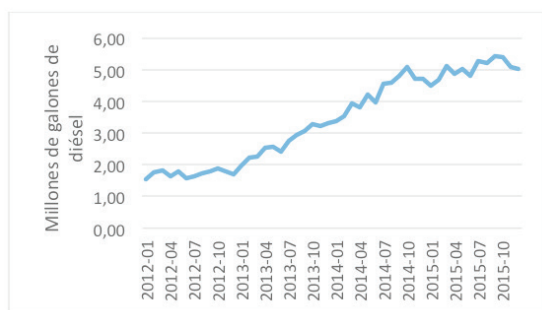
Tipología	Rendimiento Km/Gal
Alimentador (50)	12
Alimentador (80)	9.71
Articulado	9.71
Biarticulado	8.6
Padrón dual	12.62

Fuente: elaboración propia basada en Grütter (2015, p. 20)

## CONSUMO DE ENERGÍA DEL TRANSMILENIO Y SITP

El combustible demandado por parte del sistema de transporte público, entendido como TransMilenio y SITP, ha tenido básicamente dos momentos marcados por la entrada de este último. Con la puesta en marcha del sistema SITP, los buses convencionales, de empresas privadas, que prestaban el servicio y funcionaban con la lógica de maximizar beneficios, solo que el Distrito regulaba la tarifa, salen del mercado para ser reemplazados por el sistema de transporte público (SITP). Siendo esta la razón principal del aumento del consumo de combustible por parte de empresas públicas se hizo notable el cambio luego de la puesta en marcha del sistema, exactamente en enero de 2013.

**Figura 1. Consumo de combustible**



Fuente: elaboración propia a partir de TransMilenio S.A (2016)

Para diciembre del 2012 se estaban demandando 1.705.991,70 galones de combustible, mientras que para el mismo periodo de 2013 se llega a 3.315.994,89 galones (figura 1), por esto, se deben tener en cuenta los cambios tecnológicos que trajo consigo el sistema en cuestión de rendimiento de motores y la adaptación de un sistema de transporte con paraderos establecidos, el aumento en el consumo de combustible, teniendo como referencia los periodos anteriores el crecimiento fue del 94,37%, en el primer año de funcionamiento, mientras que para los otros dos años, fue de 42,02% y estable en los dos últimos años, evidenciando que el SITP se ha consolidado en la ciudad como un medio de transporte importante y con una oferta sostenida.

## INTENSIDAD ENERGÉTICA TRANSMILENIO - SITP

La inclusión de los sistemas TransMilenio y SITP en la ciudad trajo consigo cambios importantes en la forma del transporte en el país en general, siendo un modelo de movilidad ejemplo para otras ciudades. Uno de los principales cambios fue la introducción de flota que cumpliera con las normas de emisión de gases contaminantes, y esto vino con aumentos de la eficiencia del combustible, todo lo anterior pensado en un óptimo uso de los recursos utilizados.

Para TransMilenio esto se tradujo en la adopción de nuevos motores, con más fuerza, que pudieran transportar una cantidad de usuarios mayor, tal como se observó en un apartado anterior, o la introducción de motores híbridos (diesel-eléctricos) esto con el fin de mejorar el rendimiento del motor de la flota del sistema, y así utilizar menos combustible y reducir los niveles contaminantes, con el propósito de cumplir con la reglamentación impuesta en la Ley 201 de 2012 del uso de energías alternativas en el transporte.



La eficiencia en el uso de la energía en el transporte acorde a la literatura es el cociente entre los ingresos generados por el productor que utiliza la energía como insumo (y la cantidad de energía utilizada ( $Q_e$ ):

