

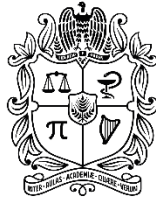


UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

APLICACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN PARA EVALUAR LA DIFUSIÓN DE TAXIS ELÉCTRICOS EN COLOMBIA

Juan Sebastián Gómez Herrera

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Ciencias de la computación y la decisión
Medellín, Colombia
2022



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

APPLICATION OF A SIMULATION MODEL TO EVALUATE THE DIFFUSION OF ELECTRIC TAXIS IN COLOMBIA

Juan Sebastián Gómez Herrera

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Ciencias de la computación y la decisión
Medellín, Colombia
2022

APLICACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN PARA EVALUAR LA DIFUSIÓN DE TAXIS ELÉCTRICOS EN COLOMBIA

Juan Sebastián Gómez Herrera

Trabajo Final de Maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Ingeniería de Sistemas

Director:

Ph.D. Carlos Jaime Franco Cardona

Codirectora:

Ph.D. Laura Andrea Ardila Franco

Línea de Investigación:

Modelado y Simulación

Grupo de Investigación:

Sistemas Energéticos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Ciencias de la computación y la decisión

Medellín, Colombia

2022

*Todos los triunfos nacen cuando nos
atrevernos a comenzar.*

Eugene Ware

*Nunca consideres el estudio como una
obligación, sino como una oportunidad para
penetrar en el bello y maravilloso mundo del
saber.*

Albert Einstein

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Juan Sebastián Gómez Herrera

2/07/2022

Agradecimientos

Primeramente, a Dios.

A mi familia, en especial a mis padres, por todo el soporte que me han brindado en mi formación profesional.

A mi prometida Laura, por todo su apoyo y comprensión.

A mis amigos, quienes siempre me ayudaron cuando los necesité.

A mis directores Carlos Jaime Franco Cardona y Laura Ardila Franco en quienes encontré siempre respuestas, comprensión y aliento.

Y a todos aquellos que en distintas ocasiones me ayudaron, me enseñaron y me animaron a ser mejor.

¡Gracias!

Resumen

La creciente preocupación por el cambio climático, las características del sector transporte de pasajeros y su evolución, han hecho que este sector sea considerado relevante en el análisis de estrategias de difusión de tecnologías limpias. Si bien esta problemática ha sido estudiada por la comunidad académica, poco se conoce sobre los procesos de difusión de estas tecnologías en los países en desarrollo como Colombia.

En este trabajo se presenta el uso de un modelo de simulación basado en agentes para el caso de la difusión de taxis eléctricos en Colombia. La metodología usada consta de: Definición del problema, Parametrización del modelo de simulación, Análisis de resultados, y Evaluación de las estrategias. El desarrollo de esta metodología permite comprender y comparar los resultados obtenidos para las diferentes estrategias evaluadas en este trabajo.

Los resultados de esta investigación están orientados al desarrollo de nuevo conocimiento, a un mayor entendimiento del fenómeno de difusión de taxis eléctricos y a la aplicación del modelo de simulación basado en agentes en el caso del mercado colombiano.

Palabras clave: Simulación basada en agentes; Difusión; Adopción; Vehículos eléctricos; Análisis de políticas.

Abstract

The growing concern about climate change, the characteristics of the passenger transport sector, and its evolution have made this sector considered relevant in the analysis of clean technology diffusion strategies. Although this problem has been studied by the academic community, little is known about the diffusion processes of these technologies in developing countries such as Colombia.

This paper presents the application of an agent-based simulation model for the case of the spread of electric taxis in Colombia. The methodology used consists of: Definition of the problem, Parameterization of the simulation model, Analysis of results, and Evaluation of the strategies. The development of this methodology allows us to understand and compare the results obtained for the different strategies evaluated in this work.

The results of this research are aimed at the development of new knowledge, a better understanding of the phenomenon of diffusion of electric taxis, and the application of the agent-based simulation model in the case of the Colombian market.

Keywords: agent-based simulation; Diffusion; Adoption; Electric vehicles; Policy analysis.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas	XIV
Introducción	1
1. Planteamiento del problema.....	3
1.1 El transporte y la contaminación.....	3
1.2 Panorama taxis en Colombia	4
1.3 Taxis eléctricos como solución y consideraciones.....	5
1.4 Taxis eléctricos en el mundo	5
1.5 Taxis eléctricos en Colombia.....	6
1.6 Regulación vehículos eléctricos en Colombia.....	7
1.7 Conclusiones del capítulo.....	9
2. Marco teórico.....	11
2.1 Difusión de innovaciones.....	11
2.2 Vehículos eléctricos vs vehículos convencionales.....	15
2.3 Conclusiones del capítulo.....	17
3. Revisión de literatura	18
3.1 Difusión de taxis en el mundo	18
3.1.1 Fuentes de información	18
3.1.2 Resultados obtenidos	19
3.2 Difusión de taxis en Colombia	22
3.2.1 Fuentes de información	22
3.2.2 Resultados obtenidos	23
3.3 Conclusiones del capítulo.....	25
4. Objetivos.....	26
4.1 Objetivo general	26
4.2 Objetivos específicos	26
4.3 Conclusiones del capítulo.....	26
5. Metodología.....	27
5.1 Fase I. Revisión del modelo de simulación y la encuesta.....	27
5.2 Fase II. Ingreso de datos al modelo de simulación	28
5.3 Fase III. Validación del modelo de simulación	28

5.4	Fase IV. Explotación del modelo	28
5.5	Conclusiones del capítulo	29
6.	Configuración del modelo de simulación	30
6.1	Descripción del modelo de simulación a usar	30
6.2	Descripción de la estructura de la red social y sus tipologías de interacción.....	31
6.3	Parametrización del modelo.....	32
6.4	Conclusiones del capítulo	34
7.	Análisis de resultados	35
7.1	Análisis de las condiciones iniciales del sistema	35
7.2	Revisión de los resultados del caso base	36
7.3	Identificación y selección de las estrategias a evaluar	38
7.4	Análisis de resultados de las estrategias implementadas.....	39
7.5	Conclusiones del capítulo	42
8.	Conclusiones y recomendaciones	44
8.1	Conclusiones Objetivo específico 1	44
8.2	Conclusiones Objetivo específico 2	45
8.3	Conclusiones Objetivo específico 3	45
8.4	Conclusiones Objetivo general.....	46
8.5	Recomendaciones y Trabajos Futuros.....	46

Lista de figuras

	Pág.
Figura 5-1. Esquema de la metodología de la investigación.	27
Figura 7-1. Trayectorias de difusión agregadas.	37
Figura 7-2. Trayectorias desagregadas según la localización de los agentes en la configuración de la red.	38

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1. Resumen de los artículos consultados y su metodología.....	12
Tabla 3-1. Investigaciones más relevantes en el mundo.....	19
Tabla 3-2. Investigaciones más relevantes en Colombia.	23
Tabla 6-1. Resumen de los valores de los parámetros de los agentes del modelo.	33
Tabla 7-1. Indicadores de la difusión para el caso base.	36
Tabla 7-2. Relación de los experimentos realizados para simular las estrategias seleccionadas.	39
Tabla 7-3. Medidas de los indicadores usados para describir el proceso de la difusión de taxis eléctricos en Colombia.....	39
Tabla 7-4. Medidas de los indicadores alternativos usados para describir el proceso de la difusión de taxis eléctricos en Colombia.....	40
Tabla 7-5. Medida del indicador ρ usado para describir la velocidad de la difusión de taxis eléctricos en Colombia.....	41
Tabla 7-6. Medidas de los indicadores usados para describir el proceso de la difusión de taxis eléctricos en Colombia con estrategia de SA.....	41
Tabla 7-7. Medidas de los indicadores alternativos usados para describir el proceso de la difusión de taxis eléctricos en Colombia con estrategia de SA.....	42
Tabla A-1. Preguntas usadas para parametrizar los componentes del modelo.....	49

Introducción

A pesar de que el análisis de la difusión ha sido estudiado por más de 40 años hace falta construir modelos aplicados a industrias específicas en países en desarrollo como Colombia. La importancia de estos modelos viene de la necesidad de analizar y evaluar políticas antes de implementarlas en ámbitos complejos y de alta incertidumbre, como lo es el de la difusión de innovaciones.

En la industria automotriz, el panorama energético para el transporte particular ofrece múltiples opciones tanto tradicionales como alternativas. Debido a los altos índices de contaminación ambiental del aire en Colombia y su relación con los vehículos (IDEAM, 2016), sumado con el compromiso adquirido por el estado colombiano de disminuir los índices de contaminación del aire (García Arbeláez et al., 2015). Se espera que las autoridades colombianas aumenten la cantidad y/o nivel de severidad de las restricciones ambientales aplicadas al transporte, generando una situación que afecta directamente la rentabilidad de las empresas dedicadas al transporte de pasajeros. En ese sentido los vehículos eléctricos se perfilan como una alternativa para vencer las restricciones ambientales pues presentan cero emisiones de gases que afectan la calidad del aire (Teixeira & Sodré, 2016) pero, estos vehículos actualmente presentan algunas barreras de entrada como el alto costo de compra, entre otros aspectos que desincentivan a las empresas de taxis y los conductores a adquirir este tipo de tecnología.

El principal alcance de este trabajo es la aplicación de un modelo de simulación que permita comprender mediante los diferentes aspectos y escenarios del mismo, como se da la difusión de los taxis eléctricos en Colombia y que posteriormente permita determinar las estrategias y/o políticas más adecuadas para estimular la entrada de este tipo de tecnologías.

Para lograr los objetivos propuestos, este documento se desarrolla como sigue. En el Capítulo 1 se expone la situación actual a partir del planteamiento del problema. En el Capítulo 2 se expone el marco teórico. En el Capítulo 3 se presenta la revisión de la literatura. En el Capítulo 4 se enuncian los objetivos del trabajo. En el Capítulo 5 presenta la metodología. En el Capítulo 6 se desarrolla la configuración del modelo. En el Capítulo 7 se muestra el análisis de los resultados del caso base y la evaluación de las estrategias de influencia social. Finalmente, en el Capítulo 8 se presentan las conclusiones del trabajo orientadas al logro de los objetivos planteados en el Capítulo 4.

1.Planteamiento del problema

En este capítulo se presenta el entorno del problema que se estudiará en esta investigación. En ese sentido se delimita y sustenta el contexto en el que se enmarca este trabajo.

1.1 El transporte y la contaminación

A nivel mundial, los países han reconocido la importancia de tomar medidas para reducir el impacto del cambio climático, por ende, los países miembros de las Naciones Unidas se han propuesto la meta mundial de evitar el aumento de la temperatura promedio global por encima de los 2°C al año 2030 (Naciones Unidas, 2021).

El gobierno colombiano se comprometió a reducir el 20% de las emisiones de CO₂ con relación a las proyectadas para el año 2030 (Garcia Arbelaez et al., 2015). Las autoridades saben que los vehículos de combustión interna son generadores de la mayoría de las emisiones de partículas contaminantes (Departamento Nacional de Planeación, 2018) y por eso se convierten en un campo a tener en consideración y buscar alternativas para mejorar la calidad del aire.

En América Latina y el Caribe el aumento de los niveles de contaminación atmosférica se han convertido en un problema de salud pública al ser causante de múltiples muertes prematuras, afectación de la salud de millones de personas y el alto costo económico al necesitar grandes cantidades de dinero en gastos para la atención a los problemas de salud generados por esta problemática.

En Colombia, la mayor concentración de vehículos se encuentra en los departamentos de Cundinamarca, incluido Bogotá,(38%), Antioquía(19.4%), Valle del Cauca(9.3%), Santanderes (7.1%) y Atlántico (4.8%) (ANDEMOS, 2021a) que coincide con las regiones

del país que más aportan al PIB (DANE, 2017) y donde más problemas de calidad del aire se presentan (IDEAM, 2016).

1.2 Panorama taxis en Colombia

Los medios de transporte de pasajeros (Buses, articulados y taxis) contribuyen en parte a la problemática de la contaminación, si bien los taxis son el menor contaminante de entre los medios existentes para dicho propósito, contribuyendo en un 1% de la contaminación de este tipo de medios (móviles), tan solo en Bogotá, los taxis representan una fuente de contaminación móvil con 270 toneladas de CO diarias (Rojas, 2019).

En ciudades como Medellín y Cali el panorama de la contaminación no es muy diferente al de Bogotá puesto que el comportamiento de la movilidad de los medios de transporte de pasajeros tiende a seguir el mismo patrón (Universidad Pontificia Bolivariana & Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2018).

Si bien se han hecho esfuerzos por mitigar el impacto ambiental que tienen los taxis con el uso de tecnologías como el gas, que suele reducir hasta el 90% del material particulado (Noticias Vital, 2019), estos no son suficientes para solventar la situación, puesto que el gas también es un combustible de origen fósil y su nivel de contaminación sigue siendo considerable.

En Colombia según datos de ANDEMOS (Asociación Nacional de Movilidad Sostenible), existen alrededor de 480000 taxis en el país en su mayoría con combustible a gasolina, seguido de vehículos a gas y eléctricos, estos vehículos están concentrados principalmente en Bogotá, Medellín, Cali y Barranquilla, que representan aproximadamente el 50% del parque automotor de este tipo.

Esta población de taxistas en Colombia se agrupa en su mayoría por empresas y/o asociaciones también llamadas cooperativas las cuales buscan y fomentan el bienestar, la ayuda mutua y el desarrollo de cada uno de sus miembros, existen entre 450 y 500 agrupaciones de este tipo en el país (El Colombiano, 2019). También existen algunos taxis que no se encuentran afiliados en este esquema, estos a pesar de no pertenecer a ninguna

de estas asociaciones, tienen cierta relación y comunicación con sus pares que si están asociados y entre ellos mismos.

1.3 Taxis eléctricos como solución y consideraciones

El transporte de pasajeros con taxis eléctricos es una forma viable de suplir esta necesidad, puesto que, vence las restricciones planteadas por las autoridades y permite reducir considerablemente las emisiones de gases nocivos para la calidad del aire y el calentamiento global (Teixeira & Sodré, 2016), pudiendo circular más tiempo que los taxis a combustión interna que emiten gases contaminantes por temas regulatorios.

Sin embargo, los taxis eléctricos en comparación con los de combustión tienen barreras de entrada como el alto costo de adquisición, largo tiempo de carga, baja densidad de energía, vida útil de las baterías incierta, la dificultad de integración con la red nacional, y la falta de infraestructura de carga para las baterías (Liu et al., 2017) que hace poco atractivo o al menos incierto para las empresas de taxis invertir en dicha tecnología.

Actualmente la red de carga de vehículos eléctricos a nivel mundial no es muy amplia, y el punto de recarga normalmente está ubicado en la propiedad de los dueños de los vehículos. Sin embargo, se ha venido observando que a medida que crece la cantidad de vehículos eléctricos se empiezan a instalar puntos de recarga en lugares públicos, tan solo en Colombia a hoy existen alrededor de 489 conexiones de carga en 209 ubicaciones distintas (Electromaps, 2022).

1.4 Taxis eléctricos en el mundo

A nivel mundial existen varios casos de aplicación del uso taxis eléctricos y renovación de flotas de taxis convencionales a esta tecnología, en ciudades como Estocolmo-Suiza, Seul-Korea del sur, Berlín-Alemania, Yakarta-Indonesia y varias ciudades chinas, estas tecnologías ya son una realidad y están contribuyendo positivamente a los niveles de contaminación del ambiente.

Estos estudios han arrojado resultados como: la reducción de emisiones de CO₂ de los taxis eléctricos alcanza el 40% en promedio en comparación con los taxis de combustión

interna (Deyang et al., 2016), los taxis eléctricos tienen un costo de propiedad similar o menor y una rentabilidad ligeramente mayor que la de los taxis convencionales (Hagman & Langbroek, 2019), en general los análisis de costo beneficio para la transición a taxis eléctricos, resulta en la viabilidad económica del despliegue de este tipo de tecnología (Kang & Lee, 2019).

Algunas ciudades como Florencia-Italia, han promulgado leyes en las que se exige el uso de vehículos eléctricos para el servicio de taxi (Scorrano et al., 2020), gobiernos como el chino, han establecido políticas de incentivos para la transición a vehículos eléctricos como una política viable para reducir el consumo de combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero (Zhou et al., 2021).

Además se han estudiado métodos alternativos a la carga de los vehículos para hacer frente a una de las principales debilidades de esta tecnología, como es el modelo intercambio de baterías con precios variables que se ha estudiado en China y del cual se concluye que este modelo de cambio de batería basado en una tarifa según el tiempo de uso, valle o pico, junto con una estrategia de carga descentralizada tiene mayor eficiencia energética y efectos económicos que pueden mejorar en 45371 Kg las emisiones de carbono y tiene beneficios por 48220 yuanes entre todas las partes interesadas (Liang & Zhang, 2018).

1.5 Taxis eléctricos en Colombia

En Colombia la cantidad de vehículos eléctricos es poca en comparación con los vehículos convencionales, tan solo en el 2020 se matricularon en Colombia alrededor de 6000 vehículos de este tipo, de los cuales 3 fueron taxis, frente a 70618 vehículos de combustión interna, 1493 como taxis (Asociación nacional de movilidad sostenible, 2022).

En lo corrido del 2021, se matricularon 17702 vehículos eléctricos y/o híbridos (Asociación nacional de movilidad sostenible, 2022), Si bien la cifra de matriculados representa el 194,6% de lo obtenido en el año anterior, aún hay mucho mercado por crecer para estar cerca a países más desarrollados en este tema.

En Bogotá en el año 2013 se llevó a cabo el piloto de taxis con motores de tracción eléctrica, alimentados por baterías internas recargables con el cual la Administración Distrital expresó la necesidad de desarrollar instrumentos y herramientas que sustenten y favorezcan la formulación de una política de movilidad eléctrica, dando pasos firmes en la modernización y adopción de tecnologías ecoeficientes en el transporte de Bogotá, para esta prueba piloto se pusieron en operación 50 taxis eléctricos de la compañía automotriz china BYD (Rodríguez Sarmiento, 2019).

En Medellín en el año 2019 se inició la ejecución del programa “Medellín se Mueve Mejor” de la Alcaldía de Medellín y EPM con la puesta en funcionamiento de los primeros taxis eléctricos de la ciudad de las empresas tax-belén y tax-individual con una autonomía de 400 kilómetros, aire acondicionado, caja automática, entre otros. La Alcaldía hizo entrega de un incentivo por valor aproximado de \$17.000.000 para personas que decidieron chatarrizar su viejo vehículo y adquirir uno eléctrico 100%, además que el vehículo contó con exención del 5% del IVA y este vehículo está exento de Pico y Placa (Revista Turbo, 2019).

En otras ciudades como Ibagué también se han puesto en marcha iniciativas de taxis eléctricos (Alcaldía Ibagué, 2020). Lo que evidencia que no sólo en las ciudades principales de Colombia se tienen iniciativas para alcanzar metas de movilidad sostenible.

1.6 Regulación vehículos eléctricos en Colombia

Es importante conocer como se ha dado el avance regulatorio del tema en el país, en Colombia existen normativas y leyes alrededor de los vehículos eléctricos, la regulación vigente se ha presentado de la siguiente manera:

Inicialmente se expide el decreto 677 de 2011 de la alcaldía mayor de Bogotá, que adopta medidas para incentivar el uso del vehículo eléctrico en el Distrito Capital, se autoriza una operación piloto. Los vehículos automotores de servicio particular y los de servicio público individual impulsados exclusivamente por energía eléctrica no serán destinatarios de las restricciones de circulación establecidas por el Decreto Distrital 660 de 2001, modificado por el Decreto Distrital 58 de 2003, y el Decreto Distrital 212 de 2003, modificado por los Decretos Distritales 180 y 198 de 2004 (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2011).

En el 2012 se modifica el decreto distrital 677 de 2011 que adopta medidas para incentivar el uso del vehículo eléctrico en el Distrito Capital. Asignar funciones en cabeza de las Secretaría de Ambiente y Movilidad para la realización del sorteo público en las empresas habilitadas para la prestación del servicio de transporte (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2012).

En ese mismo año sale la resolución 324 de 2012 de la secretaría distrital de movilidad que asigna los derechos de matrícula temporal por cinco (5) años de treinta y una (31) matrículas temporales de vehículos eléctricos de servicio público individual tipo taxi propulsados exclusivamente por energía eléctrica y de cero emisiones en ruta (Secretaría Distrital de Movilidad, 2012).

Al año siguiente se expide el decreto 376 de 2013 de la alcaldía mayor de Bogotá el cual extiende la temporalidad de la operación piloto de taxis eléctricos autorizada por los Decretos Distritales 677 de 2011 y 407 de 2012 (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2013).

En el 2015 se firma el acuerdo 619 en el concejo de Bogotá. La norma tiene por objeto el fomento del uso de vehículos eléctricos e híbridos en el Distrito Capital, para reducir los gases de efecto invernadero y mejorar la calidad del aire, para lo cual establece que la Administración Distrital diseñará una estrategia para promover la instalación de puntos de recarga para este tipo de vehículos y la adopción de las medidas necesarias para el desarrollo de esta medida (Concejo de Bogotá, 2015).

Durante el 2018 se firma a su vez el acuerdo 732 del concejo de Bogotá el cual adopta medidas para la promoción, el fomento y la masificación de la movilidad eléctrica y demás tecnologías cero emisiones directas de material articulado en Bogotá D.C., buscando estimular el uso de este tipo de vehículos por parte de los ciudadanos, así como promover la renovación por tecnologías limpias en los vehículos oficiales, la flota del Sistema Integrado de Transporte-SITP- y demás fuentes móviles que circulen en la ciudad, buscando el mejoramiento de la calidad del aire, el cuidado del medio ambiente y la salud de los bogotanos (Concejo de Bogotá, 2018).

En el 2019 se promulga la ley 1964 a nivel nacional, la cual genera esquemas de promoción del uso de vehículos eléctricos y de cero emisiones, con el fin de contribuir a la movilidad sostenible y a la reducción de emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero (EL CONGRESO DE COLOMBIA, 2019). Adicionalmente se da el concepto 1260 de 2019 por la secretaría distrital de hacienda que determina que la vigencia en la aplicación de la tarifa de impuestos para vehículos eléctricos establecidos en la ley 1964 de 2019, aplicará para la vigencia 2020. (Secretaría Distrital de Hacienda, 2019).