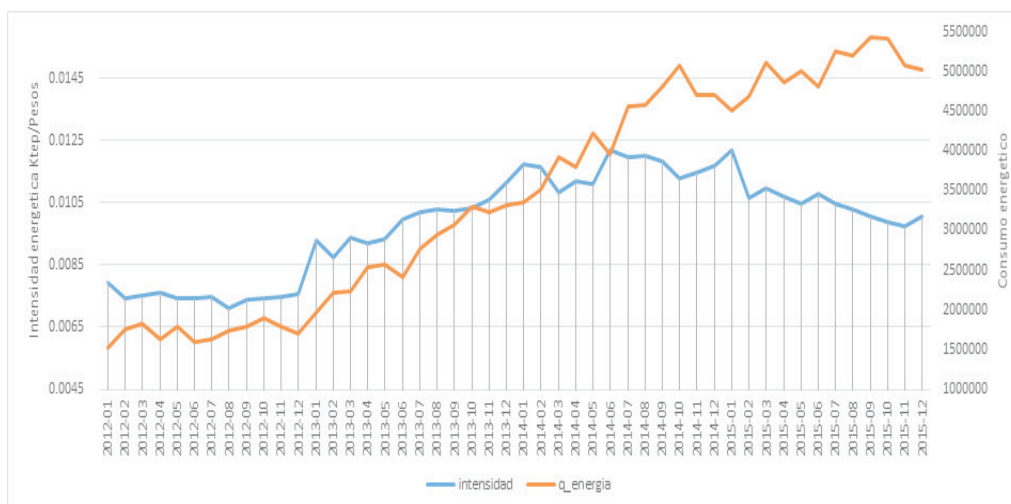
$$E_e = \frac{Y}{Q_e}$$

En la figura 2 se puede observar el *efecto rebote* dada la relación entre la intensidad energética y consumo de energía. Se observa que la relación entre eficiencia y la demanda de combustible tienen una relación directa, la cual se puede ver en la disminución de la intensidad, es decir que, ante aumento en el rendimiento de los motores, medido en km/g, muestra que se demandan cada vez más un mayor número de tep<sup>1</sup>, por lo tanto, analizando la curva de intensidad, cuando esta aumenta, la eficiencia disminuye y viceversa, entonces se puede observar que hasta junio de 2014 se encuentra una tendencia creciente en intensidad, luego de dicho periodo se tiene una tendencia decreciente.

Se pueden observar cuatro momentos clave en la figura 2, el primero comprende desde el inicio del horizonte temporal (enero de 2012) hasta octubre de 2013, que muestra tendencias crecientes en las dos curvas (intensidad energética y consumo de combustible), no obstante, las dos terminan igualándose. El segundo intervalo de tiempo es comprendido desde octubre de 2013 hasta mediados de febrero del 2014, en el cual el consumo que había igualado a la intensidad crece a una menor tasa y hace que siga por debajo.

A partir del tercer momento que va desde febrero de 2014-junio de 2014 la curva de consumo de combustible empieza a estar por encima de la de intensidad energética, sin embargo, la curva se devuelve, ya para el cuarto momento que comprende junio de 2014 hasta el final del horizonte temporal de la investigación, se puede ver que es el momento donde se ve el *efecto rebote* de forma clara, puesto que la intensidad disminuye, es decir, aumenta la eficiencia energética, y al mismo tiempo aumenta el consumo de combustible, lo que hace del efecto algo paradójico según Jevons.

**Figura 2. Demanda E intensidad Energética**



Fuente: elaboración propia a partir de TransMilenio S.A (2016).

<sup>1</sup> Tonelada equivalente de petróleo. Medida de conversión (1 galón de combustible = 0,003147033534).

## MODELACIÓN DE LA DEMANDA DE COMBUSTIBLE

Para modelar el *efecto rebote* caracterizado con anterioridad en los sistemas públicos TransMilenio y SITP, es necesario el ajuste de una serie de variables que describan el comportamiento de la cantidad de energía, toneladas equivalentes de petróleo (*Tep*), demandada por el sector de transporte público de la ciudad de Bogotá. Además, dado que la relación de las variables es no lineal, se aplica una transformación logarítmica conocida como modelos Log-Log, los cuales cumplen los supuestos de los Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO); de igual forma, la función transformada permite, matemáticamente y de manera más clara, la estimación de las elasticidades de cada una de las variables por medio de la primera diferencia

Para poder determinar los diferentes efectos que tienen las variables mencionadas que afectan la demanda de combustible en el sector transporte público masivo de la ciudad de Bogotá, es necesario identificar los parámetros del modelo Log-Log:

$$d^2 \ln Q_e = \beta_0 + \beta_1 d \ln K + \beta_2 d \ln Y + \beta_3 d \ln P_{t-1} + \beta_4 d \ln Q_{e_{t-1}}$$

El modelo es consistente tanto de manera global, y sus estimadores sean estadísticamente significativos, para esto se realizó una aproximación con la primera diferencia de la demanda de la energía, que, aunque la prueba de significancia es válida, la energía rezagada no tiene significancia dentro del modelo, para lo cual se diferencié de nuevo la variable ya que la prueba de autocorrelación de la serie muestra que en las primeras 4 diferencias podría adecuarse el modelo.