El año siguiente sale la circular 006 de 2020 por la secretaría jurídica distrital que recalca la importancia y la obligación del acatamiento de lo dispuesto en la Ley 1964 de 2019 por medio de la cual se promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia (Secretaría Jurídica Distrital, 2020). Igualmente mediante la resolución 202030 de 2020 se adopta el formato uniforme de resultados (FUR), y el certificado de revisión técnico mecánica y de emisiones contaminantes virtual para vehículos automotores en el territorio nacional (Ministerio de Transporte, 2020).

Finalmente la resolución 40223 de 2021 del ministerio de minas y energía establece las definiciones, criterios de estandarización y condiciones de mercado que permitan el despliegue de infraestructura de carga para vehículos eléctricos e híbridos enchufables y adopta las definiciones de estos (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

1.7 Conclusiones del capítulo

A partir de lo identificado desde la revisión realizada es posible reconocer que la difusión de taxis eléctricos es un problema ampliamente estudiado en el mundo, en Colombia por otro lado, existen vacíos, oportunidades e interrogantes vigentes. Es necesario entender la dinámica del proceso de difusión para poder comprender los diferentes comportamientos y relaciones que se presentan. Los vehículos eléctricos tienen ciertas debilidades que implican que se deba analizar muy bien la difusión de estos en el transporte de pasajeros.

Evaluar estrategias para incentivar la difusión de taxis eléctricos permite identificar las medidas más efectivas y de este modo orientar los esfuerzos con una mejor comprensión de lo que puede suceder en este sistema complejo.

En el capítulo siguiente se presenta un resumen de las teorías y técnicas más relevantes que han sido desarrolladas para analizar y modelar la difusión de taxis eléctricos y, por lo tanto, no sólo permiten comprender el marco general de la problemática descrita en este capítulo, sino que también serán útiles para el desarrollo de la propuesta de solución a esta problemática.

2. Marco teórico

Para evaluar las diferentes estrategias que incentivan la difusión de taxis eléctricos, es importante conocer como se ha analizado y modelado la difusión de estos y el contexto en el cual se enmarca este tipo de tecnología. Es importante resaltar que la difusión de taxis eléctricos requiere modelar la influencia social y el proceso de toma de decisiones de los individuos. A continuación, se agrupan los conceptos teóricos que enmarcan la problemática.

2.1 Difusión de innovaciones

Uno de los primeros autores en referirse a la difusión de innovaciones es Everett Rogers, su planteamiento propone que la difusión de innovaciones es un proceso donde hay cuatro elementos cruciales: i. la innovación; ii. su comunicación de un individuo a otro; iii. el sistema social en el que ocurre; y iv. el tiempo que toma (Rogers, 1976).

La difusión de la innovación se puede dividir en dos grandes familias de investigación: (1) aquellas que describen los mecanismos y patrones de difusión (la propia difusión de la innovación), y (2) aquellas que buscan comprender y caracterizar la estructura de la toma de decisiones y el proceso de adopción individual de la innovación (más conocido como adopción tecnología) (Montalvo & Kemp, 2008). Hoy se ha reconocido que, aunque ambas familias de investigaciones (difusión y adopción) tienen diferentes aproximaciones y responden preguntas distintas, esas familias de modelos son complementarias (Boons & McMeekin, 2019).

Según la literatura, actualmente existen dos formas de modelar el proceso de difusión de las innovaciones: (1) a través de modelos agregados de comportamiento colectivo y (2) a través de modelos de comportamiento individual, de los cuales las consecuencias

agregadas pueden ser deducidas (Cadavid, 2015; Georgescu & Okuda, 2008). Dentro de la primera forma, se abordan modelos de simulación en dinámica de sistemas, en la segunda forma, se usan modelos de simulación basada en agentes.

El análisis de fenómenos complejos, como el de la difusión de taxis eléctricos ha tenido un alto interés académico y práctico. Dicho análisis requiere la aplicación de una metodología de investigación que considere apropiadamente las características de dicho fenómeno. Según la literatura consultada, el problema de la difusión de taxis eléctricos puede ser abordado según su metodología en seis categorías: Análisis Costo-Beneficio, Recopilación y Análisis de Datos, Encuestas y/o Entrevistas, Optimización, Simulación y Decisiones Multicriterio. En la Tabla 2-1 se resumen los artículos consultados y su metodología.

Tabla 2-1. Resumen de los artículos consultados y su metodología.

Artículo	Problema	Método					
		Análisis Costo-Beneficio	Recopilación y Análisis de Datos	Encuestas y/o Entrevistas	Optimización	Simulación	Decisiones Multicriterio
(Hardman et al., 2018)	Revisión de la literatura de las necesidades de infraestructura en el mercado de los vehículos eléctricos enchufables.		X	X			
(Bischoff & Maciejewski, 2014)	Las operaciones de vehículos eléctricos son atractivas para el transporte urbano, siendo los taxis uno posible campo de aplicación.					X	
(Deyang et al., 2016)	La conversión de taxis de gasolina en taxis eléctricos es una medida importante para lograr el ahorro de energía y la reducción de emisiones.					X	

Artículo	Problema	Método					
		Análisis Costo-Beneficio	Recopilación y Análisis de Datos	Encuestas y/o Entrevistas	Optimización	Simulación	Decisiones Multicriterio
(Liang & Zhang, 2018)	El rendimiento de energía y reducción de emisiones de los vehículos eléctricos está estrechamente relacionado con su método de carga y de funcionamiento.				X		
(Zhou et al., 2021)	Examinar los factores que influyen en la adopción de vehículos eléctricos por parte de los taxistas chinos.			X			
(Hagman & Langbroek, 2019)	Usabilidad de los vehículos eléctricos en una empresa de taxis en Greater, Estocolmo, Suecia.	X		X			
(Wang et al., 2019)	Construcción del ciclo de conducción para vehículos eléctricos.		X				
(Kang & Lee, 2019)	Viabilidad económica de reemplazar la flota actual de taxis de combustibles fósiles en Seúl con taxis eléctricos.	X					
(Bischoff & Maciejewski, 2015)	Viabilidad de una transición a gran escala a vehículos eléctricos.	X	X				
(Sarmiento-Delgado et al., 2019)	Predicción de carga de vehículos eléctricos para automóviles privados y taxis basado en datos de uso de vehículos.		X				
(Gnann et al., 2018)	Infraestructura de carga rápida para vehículos eléctricos.		X				

Artículo	Problema	Método					
		Análisis Costo-Beneficio	Recopilación y Análisis de Datos	Encuestas y/o Entrevistas	Optimización	Simulación	Decisiones Multicriterio
(Moon et al., 2018)	Predicción de las demandas de carga de los vehículos eléctricos basado en patrones de carga de los consumidores.		X				
(Scorrano et al., 2020)	Análisis de la política promulgada en 2016 por la ciudad de Florencia que exige el uso de vehículos eléctricos para el servicio de taxi.			X			
(Jiang et al., 2018)	Modelado de carga de los vehículos eléctricos (VE) en las escalas temporal y espacial.					X	
(You et al., 2021)	Toma de decisiones óptima para un taxi eléctrico enchufable (PET) en un entorno complejo que varía en el tiempo.						X
(Yang et al., 2016)	Potencial de mercado y los beneficios ambientales de reemplazar los vehículos convencionales por vehículos eléctricos de batería en la flota de taxis en Nanjing, China.		X				
(Hörl et al., 2021)	Simulación de los precios, el comportamiento del cliente e impacto de un sistema de taxis automatizados en Zúrich					X	
(Teixeira & Sodré, 2016)	Evaluación de los efectos de la sustitución de vehículos motorizados por eléctricos sobre las emisiones de CO2 y el consumo energético.					X	

Artículo	Problema	Método					
		Análisis Costo-Beneficio	Recopilación y Análisis de Datos	Encuestas y/o Entrevistas	Optimización	Simulación	Decisiones Multicriterio
(Girard et al., 2019)	Conversión de taxis y colectivos en vehículos eléctricos (VE) para ser utilizados en el sector de transporte público chileno.		X				
(Sumasto et al., 2020)	Impacto en el desarrollo sostenible de la implementación de taxis eléctricos en Yakarta						X
(Oliveira et al., 2020)	Evaluación de la estrategia de carga inalámbrica para taxis eléctricos de rango extendido.		X	X			
(Ardila et al., 2020)	Evaluar el impacto de estrategias orientadas a incentivar la difusión de innovaciones energéticas limpias a partir de la influencia social.		X			X	X

Fuente: Elaboración propia a partir de los trabajos consultados.

2.2 Vehículos eléctricos vs vehículos convencionales

En esta sección se comparan las características generales de los vehículos de combustión interna frente a los vehículos eléctricos, estas características son importantes para el tema de esta investigación ya que permiten entender las ventajas y desventajas de una tecnología frente a la otra.

En un vehículo convencional, el combustible se almacena en un tanque y posteriormente se suministra al motor donde después de cuatro procesos (admisión, compresión, combustión y escape) se genera suficiente presión y temperatura para mover los pistones. Este movimiento, se transfiere a un movimiento giratorio utilizando un mecanismo de manivela deslizante, y esta rotación se transfiere a las ruedas motrices por medio de una transmisión (Martinez, 2007).

En un vehículo eléctrico, la fuente de alimentación proviene de un paquete de baterías. El motor por medio de un controlador eléctrico se encarga de tomar corriente continua de las baterías, transformarla en una onda eléctrica alterna y enviarla al estator, donde se genera un campo magnético giratorio con una velocidad de giro e intensidad. El campo magnético generado en el estator “empuja” al rotor haciéndole girar con fuerza para mover las llantas del vehículo (Alguacil, 2016).

Al comparar estos 2 tipos de vehículos, se evidencia que los motores eléctricos presentan una eficiencia de aproximadamente el 90% mientras que los motores convencionales presentan una eficiencia de entre el 25% y 35%, de forma que la eficiencia del motor eléctrico es aproximadamente tres veces mayor a la de un motor convencional (Liu et al., 2017).

El mantenimiento de ambos tipos también difiere, en un vehículo convencional, el mantenimiento implica revisar la correa de distribución, correa de accesorios, bujías, cambio de aceite, filtro de combustible, filtro de aire, filtro de aceite, entre otros; en un vehículo eléctrico estos mantenimientos no son necesarios ya que los motores eléctricos tienen aproximadamente 60% menos piezas, por lo tanto al tener menos partes (Weldon et al., 2018), habrá menor riesgo de averías mecánicas, estimando que el mantenimiento sea entre un 18% (Weldon et al., 2018) y un 42% más económico (Alguacil, 2016). En términos de confiabilidad se puede decir que un motor eléctrico tiene menos fuentes de posibles fallas que uno convencional.

Los vehículos convencionales tienen un sistema de frenos que funciona ejerciendo rozamiento a las llantas produciendo que estas se detengan, este proceso genera energía que es expulsada del vehículo en forma de calor; por su parte, los vehículos eléctricos utilizan un sistema de frenos regenerativo que acumula esa energía en forma de energía eléctrica dentro del vehículo para su posterior reaprovechamiento lo que permite presentar una recuperación de energía por medio del sistema de frenos (Alguacil, 2016).

Respecto al costo energético se ha encontrado que costo promedio por cargar un vehículo eléctrico para recorrer una milla es de aproximadamente \$USD 0.12 mientras que uno

convencional se gasta aproximadamente \$USD 1 (Kettles et al., 2016); un ejemplo del aumento de la eficiencia debido a la electrificación es este: el Suzuki Swift convencional tiene un consumo de 50km/galón, mientras que el Suzuki Swift híbrido tiene un consumo de 80km/galón (EL PAIS, 2021).

En cuanto al rango de carga de las baterías de los vehículos eléctricos representa un nivel de autonomía mucho menor al de cualquier vehículo convencional. La mayoría de los eléctricos tienen un rango entre 250 km y 600 km de autonomía en una sola recarga mientras que un vehículo convencional presenta una autonomía de hasta 500 km con un tanque (BBVA, 2022).

En resumen, los vehículos eléctricos presentan ventajas al tener menor costo de mantenimiento, mayor potencia y ahorros en los costos energéticos. Sin embargo, presentan mayor costo de compra porque obtienen la energía para moverse de un paquete de baterías cuyo precio aún es alto. De igual forma, se espera que con el tiempo este costo disminuya debido al crecimiento de la demanda de dichas baterías para ser usadas en vehículos, y a la consolidación de las investigaciones en este campo.

2.3 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se presentaron y analizaron todos los conceptos y teorías investigadas sobre el problema a tratar de forma que se puedan ver los resultados de una manera más clara y lograr llegar a un desarrollo y solución satisfactoria de la investigación.

En el siguiente capítulo se examina como se ha modelado la toma de decisiones del consumidor y la relevancia que ha tenido el análisis de la influencia social en la difusión de innovaciones.

3.Revisión de literatura

En esta sección se presenta la revisión de la literatura que da cuenta de la información existente y requerida para analizar la toma de decisiones e influencia social en la difusión de taxis eléctricos, evidenciar hasta donde ha avanzado la investigación en estos campos e identificar las oportunidades de investigación planteando explícitamente los vacíos, limitaciones y problemas vigentes que pueden ser el punto inicial de investigaciones futuras.

El proceso de revisión sistemática de la literatura se realizó en dos etapas, una general, para dar cuenta de los trabajos que se han desarrollado en el mundo para modelar la difusión de taxis eléctricos, y otra específica para investigar los trabajos que se han adelantado en Colombia sobre la difusión de taxis eléctricos.

3.1 Difusión de taxis en el mundo

3.1.1 Fuentes de información

El proceso de búsqueda inició con una revisión en las bases de datos Scopus y ScienceDirect en la que se incluyeron los artículos publicados a partir del año 2015. Se limitó la búsqueda a dos áreas temáticas: Ciencias físicas, en las que se incluyen ciencias computacionales, energía e ingeniería, y Ciencias sociales y humanidades para tener en cuenta las áreas de negocios, y administración, y ciencias de la decisión.

Se usaron las siguientes ecuaciones de búsqueda:

- **Scopus:** "TITLE-ABS-KEY ((abm OR (agent AND modeling AND based)) AND (ev OR (electric AND vehicle)) AND diffusion) AND PUBYEAR > 2014 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-

TO (SUBJAREA , "ENER") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR
LIMIT-TO (SUBJAREA , "SOCI"))”

- **ScienceDirect:** “agent AND modeling AND based AND electric AND vehicle AND diffusion”

Se obtuvieron 25 resultados en Scopus y 2916 resultados en ScienceDirect, de estos resultados se filtraron los artículos de tipo revisión e investigación. Gracias a esto, se obtuvo como resultado un conjunto de 850 artículos entre ambas bases de datos. Se revisaron los títulos de los documentos para seleccionar de forma manual aquellos afines con el área de investigación. La búsqueda se refinó usando dos criterios: los artículos más recientes y artículos más citados.

3.1.2 Resultados obtenidos

En la tabla 3-1 se presentan los resultados de las 15 investigaciones más relevantes, encontradas como resultado del proceso de búsqueda. En ella puede observarse la tecnología bajo análisis y el entorno geográfico que aplica en cada investigación revisada.

Tabla 3-1. Investigaciones más relevantes en el mundo.

Artículo	Tópicos de investigación	Tecnología	Entorno Geográfico
(Kumar et al., 2022)	Demanda futura, infraestructura de carga, escenarios de difusión y análisis de políticas	Vehículos Eléctricos	Mundial
(Encarnação et al., 2018)	Incentivos públicos y privados, oferta y demanda vehículos eléctricos	Vehículos Eléctricos	Brasil
(Kong et al., 2020)	Incentivos públicos y privados y análisis de políticas	Vehículos Eléctricos	China
(Trencher et al., 2021)	Escenarios de difusión e impacto de los actores en la movilidad eléctrica	Vehículos Eléctricos	China, Japón y USA
(Manca et al., 2020)	Impacto de los actores en la movilidad eléctrica	Vehículos Eléctricos	Inglaterra

Artículo	Tópicos de investigación	Tecnología	Entorno Geográfico
(Globisch et al., 2018)	Motivación de los actores para adoptar vehículos eléctricos	Vehículos Eléctricos	Alemania e Inglaterra
(Ebrie & Kim, 2022)	Investigar el impacto y la importancia relativa de las medidas financieras, técnicas y políticas sobre la penetración en el mercado de los vehículos eléctricos.	Vehículos Eléctricos	Corea del Sur
(Huang et al., 2021)	Como la adopción inadecuada por parte de los consumidores se ha convertido en un obstáculo importante para la difusión de los vehículos eléctricos	Vehículos Eléctricos	China
(Ensslen et al., 2019)	Enfoque de modelado híbrido de un escenario de difusión de PEV que consiste en un modelo de Bass macroeconómico de arriba hacia abajo.	Vehículos Eléctricos Enchufables	Francia y Alemania
(Sun & Lubkeman, 2021)	Este documento propone un nuevo enfoque de pronóstico de difusión para EV residenciales y estaciones de carga utilizando modelos basados en agentes	Vehículos Eléctricos Enchufables	Mundial
(Novizayanti et al., 2021)	Esta investigación tiene como objetivo crear un marco para la transición a EV en Indonesia a través del Modelado basado en agentes.	Vehículos Eléctricos	Indonesia
(Soltani-Sobh et al., 2017)	En este estudio, se examina la relación entre la cuota de mercado de los vehículos eléctricos y la presencia de incentivos gubernamentales y otros factores	Vehículos Eléctricos	Estados Unidos

Artículo	Tópicos de investigación	Tecnología	Entorno Geográfico
	socioeconómicos influyentes.		
(Jansson et al., 2017)	Análisis de los adoptantes y no adoptantes de vehículos de combustible alternativo (AFV) mediante la teoría de la difusión de la innovación	Vehículos de Combustible Alternativo.	Suecia
(Shi et al., 2022)	Este artículo propone un modelo de difusión Bass modificado para estudiar el crecimiento de la población de vehículos eléctricos.	Vehículos Eléctricos	China
(Fluchs, 2020)	Este artículo estudia el proceso de difusión de los vehículos eléctricos de batería (BEV) en la Unión Europea sobre la base de un modelo de difusión de tecnología logística.	Vehículos Eléctricos	Unión Europea

Fuente: Elaboración propia a partir de los trabajos consultados.

Como se aprecia en la tabla 3-1, varios autores han abordado el tema de la difusión de vehículos eléctricos en el mundo y sus implicaciones desde distintos enfoques. Autores como Kumar y otros (2022) y Ensslen y otros (2019), plantean el uso de modelos de difusión, como Gompertz, Logístico, Bass y Bass Generalizado, para simular la demanda futura de vehículos eléctricos y, en el proceso, descubrir conocimiento múltiple.

Por otro lado, hay autores que plantean un enfoque integral de cómo la combinación de políticas influye en la difusión de la tecnología sostenible en el mercado. Particularmente el estudio de Kong y otros (2020) intenta investigar el efecto de múltiples políticas, como son, el subsidio de productos, el comercio de emisiones de carbono y las políticas de restricción de matrículas en la difusión de vehículos eléctricos una vez que el esquema de subsidio de compra se elimine gradualmente en China.

Así mismo Encarnaçõ y otros (2018) y Ebrie y Kim (2022) investigan la viabilidad de la adopción de tecnologías alternativas mediante el estudio de posibles mecanismos de incentivos que comprenden medidas gubernamentales, las empresas (privadas) y los consumidores (civiles).

Un nuevo enfoque analítico para medir los efectos de las actitudes de los pares en el proceso de toma de decisiones del individuo es presentado en el trabajo de Manca y otros (2020). La medida sugerida permite modelar el efecto correlacionado que podría afectar indirectamente la elección del individuo dentro de un grupo social. Combina información detallada sobre las actitudes en la red social del individuo y la proximidad social de los individuos en la red para comprender sus implicaciones de comportamiento en la elección del individuo, la variable de actitud de los compañeros del individuo se prueba en diferentes componentes de un modelo de elección híbrida.

Finalmente, un enfoque muy interesante es el análisis de regresión para estudiar qué motiva a los administradores de flotas de vehículos a hacer campaña para la adquisición de vehículos eléctricos. Globisch y otros (2018) utilizan los datos de 229 administradores de flotas de automóviles, incluidos si son o no adoptantes de vehículos eléctricos para desarrollar el estudio.

3.2 Difusión de taxis en Colombia

3.2.1 Fuentes de información

Al igual que en la revisión anterior, el proceso de búsqueda inició con una revisión en las bases de datos Scopus y Science Direct en la que se incluyeron los artículos publicados a partir del año 2015. Se limitó la búsqueda a dos áreas temáticas: Ciencias físicas, en las que se incluyen ciencias computacionales, energía e ingeniería, y Ciencias sociales y humanidades para tener en cuenta las áreas de negocios, y administración, y ciencias de la decisión.

Se usó la siguiente ecuación de búsqueda:

- **Scopus:** “TITLE-ABS-KEY((abm OR (agent AND modeling AND based)) AND (ev OR (electric AND vehicle)) AND diffusion and Colombia) AND PUBYEAR > 2014 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA,"ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"ENER") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"SOCI"))”
- **ScienceDirect:** “agent AND modeling AND based AND electric AND vehicles AND diffusion AND Colombia”

Al igual que para el panorama mundial, se filtraron los artículos de tipo revisión e investigación y se obtuvieron 0 resultados en Scopus y 35 resultados en ScienceDirect. De estos artículos se revisaron los títulos y los resúmenes para seleccionar de forma manual aquellos afines con la temática de investigación. La búsqueda se refinó usando dos criterios: los artículos más recientes y artículos más citados.

3.2.2 Resultados obtenidos

De manera similar a como se presentaron los resultados a nivel mundial, se presenta en la tabla 3-2 las únicas 3 investigaciones que se han desarrollado en Colombia o que hacen mención al país en las que se aborda la problemática de interés de este trabajo.

Tabla 3-2. Investigaciones más relevantes en Colombia.