Las variables que comprenden dicho modelo son  $Q_e$ , tomada como la demanda de diésel por parte de ambos sistemas de transporte;  $P_e$  tomado como el West Texas Intermediate (WTI) real;  $K$  siendo el rendimiento de la flota de TransMilenio y SITP, esta

variable fue construida a partir de la flota de ambos sistemas y sus diversas tipologías, elementos que se tomaron como la multiplicación de los vehículos por tipología por su respectivo rendimiento en el motor; para finalizar, es la suma de los ingresos operacionales de ambos sistemas, la cual se tomó como el producto entre el número de pasajeros por la tarifa en cada periodo de tiempo.

Se puede observar que con la entrada de SITP en el 2013, el rendimiento de la flota ( $K$ ) ha tenido incrementos, siendo explicado a través de la tipología de los motores de este, al estar diseñados para transportar menos carga alcanzan recorrer mayor número de kilómetros con su capacidad máxima por galón de combustible consumido.

Ahora bien, en el modelo se aplican las variables rezagadas de la variable dependiente ( $Q_{E_{t-1}}$ ) y del WTI real ( $P_{E_{t-1}}$ ). En el caso de la primera variable, es claro que el consumo de *tep* en un periodo anterior representa una dependencia directa en el consumo en el periodo actual, debido a los stocks que manejan las empresas del insumo directo para la prestación del servicio. Para el caso del rezago del WTI real, se puede observar que el precio de dicho insumo tiene un impacto importante en la demanda de combustible un mes después en la economía colombiana, acorde a lo planteado por el Banco de la República (2012).

Para la correcta modelación de las series se verifica que ninguna variable tenga problemas de estacionalidad; para comprobar esto se aplica la Prueba Dickey-Fuller de Raíz Unitaria. Con la prueba lo que se puede observar es que todas las variables salvo la flota con la opción del término constante y el ingreso en la rutina de tendencia tienen raíz unitaria ya que en valor absoluto la prueba estadística es menor en todos los niveles de significancia y su  $P$ -valor muestra que se acepta la hipótesis de raíz unitaria en las series. Para solucionar esto se adecua la ecuación planteada por González (2009, p. 15) que se condiciona con las diferencias de las variables para desestacionalizarlas.

Con lo anterior se ve que se rechazan las hipótesis nulas en todos los niveles de presencia de raíz unitaria con lo cual se han desestacionalizado las series, y ya es posible realizar el cálculo de la regresión y de las pruebas globales.

Con la regresión mostrada en la tabla 4 se ajusta el modelo ya que todos los p- valores son menores al 5% exceptuando la constante, que no es significativo en el modelo. Con la segunda diferencia de la variable exógena el modelo explica el comportamiento de la demanda Energética, ya que el modelo se ajusta en su coeficiente de bondad, y los coeficientes son significativos y explican el modelo<sup>2</sup> que se presenta a continuación.

**Tabla 4. Regresión lineal segunda Diferencia Q\_1**

Variables	Coefficientes	p-valor
$d\ln K$	0.0998	(0.0000)
$d\ln Y$	0.6383	(0.0000)
$d\ln P_{E_{t-1}}$	0.1550	(0.016)
$d\ln Q_{E_{t-1}}$	-1.0877	(0.0000)
Constante	0.0059	(0.222)
Observaciones	46	
R-cuadrado	0.9503	
Prob >f	0.00000	

Fuente: Elaboración propia

2 Como los resultados de las pruebas apoyan la hipótesis nula de existencia de normalidad en los errores y en los residuos (p-valor > 5%) se confirma que estos se distribuyen normalmente y el modelo está bien determinado desde el supuesto. Al verificar si existe homocedasticidad, lo que se refiere a la varianza de los errores del modelo, el cual significa que, si la varianza en los coeficientes de las variables es constante el de los errores también, para comprobar esta propiedad se utilizó el Test Breusch-Pagan en donde sus resultados son favorables con un p valor del 20%. Para comprobar la hipótesis nula de la no presencia del fenómeno de correlación serial se utiliza el estadístico Durbin-Watson. El resultado de este es 2.215978, con lo que se evaluará según los criterios de rechazo; lo observado con respecto del estadístico es que se ubica dentro del punto Du Y el 4-Du el estadístico arrojado en este caso cae en el criterio de rechazo, por lo cual no muestra evidencia de correlación serial entre las variables.

Para verificar que la hipótesis nula de existencia de colinealidad se hace la prueba del factor de inflación de la varianza el cual mide este ítem y ante un valor que sea igual a uno no existe colinealidad, pero si es mayor que este valor hasta 5 es moderada y si es mayor que 5 es severa. Verificando la prueba el resultado de 1.12 muestra que, aunque hay presencia de multicolinealidad, no es severa, y es relativamente baja y no genera problemas en el modelo.

## INTERPRETACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES ENDÓGENAS

Realizando un análisis de los coeficientes de las variables independientes, es importante recordar, como anteriormente se aclaró, que las variables están transformadas logarítmicamente y, son modeladas en primera diferencia; con lo cual se presentan los siguientes fenómenos:

En primer lugar, el coeficiente del ingreso ( $\beta_2$ ) indica el tipo de bien y a partir de esto se observa el comportamiento del combustible para los sistemas de transporte público respecto de la renta, se concluye, según el modelo que ante aumento en los ingresos en un 1%, aumentan la aceleración en el consumo de combustible en un 0,63%, luego el bien se comporta de manera normal y como el coeficiente está entre 0 y 1 se dice que es un bien de primera necesidad (Calvo, s.f.).

En segundo lugar, el coeficiente de la variable de WTI rezagada ( $\beta_3$ ), arroja un signo positivo, lo que obedece a un comportamiento irregular del mercado, ya que sigue la conducta de un bien Giffen; ante aumentos en un 1% en los precios, aumentan la aceleración del consumo de energía en 0,15%, que obedece a las expectativas sobre el mercado energético, por esta razón se incrementa el stock de combustible, debido a la posibilidad de un precio que posiblemente puede seguir en aumento.

Por otra parte, el coeficiente de la variable rezagada un periodo del consumo energético ( $\beta_4$ ) muestra una relación inversa con la variable dependiente, esto se debe a que, ante el aumento del consumo en el periodo inmediatamente anterior en 1%, se disminuye la aceleración en el consumo en el periodo  $t$  en 1,08%, siguiendo la lógica de mantener un stock del insumo.

Finalmente, el coeficiente del rendimiento de la flota, contemplado en la función como ( $\beta_1$ ), muestra que la variable tiene una relación directa con el consumo de combustible, siendo entendido como, ante aumentos en el rendimiento de la flota en un 1%, la aceleración en la demanda por combustible aumenta en 0,10%, lo que empieza a dar vestigios de la *Paradoja de Jevons*.

Para poder vislumbrar el *efecto rebote* del consumo energético en Transmilenio y SITP, es necesario tener claros los efectos que pueden producirlo, con ese fin Sorell (2007) analiza las diferentes causas que podrían producir dicho efecto en dos definiciones, en el cual las magnitudes de los ahorros de energía se puedan ver disminuidos dependiendo la aproximación que se utilice.

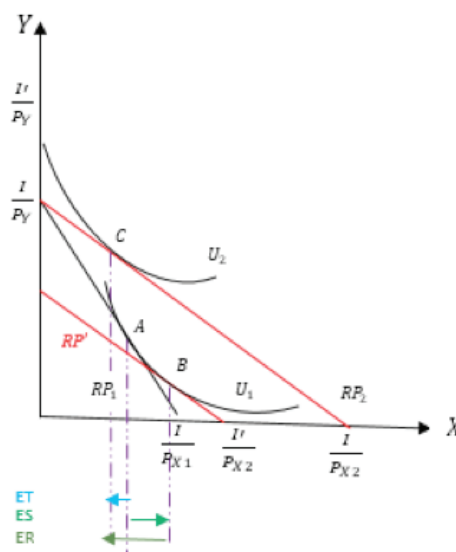
La primera definición habla del *efecto rebote* directo el cual se da cuando existe eficiencia energética, este hace que baje el precio del insumo, y como consecuencia se termina demandando más combustible; el segundo efecto, indirecto, se refiere a la eficiencia que genera la energía y disminuye el precio de la materia prima, como existe un efecto renta se puede adquirir más flota y para otros productores, como por ejemplo los dueños de buses convencionales en Bogotá, ellos adquirirían más energía porque su precio es menor, por lo cual el consumo se traslada a otros demandantes de este último recurso.