Artículo	Tópicos de investigación	Tecnología	Entorno Geográfico
(Arias-Gaviria et al., 2019)	Incentivos públicos y privados y análisis de políticas	Energías Renovables	Colombia
(Lopez-Arboleda et al., 2019)	Oferta y demanda de vehículos eléctricos para transporte de pasajeros integrado con la sostenibilidad	Vehículos Eléctricos	Mundial con mención a Colombia
(McRae & Wolak, 2020)	Reformas de las tarifas eléctricas	Tecnologías Limpias	Colombia

Fuente: Elaboración propia a partir de los trabajos consultados.

Como se puede observar en la tabla 3-2, en Colombia se ha abordado el tema desde enfoques como el de Arias-Gaviria y otros (2019), donde el propósito fue evaluar los incentivos para la difusión de las energías renovables en Colombia a través de un modelo de simulación de recomendaciones de política energética. Se probaron cuatro incentivos: reducción de impuestos, tarifas de alimentación, certificados negociables y subsidios técnicos. Los resultados mostraron que un escenario combinado que utilice tarifas de alimentación y subsidios técnicos puede impulsar el despliegue de energía renovable, evitando aumentos significativos de precios para el consumidor final (Arias-Gaviria et al., 2019).

Por su parte Lopez-Arboleda y otros (2019), plantean una revisión sistemática de las investigaciones en las que se modelaron los componentes de la oferta y la demanda del sector del transporte de pasajeros de manera integrada junto con las dimensiones de la sostenibilidad. Todos estos estudios examinados habían tenido en cuenta tanto la dimensión económica como la ambiental; sin embargo, solo unos pocos también habían considerado el desarrollo social.

Desde la perspectiva del modelado, identificaron dos enfoques principales: modelos de arriba hacia abajo e híbridos. El primero, permite considerar el comportamiento del sistema de manera agregada, se enfoca en las relaciones y retroalimentación entre los componentes del sistema. El modelo híbrido toma en consideración un enfoque basado en agentes para el consumidor integrado en modelos descendentes. Esto permite considerar explícitamente la heterogeneidad del consumidor y el efecto de la influencia interpersonal en cada consumidor.

McRae y Wolak (2020), plantean en su artículo que las reformas de las tarifas eléctricas serán una parte esencial de la transición a las energías limpias. Las tarifas existentes se basan en el precio del costo promedio y, a menudo, establecen un precio por unidad que excede el costo marginal.

3.3 Conclusiones del capítulo

El modelado de la toma de decisiones del consumidor se ha realizado de maneras diferentes; La influencia social en la difusión de innovaciones, considera las redes sociales como base de la estructura del proceso de difusión y la interacción entre los individuos. Aunque existen algunas investigaciones que han modelado la difusión de vehículos eléctricos y sus implicaciones, existe ausencia de trabajos en Colombia y países en desarrollo que permitan analizar completamente estas difusiones.

En el siguiente capítulo se usan los hallazgos obtenidos a partir de la descripción de la problemática, la definición del marco teórico y la revisión sistemática de la literatura para establecer los objetivos de esta investigación, estos objetivos a su vez establecen el propósito de este estudio y enmarcan el alcance de este trabajo.

4. Objetivos

Teniendo como base los hallazgos de los tres capítulos anteriores, y considerando las oportunidades y preguntas emergentes de investigación, se presentan en esta sección los objetivos de investigación.

4.1 Objetivo general

Evaluar estrategias para incentivar la difusión de taxis eléctricos en Colombia.

4.2 Objetivos específicos

1. Identificar y seleccionar los factores clave para modelar la difusión de los taxis eléctricos en Colombia.
2. Parametrizar el modelo de simulación de la difusión de los taxis eléctricos en Colombia.
3. Usar un modelo de simulación para analizar la difusión de los taxis eléctricos en Colombia.

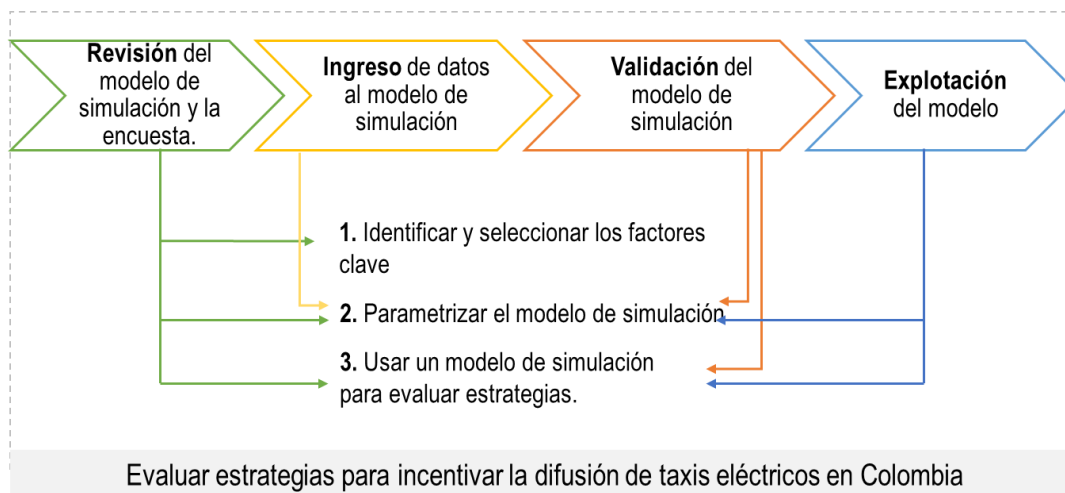
4.3 Conclusiones del capítulo

Los objetivos de la investigación propuestos en este capítulo permiten justificar el alcance de la investigación. Con el cumplimiento de los objetivos definidos se espera consolidar aportes de tipo teórico, conceptual y práctico. Estos aportes están orientados al desarrollo de nuevo conocimiento, a un mayor entendimiento del fenómeno de difusión de taxis eléctricos en Colombia y a la aplicación de un modelo que permita evaluar diferentes estrategias frente al tema tratado.

5. Metodología

Para el logro de los objetivos propuestos en el capítulo anterior se realizó una revisión y actualización de la literatura para identificar el estado del arte relacionado con la difusión de vehículos eléctricos para el transporte de pasajeros y se usó una metodología de 4 fases, la cual se esquematiza en la Figura 5-1. Estas fases son: 1. Revisión del modelo de simulación y la encuesta, 2. Ingreso de datos al modelo de simulación, 3. Validación del modelo de simulación y 4. Explotación del modelo. Es necesario aclarar, que el proceso descrito en las etapas no es estrictamente secuencial, sino que, como en todo proceso de modelado, este es iterativo.

Figura 5-1. Esquema de la metodología de la investigación.



5.1 Fase I. Revisión del modelo de simulación y la encuesta.

Esta etapa incluye el entendimiento del modelo de simulación y de la encuesta a usar con el propósito de “Identificar y seleccionar los factores clave para modelar la difusión de taxis

eléctricos”, reconocer y comprender las diferentes estrategias que se aplican en el modelo de simulación en el cual se basa este trabajo, con el fin de incentivar la difusión de taxis eléctricos a partir de la influencia social.

Una vez estudiado y entendido el modelo y la encuesta sobre la que se basa este trabajo, se cambia la estructura de la red del modelo y algunos campos de la encuesta, la encuesta y los cambios realizados en ella, se pueden observar en el anexo A, de forma que se acoplen y representen de mejor manera el caso que se quiere estudiar.

5.2 Fase II. Ingreso de datos al modelo de simulación

En esta fase se recogen los parámetros de los agentes, los cuales se ingresan en el modelo estudiado y modificado en la fase I. Teniendo en cuenta que; la estructura subyacente sobre la que se realiza la difusión de los taxis eléctricos está definida por las interacciones existentes entre los individuos que componen la red, para esto es necesario capturar o recopilar mediante información secundaria los parámetros de los individuos de la red, para lo cual se usó la encuesta mencionada en la fase I. Este es pues el objetivo de esta etapa de la investigación.

5.3 Fase III. Validación del modelo de simulación

En esta fase se articulan e integran los elementos hallados en las Fases I y II en el modelo de simulación refinado sobre el escenario base planteado y se analiza y validan los resultados iniciales, de forma que sean consistentes y concuerden con lo que se espera obtener del caso de aplicación planteado en este trabajo.

5.4 Fase IV. Explotación del modelo

Esta etapa, una vez validado el modelo en la etapa III, se procede a la implementación de las estrategias presentadas en la fase I sobre el modelo parametrizado en la fase II, así como la evaluación de los efectos que estas generan. Se requiere para lograr un adecuado análisis de los resultados, establecer previamente criterios de cualitativos y cuantitativos que permitan eliminar elementos de juicio subjetivo en la evaluación de las estrategias y hacer comparables los resultados obtenidos con cada una de las estrategias modeladas.

La comparación de las estrategias con base en criterios definidos, observables y medibles, reducen, de alguna manera, la imprecisión derivada de las apreciaciones subjetivas.

5.5 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se describió una metodología de cuatro fases. Estas fases son: 1. Revisión del modelo de simulación y la encuesta, 2. Ingesta de datos al modelo de simulación, 3. Validación del modelo de simulación y 4. Explotación del modelo. La metodología descrita constituye la hoja de ruta que se siguió para alcanzar cada uno de los objetivos específicos de esta investigación y el cumplimiento del objetivo general.

6. Configuración del modelo de simulación

En esta sección se presenta la descripción y configuración del modelo, se establece mediante que método se encontraron y perfilaron los diferentes tipos de actores y la forma como están relacionados entre sí y como se distribuyen al interior del modelo planteado.

6.1 Descripción del modelo de simulación a usar

El modelo de Simulación Basado en Agentes que se usa en este trabajo se ejecutó en Netlogo 6.2.2. Esto se debe a que el modelo que sirve de base a este, estaba construido allí, además después de revisar varios estudios que comparan herramientas de simulación y modelado basadas en agentes, Netlogo sobresale por la facilidad de desarrollo de este tipo de modelos (Ardila et al., 2020).

El modelo está conformado por 9500 agentes, que son la misma cantidad del modelo base, dada la capacidad de este, cada uno de los agentes tiene un número de identificación único y los agentes que en el modelo original se dividían en individuos de la red, dirigentes de opinión y adoptadores previos, en el modelo usado están divididos únicamente en individuos de la red, que son los taxistas con vehículos a gas y gasolina, y adoptadores previos, que son los taxistas que ya hacen uso de la tecnología eléctrica.

La idea del modelo es entonces que, una vez establecido quienes son los agentes que ya poseen la innovación y quienes aún no la tienen y se configuren las distintas poblaciones según las tipologías y se asignen las características de la red a cada agente, posterior a esto, en cada periodo del tiempo modelado, en este caso 15 años, cada agente evalúa sus niveles de satisfacción e incertidumbre y decide, según su estrategia, si adopta el uso del vehículo eléctrico o no lo hace.

Es de destacar que a medida que pasa el tiempo en la simulación, cambian los atributos del agente y se modifican las condiciones de su entorno, esto hace que los agentes se adapten. Por ejemplo, a medida que los agentes interactúan con otros que usan taxis eléctricos se va reduciendo su incertidumbre con la tecnología y según sea su estrategia de toma de decisiones, su decisión de adoptar puede cambiar.