Para un productor, como es el caso de las empresas de transporte público, TransMilenio y SITP, la energía se utiliza como input. El efecto se puede descomponer

en sustitución e ingreso; el primero se trata del *trade-off* que toma la energía como sustituto de los otros inputs que participan de la producción; y el segundo son los incrementos en la producción que generan los ahorros obtenidos por el aumento de la eficiencia energética.

Para medir el *efecto rebote* se necesita medir la magnitud de los efectos, por esta razón se utiliza el coeficiente del WTI ( $\beta_3$ ), el cuál dentro del modelo planteado, está basado en la variación del precio; como el valor de este es mayor que 0, se infiere que es un bien Giffen, luego se asume que el efecto sustitución es menor que el efecto renta, por tal razón, hay un *efecto rebote* en donde se está utilizando una mayor proporción de la renta para incrementar la demanda del servicio energético, tal como se muestra el efecto en la figura 3.

Figura 3. Efecto renta y sustitución Bien Giffen



Fuente: Elaboración propia

La comprobación del *efecto rebote* se puede mostrar desde la figura 3 que muestra que ante un mayor nivel de renta existe una mayor utilización de la

energía, debido a que el efecto sustitución es menor que el efecto renta, lo que comprueba la existencia de que la mayor eficiencia de los motores del sistema, no conlleva a la compra de buses con mejor rendimiento, sino que a mayor uso de la energía; No obstante, para la determinación real del efecto se tiene que emplear una metodología explicada por González (2009) para revisar sí, aunque exista un *efecto rebote* haya ahorro o por el contrario su resultado es *backfire* ( $\eta_e(E) > 100\%$ ), con lo cual un aumento del rendimiento genera siempre mayores consumos de *tep* en los sistemas en estudio.

Para comprobar los efectos se toma la siguiente ecuación.

$$\eta_e(E) = -\eta_{P_E}(E) - 1$$

Donde el símbolo  $\eta_e$  representa la elasticidad de eficiencia energética;  $E$  es la demanda de energía y  $P_E$  presentada en el modelo resultante como  $\beta_3$  es el efecto del precio sobre el consumo de la energía; Aplicando la fórmula se obtiene un efecto es del 115,15%, y muestra es la proporción de consumo energético, con lo que no habría ahorro, con lo que se puede concluir que el tipo de rebote es del tipo Backfire, y habría sobreconsumo de energía.

Es necesario repensar los cambios tecnológicos como un cambio estructural en función del desarrollo sostenible. Además de esto, se pone en evidencia que los mismos, sin importar el momento del tiempo, pueden generar el *efecto rebote*, generando mayores niveles de consumo de factores que no reportan una utilidad a la sociedad en la coyuntura actual, tal como se dio en la revolución industrial con Jevons y, como se evidenció en la presente investigación, en el caso TransMilenio y SITP.

Claramente, la intensidad energética que está utilizando los sistemas de transporte público de Bogotá presenta una insostenibilidad en el tiempo, puesto que se está comprometiendo el bienestar de generaciones futuras, tanto en uso de combustible fósil, como en calidad del aire de la ciudad. Por ende,

el ritmo del crecimiento de los recursos naturales y el crecimiento humano están a diferentes magnitudes, luego la sinergia no es clara en el caso de la sociedad bogotana a la hora de pensar en un equilibrio entre ecosistemas, cultura e instituciones.

La revisión de la paradoja desde la Ley 697 del 2001 del Congreso de la República, que reglamenta sobre el uso racional de la energía, muestra que, a pesar de los esfuerzos de las administraciones en controlar su uso, el resultado de un 115.5% en el nivel de consumo de la energía que utiliza es mucho más que el ahorro que genera, con lo cual se muestra que la legislación en torno al uso intensivo del recurso no se ha cumplido, además de que muestra que genera un efecto rebote explosivo, es decir, del tipo *backfire*.