6.2 Descripción de la estructura de la red social y sus tipologías de interacción

Para representar de la mejor forma posible como están distribuidos los taxistas en el modelo, cuya escala es aproximadamente 1 a 50, se optó por dividir la población del modelo de 9500 agentes (capacidad máxima del modelo a usar), en 10 redes aleatorias muy conectadas que representan las diferentes cooperativas existentes en el país, este valor se eligió con el fin de representar la proporción de cooperativas vs la población de taxis (480000 taxis vs 450-500 cooperativas), donde el tamaño de cada una de estas redes se hizo con valores aleatorios entre 550 y 1550 agentes que permitieran representar la variación y diversidad de las distintas agremiaciones de taxistas. La distribución de estas 10 redes está dada así:

- Red 1: 1073 agentes
- Red 2: 1395 agentes
- Red 3: 513 agentes
- Red 4: 1156 agentes
- Red 5: 824 agentes
- Red 6: 1522 agentes
- Red 7: 1298 agentes
- Red 8: 566 agentes
- Red 9: 138 agentes
- Red 10: 654 agentes

Nótese que la suma de estas redes da un total de 9139 agentes, los 361 agentes restantes del modelo representan aquellos conductores de taxis no afiliados a ninguna cooperativa y/o agremiación, estos taxistas, al igual que los agremiados, están conectados al resto

mediante una red libre escala y cabe destacar que aquellos conductores de taxis que ya han adoptado el uso de vehículos eléctricos, sin importar su afiliación gremial, se encuentran aún más conectados entre sí con una red aleatoria.

La cantidad de agentes que usan cada tipo de tecnología, gasolina, gas y eléctrico, está dada por los porcentajes obtenidos durante la fase de levantamiento de la información con el mecanismo usado para parametrizar el modelo y contrastados con los porcentajes reportados en el país para este tipo de vehículos (ANDEMOS, 2021b), los porcentajes usados fueron: 84,75% para taxis a gasolina (Agente tipo 1), 14,75% para taxis a gas (Agente tipo 2) y 0,5% (Agente tipo 3) para los taxis eléctricos.

6.3 Parametrización del modelo

Con el fin de perfilar la población que se quería simular, se usó una fuente primaria como la encuesta, esta se realizó a conductores de taxis en la ciudad de Medellín y su área metropolitana y en los municipios del Oriente de Antioquia. Esta encuesta se realizó de forma virtual y presencial, virtualmente mediante la plataforma Google Forms la cual fue distribuida a través de distintos canales electrónicos como correo, WhatsApp y código QR, y de forma presencial en diferentes puntos de las ciudades, con el fin de dar mayor cobertura a la población de taxistas.

Los valores de los parámetros de los agentes que se recogieron con la encuesta fueron: el conocimiento, la ambición, la tolerancia a la incertidumbre, peso de anticonformidad, peso de conformidad, peso social, peso funcional, peso financiero y peso ambiental. Los valores obtenidos se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 6-1. Resumen de los valores de los parámetros de los agentes del modelo.

Parámetro	Agente Tipo 1		Agente Tipo 2 y 3	
	Media	Desv	Media	Desv
Anticonformidad	0,51	0,07	0,44	0,07
Conformidad	0,49	0,07	0,56	0,07
Social	0,25	0,03	0,25	0,03
Funcional	0,27	0,03	0,28	0,02
Financiero	0,21	0,04	0,21	0,04
Ambiental	0,26	0,03	0,27	0,03
Conocimiento	0,63	0,15	0,69	0,09
Ambición - Nivel de satisfacción	0,83	0,12	0,79	0,16
Nivel de tolerancia a la incertidumbre	0,74	0,27	0,88	0,22

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de la simulación.

Se ingresó en el modelo cada uno de los valores y su desviación estándar. Estos valores obtenidos se usan con el ánimo de identificar la probabilidad de adopción de los agentes que está condicionada por la forma en que los agentes deciden con base en el marco general del Consumat, en el que se tienen cuatro estrategias diferentes: repetir, imitar, optimizar e indagar. Para definir qué tipo de estrategia usa cada agente en la simulación se calcula su satisfacción y su incertidumbre netas. Por un lado, la satisfacción neta depende del nivel de ambición del agente y la forma en que la innovación satisface cuatro tipos de necesidades diferentes: social, financiera, funcional y ambiental. Por otro lado, la incertidumbre neta depende de la tolerancia a la incertidumbre del agente y el conocimiento sobre el uso de taxis eléctricos y la proporción de contactos en su red que hayan adoptado la tecnología (Ardila et al., 2020).

En total se recibieron 115 formularios completamente diligenciados. La edad de las personas encuestadas está entre 20 y 50 años. Se encuestaron 7 participantes femeninos y 108 participantes masculinos. El nivel de formación de la mayoría de los encuestados es educación secundaria (46,95%).

Los valores obtenidos de la encuesta permiten interpretar que los encuestados están ligeramente dispuestos a comprar un carro eléctrico para movilizarse si resulta económico y ambientalmente amigable. Además, se encontró que la mayoría de las personas recomendarían a sus conocidos comprar un carro eléctrico para movilizar pasajeros.

En el Anexo A se presentan las preguntas realizadas para capturar la información requerida en la parametrización del modelo, el detalle de cómo se modificó la encuesta frente a la original y la forma de obtener los valores mostrados en la tabla 6-1.

Para determinar el número de corridas necesarias del modelo y debido a la aleatoriedad en las variables de este, se tomó el análisis realizado en el trabajo de Ardila y otros (2020), en el que se realizaron 19 experimentos para determinar el número de simulaciones requeridas hasta obtener resultados con estabilidad en la varianza. Los resultados del análisis indican que 300 simulaciones son suficientes para estabilizar el coeficiente de variación en los indicadores de interés. De este modo, en adelante, se presentarán resultados que correspondan a 300 simulaciones.

6.4 Conclusiones del capítulo

Como se vio en el capítulo, la red a modelar consta de 10 sub-redes muy conectadas y algunos agentes libres que están conectados al resto mediante una red libre escala.

Los individuos de la red se perfilaron gracias a los valores obtenidos de los parámetros del modelo con el uso de la encuesta mencionada.

7. Análisis de resultados

En esta sección se presentan y analizan los resultados del caso base teniendo en cuenta el análisis cuantitativo y cualitativo de la evolución y configuración final del sistema y se evalúan las diferentes estrategias a partir de diversos indicadores que permiten llegar a conclusiones sobre la estrategia satisfactoria para incentivar la difusión de vehículos eléctricos en la población de taxistas.

Para el realizar este análisis se fijó un horizonte de simulación de 15 años y como se mencionó en el capítulo anterior, se realizaron iteraciones de 300 corridas para cada uno de los escenarios planteados.

7.1 Análisis de las condiciones iniciales del sistema

Con la configuración del sistema es posible encontrar tres resultados iniciales importantes. El primero está asociado con las características generales de la población, con el propósito de incluir la configuración de la población en el modelo fue necesario escalar la cantidad de agentes que representan a los taxistas. De este modo, según el tipo de agente, la población está compuesta como se detalló en la sección 6.2 del capítulo anterior.

El segundo resultado está relacionado con las estrategias que usan los agentes para tomar decisiones al inicio de la simulación. Basado en el modelo del conumat y según lo encontrado gracias a la encuesta realizada, la población está constituida por una mayoría optimizadora (88.3%), seguida de indagadores (10.1%), repetidores (1.6%) y finalmente imitadores (0.1%). Esto tiene sentido, sobre todo, cuando se tiene en consideración que la inversión requerida para adquirir esta tecnología es elevada y por lo tanto los agentes buscan tener procesos más cuidadosos en la búsqueda de la decisión más apropiada, optimizar las decisiones que impliquen grandes inversiones exige a cada agente aplicar un proceso de toma de decisiones más individual que social y con una alta exigencia cognitiva.

El tercer resultado se asocia con que los individuos optimizadores son predominantes en todos los niveles de configuración de la red. Tanto en la red libre de escala como en las redes aleatorias muy conectadas. Teniendo en cuenta esto, es posible afirmar que en el sistema predomina la estrategia optimizadora.

7.2 Revisión de los resultados del caso base

A partir de los resultados obtenidos, que como se mencionó, corresponden a 300 simulaciones, que se presentan en la Tabla 7-1 es posible evidenciar que la cantidad de adoptantes al final de la simulación son en promedio de 2070, que representan el 21.79% de los individuos de la red. Cabe resaltar que el comportamiento de la difusión es creciente en el tiempo y que se hace mayor los últimos periodos debido a que en ese momento las condiciones para la difusión son más favorables, especialmente por la reducción que hasta ese punto ha tenido el precio de los vehículos eléctricos. La cantidad total de reducción de emisiones de CO₂ es de 2003162 para este escenario base.

Tabla 7-1. Indicadores de la difusión para el caso base.

	Adoptadores Totales	Reducción de Emisiones [ton CO ₂]*
Promedio	2070	2003162
Desviación Estándar	13,738	
CV	0,007	

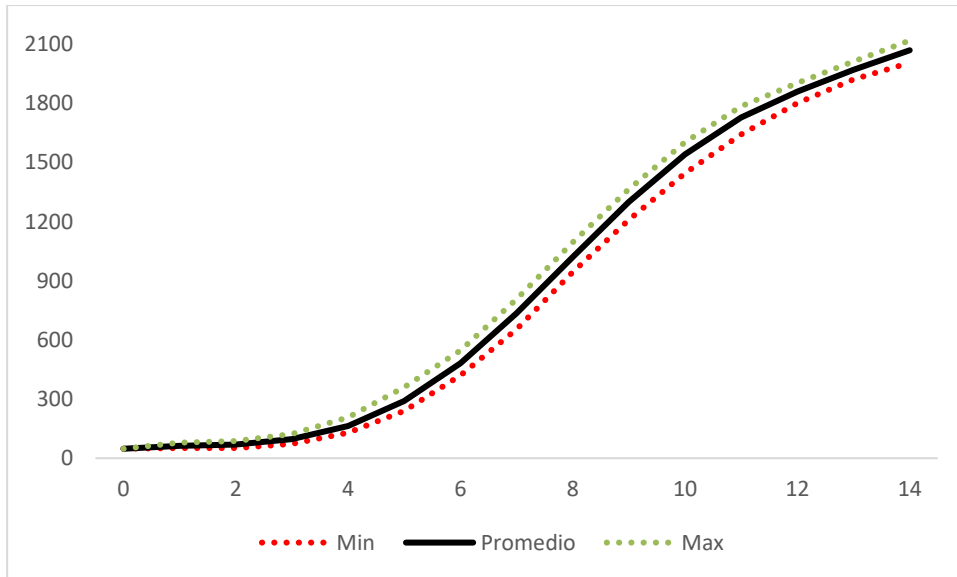
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de la simulación.

** Para este cálculo se consideran las emisiones anuales de gases de efecto invernadero por categoría vehicular en Toneladas de CO₂. Las emisiones de un taxi por año son 157,505 Ton de CO₂ (Universidad Pontificia Bolivariana & Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2018).*

En la Figura 7-1 se observa la curva promedio de la difusión de vehículos eléctricos en el periodo modelado de 15 años. Debido a la aleatoriedad en el proceso, se presentan también en esta figura las curvas con los valores mínimos y máximos para cada periodo, obtenidos en las 300 simulaciones. El fenómeno de difusión tiene un comportamiento

creciente en el tiempo y alrededor de los años 7 u 8 presenta un ligero cambio en la concavidad.