A pesar de la introducción de los nuevos motores híbridos en la flota de TransMilenio, y la introducción en el 2013 de los buses interzonales SITP, que el rendimiento de km/gal ha aumentado y que se pueden tener un mayor número de recorridos con el mismo combustible, el consumo energético sigue aumentando, por el *efecto rebote* que el sistema presenta.

## CONCLUSIONES

La eficiencia energética, para el caso de TransMilenio y SITP, en el horizonte temporal establecido, muestra una relación directa con el consumo de energía por parte de los sistemas de transporte público, razón por la cual, se verifica la existencia de la *Paradoja de Jevons*, es decir que, ante una mejora en la tecnología, en temas de rendimiento de motores, y en la forma de la prestación del servicio, se demandan una mayor cantidad de recursos energéticos, siendo esto una relación que a la luz de la intuición, no se evidencia de forma clara.

Dicho aumento en la utilización de recursos para la prestación del servicio, el cual no significa una

mejoría en la prestación del mismo, muestra que los sistemas de transporte nombrados anteriormente, parecen ir en contravía con los postulados del desarrollo sostenible, pues en efecto, se busca una mayor eficiencia en temas de energía que reporten un bienestar social mayor, pero frente a los resultados de la investigación, de manera concreta, se afirma que pese a las instituciones, no hay un incremento en el bienestar social dado que están aumentando los Gases Efecto Invernadero, por cuestiones de utilización elevada de combustible, sin embargo, ese no es el foco de la investigación.

En el momento donde se asocia la intensidad energética y el consumo de combustible, se muestra una tendencia constante en el cociente entre cantidad de energía e ingresos de los sistemas; no obstante, en los últimos periodos empieza a decrecer, al mismo tiempo que la curva de demanda de combustible sigue una tendencia creciente, es decir, que esta última mantiene una relación directa con los ingresos generados por parte de TransMilenio y SITP.

Teniendo en cuenta la Ley 697 de 2001 en la presente investigación, la cual promueve el uso racional y eficiente de la energía, además de la utilización de energías alternativas; se muestra que la política pública, no es acorde a lo que se ha venido tratando, pues esta no muestra aumentos del bienestar social ni el uso eficiente de combustible. Revisando los resultados del comportamiento de la demanda del servicio, es claro que la población ha venido adaptándose cada vez más a dichos sistemas, por otra parte, quedan pocas alternativas de movilidad dentro de la ciudad, luego el crecimiento exponencial de la demanda muestra, bien sea, una alta dependencia al servicio o una alta densidad poblacional explicada por el fenómeno migratorio a la ciudad de Bogotá.

La información que se utilizó fue suministrada por las empresas encargadas de cada zona de los sistemas, por lo que, en diversas ocasiones no fue clara y no existe un orden para los reportes que deben enviar a las entidades. Adicionalmente, no hay información sobre los diferentes tipos de combustible que manejan, ni unos precios establecidos de la flota vehicular operada por TransMilenio y SITP, para de esta forma poder establecer un análisis por medio de las funciones de producción y costos.

Finalmente, sería importante realizar este estudio en un horizonte temporal más amplio, teniendo la información desde antes de que entrara en funcionamiento el sistema TransMilenio. Se podría empezar a observar cómo ha sido el cambio de las variables analizadas en el presente trabajo, y si antes del principal cambio en la movilidad bogotana, se evidenciaba un *efecto rebote* en el sector de transporte; sin embargo, no se tiene claridad sobre la existencia de dicha información. Además, sería importante revisar los efectos que tienen los hallazgos de la investigación en la calidad del aire.

## BIBLIOGRAFÍA

Banco de la República (2012). *La nueva fórmula de la gasolina y su potencial impacto inflacionario en Colombia*. Bogotá: Borradores de economía.

Bojö, J., Mäler, K. G. & Unemo, L. (1992). *Environment and Development: An Economic Approach*. Kluwer Academic Publishers.

Calvo, J. (s.f.). *Lección 4: La demanda del consumidor*. Open Course Ware. En línea: [http://ocw.innova.uned.es/ocwuniversia/diplomado\\_en\\_ciencias\\_empresariales/microeconomia-i/pdf/l4demanda.pdf](http://ocw.innova.uned.es/ocwuniversia/diplomado_en_ciencias_empresariales/microeconomia-i/pdf/l4demanda.pdf)

CEPAL (1991). *El Desarrollo Sustentable: Transformación Productiva, Equidad y Medio Ambiente*. Santiago de Chile: CEPAL.

Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo (1988). *Comisión Brundtland*.

Gillingham, K., Rapson, D. & Wagner, G. (Noviembre de 2014). *The Rebound Effect and Energy Efficiency Policy*. Resources for the future. En línea: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiKpaSyj5zLAhUJ2B4KHfoOAZoQFggd-MAA&url=http%3A%2F%2Fwww.rff.org%2Ffiles%2Fsharepoint%2FWorkImages%2FDownload%2FRFF-DP-14-39.pdf&usg=AFQjCN-Hlx-t22QEQC2ZMSNfviffejttBhw&sig2=olyUAX-5MP1TqKfdM1BRbeg>

González, J. F. (2009). Eficiencia Energética y consumo de recursos en los hogares: la *paradoja de Jevons*. IV Encuentro de la Red de Economía Ecológica Española (p. 15). Santiago de Compostela: Ent Environment & Management.

Grütter, J. (2015). *Rendimiento Real de Buses Híbridos y eléctricos*. Reinach: Grütter Consulting AG.

Gudynas, E. (2003). *Ecología, Economía y Ética del Desarrollo Sostenible*. Uruguay: Coscorroba.

Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (s.f). *Glosario*. Toneladas equivalentes de petróleo (tep). En línea: [www.idae.es/index.php/re/menu.139/letra.T/mod/glosario/mem.listado](http://www.idae.es/index.php/re/menu.139/letra.T/mod/glosario/mem.listado)

Intergovernmental Panel on Climate Change. (s.f). *IPCC*. En línea: [www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg3/es/tessts-6-5.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/es/tessts-6-5.html)

International Atomic Energy Agency. (2008). *IAEA*. En línea: [www.pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1222s\\_web.pdf](http://www.pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1222s_web.pdf)

Jevons, W. S. (1865). *The Coal Question*. London: Macmillan and Co.

Mizobuchi, K. (2008). Rebound Effect of Passenger Vehicles: A Case of Japanese Household. *Diario Universidad Matsuyama*, 21.

Sanders, H. D. (1992). The Khazzoom-Brookes Postulate and Neoclassical Growth. *The Energy Journal*, 13(4), pp. 131-148.

Sorrell, S. (2007). *UKERC Review of Evidence for the Rebound Effect; Supplementary Note: Graphical illustrations of rebound effects*. Brighton: UK Energy Research Centre.

TRANSMILENIO S.A. (28 de 02 de 2014). *Manual de Operaciones del Componente Zonal SITP*. En línea: [https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj\\_oMW61LXRAhWHb-SYKHYbED3QQFggYMAA&url=http%3A%2F%2F190.26.219.91%2Fdescarga.php%3Ffile%3D-manualoperaciones.pdf&usg=AFQjCNF2ynje6P-SUI-FmTkrtx87Jh8ynwQ&sig2=JZwTtp4](https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj_oMW61LXRAhWHb-SYKHYbED3QQFggYMAA&url=http%3A%2F%2F190.26.219.91%2Fdescarga.php%3Ffile%3D-manualoperaciones.pdf&usg=AFQjCNF2ynje6P-SUI-FmTkrtx87Jh8ynwQ&sig2=JZwTtp4)

TransMilenio S.A. (05 de 2016). Flota Vinculada SITP. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.

TransMilenio S.A. (2016). Flota Vinculada Troncal. Bogotá, Cundinamarca, Colombia. Sistema Integrado de Transporte Público.

UK Energy Research Centre (Octubre de 2007). *The Rebound Effect: an assessment of the evidence for economy-wide*. En línea: [www.ukerc.ac.uk/programmes/technology-and-policy-assessment/the-rebound-effect-report.html](http://www.ukerc.ac.uk/programmes/technology-and-policy-assessment/the-rebound-effect-report.html)

Unidad de Planeación Minero-Energética (2010). *Caracterización energética del sector transporte de carga y pasajeros, urbano e interurbano en Colombia*. Bogotá DC: Econometría.