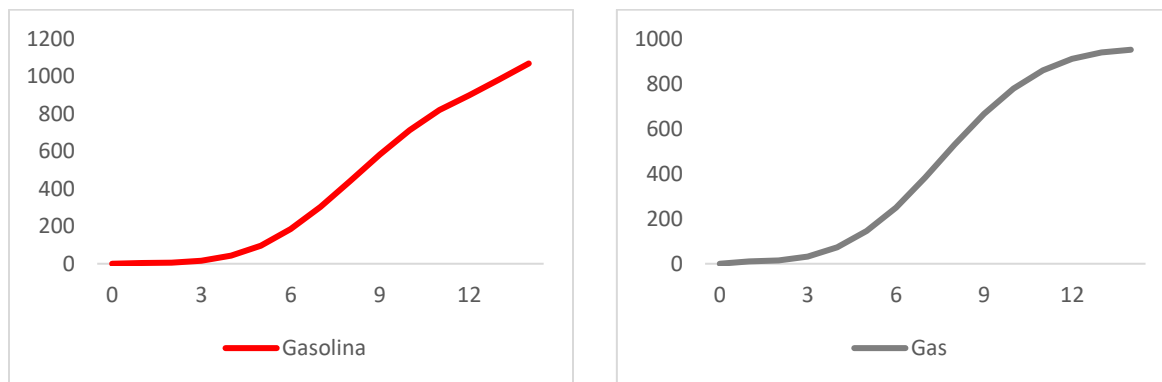
Figura 7-1. Trayectorias de difusión agregadas.



Fuente: Elaboración propia con los resultados de la simulación

Las trayectorias desagregadas según la tecnología inicial de los agentes en la configuración de la red, que se presentan en la Figura 7-2, permiten identificar que las curvas de difusión de la tecnología eléctrica en la población de taxistas que inicialmente usaban vehículos a gasolina y en la población de taxistas que inicialmente usaban vehículos a gas es distinta. Esto obedece a que para los taxistas que inicialmente usaban vehículos a gas se alcanzan primero las condiciones de paridad de la innovación y en consecuencia el tiempo de despegue de la curva ocurre antes.

Figura 7-2. Trayectorias desagregadas según la localización de los agentes en la configuración de la red.



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de la simulación

7.3 Identificación y selección de las estrategias a evaluar

Basado en el trabajo de Ardila y otros (2020), se simularon siete tipos de estrategias de influencia social. Estas son:

- Siembra Aleatoria – Selecciona aleatoriamente a los agentes
- Siembra Selectiva por máximo grado – Selecciona a los agentes más conectados
- Siembra Selectiva por máximo eigenvector – Selecciona a los agentes mejor conectados
- Siembra Selectiva por mínimo grado – Selecciona a los agentes menos conectados
- Siembra Selectiva por mínimo eigenvector – Selecciona a los agentes peor conectados
- Focalización – Selecciona todos los agentes conectados con un agente que ya haya adoptado antes de buscar otro nicho de mercado
- Focalización desagregada – Selecciona aleatoriamente agentes conectados con otros que ya hayan adoptado

Cada una de estas estrategias fue evaluada con un porcentaje de implementación del 15%. En la Tabla 7-2 se relaciona cada experimento realizado con su respectiva nomenclatura, esta permitirá realizar una fácil identificación para el análisis de los resultados.

Tabla 7-2. Relación de los experimentos realizados para simular las estrategias seleccionadas.

Experimento	%	Nomenclatura
Caso Base	0%	0
Siembra Aleatoria	15%	SA
Siembra Selectiva	15%	SS +
Siembra Selectiva Eigenvector	15%	SSE +
Siembra Selectiva Min	15%	SS -
Siembra Selectiva Eigenvector Min	15%	SSE -
Focalización	15%	F
Focalización Desagregada	15%	FD

Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el escenario base, cada estrategia fue simulada 300 veces por un periodo de 15 años. Lo anterior con el fin de realizar comparaciones válidas entre los resultados obtenidos debido a la aleatoriedad existente.

7.4 Análisis de resultados de las estrategias implementadas

A partir de la tabla 7-3, es posible identificar que, con las estrategias planteadas, se podría alcanzar entre 2069 y 2071 adoptadores en promedio, la reducción de emisiones de CO₂ en toneladas varían entre 1999152 y 2002506. Todas las estrategias evaluadas muestran un desempeño en los indicadores, adoptadores totales y reducción de emisiones, muy parecidos.

Tabla 7-3. Medidas de los indicadores usados para describir el proceso de la difusión de taxis eléctricos en Colombia.

Simulación	Adoptadores Totales	Desviación Estándar	CV	Reducción de Emisiones [ton CO ₂]*
SA	2071	14,339	0,007	2002505,445
SS +	2069	13,427	0,006	1999153,738
SSE +	2071	13,502	0,007	2001462,761
SS -	2070	14,274	0,007	2000746,114
SSE -	2069	13,768	0,007	1999576,902

Simulación	Adoptadores Totales	Desviación Estándar	CV	Reducción de Emisiones [ton CO2]*
F	2070	13,297	0,006	2000471,005
FD	2070	13,259	0,006	2000070,417

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de la simulación

Dado que los resultados obtenidos en la tabla 7-3 son muy parecidos, se procede a analizar las estrategias mediante las métricas recomendadas en el trabajo de Cadavid (2015), dichas métricas son: Amáx, que es la cantidad máxima de nuevos adoptadores; Tmáx, que es el tiempo que transcurre entre la primera adopción y el momento en que se presenta la cantidad máxima de nuevos adoptadores (Amáx) y F, que es el porcentaje de la población potencial que, al final de la simulación, ha adoptado la innovación. Estos resultados se presentan en la tabla 7-4 que se muestra a continuación.

Tabla 7-4. Medidas de los indicadores alternativos usados para describir el proceso de la difusión de taxis eléctricos en Colombia.

Simulación	F	Amáx	Tmáx
0	21,79%	285	8
SA	21,80%	285	8
SS +	21,78%	285	8
SSE +	21,80%	286	8
SS -	21,79%	284	8
SSE -	21,78%	285	8
F	21,79%	285	8
FD	21,79%	283	8

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de la simulación

Como se puede observar, estas métricas evaluadas en la tabla 7-4, nos siguen indicando que las estrategias evaluadas presentan unos resultados muy parecidos, para estos casos y como último esfuerzo por tratar de identificar cual estrategia podría tener un mejor desempeño, se presenta en la tabla 7-5, los resultados del cálculo del indicador ρ para las estrategias planteadas en este trabajo, este indicador es de utilidad cuando se tiene un valor igual de F (es decir, un nivel igual de adoptadores finales) en las estrategias comparadas. El cálculo de ρ implica la medición del área bajo la curva de difusión y medición del flujo puntual de nuevos adoptadores. Un valor de ρ cercano a cero indica que

la difusión tuvo lugar a una baja velocidad, mientras que un valor cercano a 1 indica una alta velocidad (toma un valor de 1 cuando el total de adoptadores es logrado en el paso cero de la simulación) (Cadavid, 2015).

Tabla 7-5. Medida del indicador ρ usado para describir la velocidad de la difusión de taxis eléctricos en Colombia.

Simulación	ρ
0	0,472
SA	0,473
SS +	0,472
SSE +	0,472
SS -	0,472
SSE -	0,472
F	0,472
FD	0,472

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de la simulación

A partir del análisis de los resultados presentados en las tablas 7-3, 7-4 y 7-5, se decidió probar la estrategia de siembra aleatoria (SA), por su facilidad de implementación frente a las demás estrategias presentadas y dado que es levemente mejor en el parámetro ρ , con otros porcentajes que permitieran identificar el porcentaje de siembra para el cual la población pudiera reaccionar de mejor manera y por ende con los mejores resultados según las métricas planteadas. En la tabla 7-6 se presentan los porcentajes de siembra y los resultados obtenidos para cada escenario. Al igual que en los resultados presentados anteriormente, cada estrategia fue simulada 300 veces por un periodo de 15 años, esto con el fin de realizar comparaciones válidas entre los resultados obtenidos.

Tabla 7-6. Medidas de los indicadores usados para describir el proceso de la difusión de taxis eléctricos en Colombia con estrategia de SA.

Simulación	Adoptadores Totales	Desviación Estándar	CV	Reducción de Emisiones [ton CO ₂]*
SA 5%	2069,127	13,440	0,006	2000881,043
SA 15%	2070,503	14,339	0,007	2002505,445
SA 25%	2070,690	14,569	0,007	2000475,205
SA 50%	2069,577	14,131	0,007	2000274,649

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de la simulación

Al observar la tabla 7-6, es posible apreciar que la variación del porcentaje de siembra no genera un cambio significativo en los indicadores mostrados, se procede entonces a evaluar los indicadores recomendados en el trabajo de Cadavid (2015) en la tabla 7-7 que se presenta a continuación.

Tabla 7-7. Medidas de los indicadores alternativos usados para describir el proceso de la difusión de taxis eléctricos en Colombia con estrategia de SA.

Simulación	F	Amax	Tmax	Rho
SA 5%	21,78%	286	8	0,473
SA 15%	21,80%	285	8	0,473
SA 25%	21,80%	284	8	0,472
SA 50%	21,79%	284	8	0,472

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de la simulación

Al observar la tabla 7-7, podemos ver que sin importar el porcentaje de siembra los resultados no varían significativamente, frente a esto, se sugiere hacer la menor siembra posible en caso de querer aplicar esta estrategia.

7.5 Conclusiones del capítulo

Como se mencionó en el capítulo, debido a las características de la tecnología, la mayoría de la población se comporta como optimizadora y en ese sentido toman decisiones individuales que se dejan afectar muy poco por las decisiones colectivas.

Si bien, las curvas de difusión de los adoptadores que vienen de tecnologías de gasolina y gas son parecidas, la curva de los que provienen de la tecnología a gas presenta una concavidad mayor en los periodos finales de la simulación.

Dentro de las estrategias evaluadas, es posible evidenciar que no existe una estrategia que domine a las demás en los criterios evaluados, a su vez, ninguna de las mismas representa mejoría considerable con respecto al caso base.

Al analizar con más detalle la estrategia de siembra aleatoria, por ser la de mayor facilidad de implementación, y al variar sus porcentajes de siembra, es posible observar que no se genera un cambio representativo en ninguno de los porcentajes evaluados, se sugiere entonces hacer la menor siembra posible si se desea hacer uso de esta estrategia.

Como se pudo observar en cada uno de los análisis mostrados, los resultados continúan siendo muy parecidos, lo cual es un resultado que es anti-intuitivo pero que demuestra que, para esta población, sin importar la estrategia planteada los resultados no van a tener un cambio significativo de una estrategia a otra o frente al escenario base, esto pudiese indicar que la población no es sensible ante incentivos que se entreguen para promover la difusión sin importar la forma en que sean sembrados, pues sin importar la forma en que los incentivos se entreguen el resultado es similar.

8. Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se presentan las conclusiones del trabajo realizado y se resalta el cumplimiento de cada objetivo planteado, finalmente se enuncian las recomendaciones y los posibles nuevos trabajos a desarrollar en el futuro.

8.1 Conclusiones Objetivo específico 1

“Identificar y seleccionar los factores clave para modelar la difusión de los taxis eléctricos en Colombia.”

Los resultados de estudio encontrados en los capítulos 1, 2 y 3 de este trabajo, donde se desarrolla el análisis de la problemática, el marco teórico y la revisión de la literatura, permiten abordar a partir de diferentes preguntas, con las que se identificaron y comprendieron los factores clave que se usarían del modelo de referencia, ajustar y parametrizar el modelo de simulación explicado en el capítulo 6.

A partir de lo anterior, es posible afirmar que se dio cumplimiento al primer objetivo específico; Se analizaron los aspectos teóricos requeridos para estudiar la difusión de taxis eléctricos en Colombia y las estrategias para incentivar la difusión de estos. Además de eso, se lograron los siguientes aportes y logros:

- Dar cuenta sobre la información existente y requerida para analizar la difusión de vehículos eléctricos en la población de taxistas.
- Plantear explícitamente los vacíos, limitaciones y problemas vigentes en las líneas de investigación para dar pie a investigaciones futuras.
- Identificar las brechas en las investigaciones actuales con el fin de sugerir nuevas áreas de investigación.

- Identificar algunos problemas pendientes de solución que pueden ser el punto inicial de investigaciones futuras.

8.2 Conclusiones Objetivo específico 2

“Parametrizar el modelo de simulación de la difusión de los taxis eléctricos en Colombia.”

En el Capítulo 6 de este trabajo se definió, con base en las encuestas realizadas, la parametrización del modelo de simulación basado en agentes, para esto se perfiló la forma en que los agentes deciden, con base en el marco general del Consumat, según cuatro estrategias diferentes: repetir, imitar, optimizar e indagar. En este esquema sólo pueden adoptar los agentes que imitan, optimizan e indagan bajo condiciones específicas. En el mismo capítulo 6 se presentan los valores obtenidos de los parámetros del modelo para la población en estudio.

El modelo de simulación basado en agentes, aplicado en este trabajo una vez ajustados los parámetros del entorno y características de los agentes, hace parte de los modelos que se han usado para estudiar el efecto del comportamiento del consumidor en la adopción de tecnologías como los taxis eléctricos, integra herramientas para el modelado de vanguardia de varios dominios de investigación. Estos elementos evidencian el cumplimiento del objetivo establecido.

8.3 Conclusiones Objetivo específico 3

“Usar un modelo de simulación para analizar la difusión de los taxis eléctricos en Colombia.”

En el Capítulo 7 se presentó el análisis de los resultados del problema base, así como las estrategias que usan los agentes para tomar decisiones al inicio de la simulación, en el mismo Capítulo 7 se mostró el análisis de los resultados obtenidos con la simulación de las diferentes estrategias de influencia social evaluadas según la metodología propuesta.

Los principales aportes logrados con el cumplimiento de este objetivo son:

- El análisis y evaluación de estrategias, antes de su implementación, en un ambiente complejo y de alta incertidumbre para dar algunas pistas respecto a los resultados esperados de cada una. Esto permite ayudar a soportar las decisiones sobre las

estrategias a seleccionar para incentivar el transporte de pasajeros con vehículos eléctricos.

- Al comparar las diferentes estrategias planteadas en este trabajo, según los criterios definidos para esto, permitió análisis objetivo y libres de sesgos.
- Se encontraron evidencias sobre el potencial de diferentes estrategias para modificar el patrón de la difusión de taxis eléctricos y reducir las emisiones de CO₂.

8.4 Conclusiones Objetivo general

“Evaluar estrategias para incentivar la difusión de taxis eléctricos en Colombia.”

En el Capítulo 7 se desarrolla la evaluación y comparación de las diferentes estrategias planteadas para la difusión de taxis eléctricos en Colombia. Además, el logro de cada uno de los objetivos específicos garantiza el cumplimiento del objetivo general propuesto para esta investigación.

Según lo evaluado con las estrategias simuladas, es posible concluir que, para el caso presentado en este trabajo, no existe una mejor estrategia que presente una mayor cantidad de adoptantes a la vez que reduce las toneladas de CO₂ emitidas comparado con respecto al escenario base.

Lo anterior demuestra que, para esta población, sin importar la estrategia planteada, los resultados continuaran siendo muy parecidos, esto pudiese indicar que la población no es sensible ante los incentivos que se entregan para promover la difusión sin importar la forma en que sean sembrados, pues el resultado es similar en cualquiera de los casos planteados.

8.5 Recomendaciones y Trabajos Futuros

En este trabajo se compararon las diferentes estrategias en función del número de adoptadores y la reducción de toneladas de CO₂, sin embargo, valdría la pena analizar los costos de la implementación de cada estrategia. En la realidad al seleccionar alguna de las estrategias es necesario considerar no sólo el número de adoptantes y su impacto en

la contaminación sino también todos los costos en que tendría que incurrir un taxista para ejecutar la estrategia.

Otros trabajos futuros derivados de esta investigación pueden ser:

- Establecer en qué momento del horizonte simulado es mejor aplicar la estrategia definida, en este trabajo cada estrategia fue aplicada al iniciar la simulación.
- Evaluar el impacto de la difusión de los taxis eléctricos sobre el sistema eléctrico colombiano.
- Finalmente, el estudio de la difusión de taxis eléctricos, al igual que cualquier estudio de difusión de innovaciones, necesita comprender de manera efectiva las preferencias de los agentes a modelar, por lo cual siempre hay terreno en el que se puede explorar y mejorar.

A. Anexo: Preguntas usadas para parametrizar los componentes del modelo

En la Tabla A-1 se presentan las preguntas realizadas para obtener la información relacionada con la parametrización del modelo utilizado en este trabajo. La base de esta encuesta fue tomada del trabajo de Ardila y otros (2020), se modificaron los rangos de edad y de los km que se conducen con el carro cada año, también se omitió la pregunta de qué servicio presta el carro dado que la encuesta fue aplicada únicamente a población de taxistas, las demás preguntas que corresponden al levantamiento de los valores de los factores de decisión y de autorización del uso de los datos se conservaron iguales.

Tabla A-1. Preguntas usadas para parametrizar los componentes del modelo

Propósito de la pregunta	Descripción de la pregunta
Información demográfica	Sexo
	¿Tiene hijos?
	Rango de edad
	Estrato
	Máximo nivel de escolaridad
Estado actual	¿Cuántos carros hay en su hogar?
	¿En su vivienda o edificio tiene acceso a un parqueadero permanente?
	La marca es
	El modelo (año) es
	El cilindraje es
	¿Qué combustible usa?
	¿Qué servicio presta su carro?
¿Cuántos Km se conducen con este carro cada año?	

Propósito de la pregunta	Descripción de la pregunta
Pesos Conformidad, Anticonformidad	Me gusta tener un producto innovador que me distinga de otros que aún no poseen este producto
	Me gusta usar productos innovadores que impresionen a otras personas
	Me gusta comprar productos cuando ya los poseen los demás
Pesos de importancia relativa	Considero entre mis prioridades las condiciones de equidad e igualdad para todos y me preocupo constantemente por la justicia social y el cuidado de los débiles
	Me gusta ocupar cargos en los que sea yo quien coordine equipos de trabajo, donde sea posible delegar en otras personas algunas actividades.
	Para mí es muy importante satisfacer mis deseos, disfrutar la vida, hacer cosas que me gustan y que me generan placer
	Considero entre mis principales motivaciones el dinero, la riqueza y las posesiones materiales
	Proteger el medio ambiente, mantener de la calidad ambiental y la naturaleza son principios en mi vida, por eso implemento actividades para prevenir la contaminación y proteger los recursos naturales
Ambición	Soy una persona con ambiciones y aspiraciones; que trabaja y se esfuerza por alcanzarlas
Conocimiento de la tecnología	Tengo conocimiento de tecnologías alternativas para carros
	Sé cuáles son los posibles beneficios y desventajas de tecnologías alternativas para carros en comparación con los carros a gasolina
	Puedo explicar a otros qué diferencias existen entre las tecnologías alternativas para carros y los carros de gasolina (por ejemplo, en impacto ambiental y funcionalidad)
Nivel de tolerancia a la incertidumbre	Me gustan los nuevos desarrollos tecnológicos y me arriesgaría a ser uno de los primeros en comprar un carro eléctrico, aunque la relación beneficio-costó no sea muy buena
	Veó los beneficios potenciales de los carros eléctricos y quisiera ser uno de los primeros en usar y sacar provecho de estos sólo si la relación beneficio-costó es buena

Propósito de la pregunta	Descripción de la pregunta
	Me gustan los carros eléctricos, pero también soy pragmático. Quiero tomarme el tiempo para considerar todos los aspectos y convencerme de los beneficios que brindan
	No soy particularmente entusiasta con las innovaciones, y prefiero estar seguro de mis decisiones. Pienso que sólo se vuelve seguro comprar carros eléctricos una vez que han estado en el mercado por un tiempo y tienen beneficios obvios
	Soy tradicional y tengo poca afinidad con los carros eléctricos. Pienso que los instalaría sólo cuando ya no pueda comprar un carro tradicional
Actitud	Personas similares a mi deberían hacer cualquier cosa que esté a su alcance para preservar el medio ambiente
	"Una golondrina no hace verano". De nada vale que yo cuide el medio ambiente si los demás no lo hacen
	En mi hogar hacemos separación de basuras para contribuir al reciclaje
	Prefiero usar el sistema de transporte público (como bus o metro) que el sistema de transporte particular (como moto o carro) para movilizarme en la ciudad
	Soy consciente de mi consumo de agua, y he implementado acciones para reducirlo
	Soy consciente de mi consumo de electricidad, y constantemente implemento acciones para reducirlo
	El cuidado del medio ambiente es responsabilidad exclusiva del gobierno y las instituciones. Los ciudadanos no tienen el poder suficiente para lograr grandes cambios en este sentido
	En general, me preocupa el futuro del medio ambiente
	En general, creo que el medio ambiente está bien como está
	En general, creo que yo soy una persona ambientalmente amigable
Información sobre interés en la tecnología	Si resulta económico, yo estaría dispuesto a comprar un carro eléctrico para movilizarme

Propósito de la pregunta	Descripción de la pregunta
	Si resulta ambientalmente amigable, yo estaría dispuesto a comprar un carro eléctrico para movilizarme
Máxima inversión	Yo estaría dispuesto a comprar un carro eléctrico si su costo estuviera en el siguiente rango
Mínimos ahorros	Yo estaría dispuesto a comprar un carro eléctrico si tuviera un ahorro mínimo mensual en mis gastos de transporte de:
Autonomía mínima requerida	¿Cuántos son los kilómetros mínimos que usted necesitaría que un carro eléctrico recorriera una vez que ha cargado las baterías completamente?
Tiempo máximo disponible	Por favor indique el tiempo máximo disponible que usted tendría para cargar la batería de un carro eléctrico
Satisfacción con la tecnología actual	Si fuera posible elegir otra forma de transportarme me cambiaría
	Considero que el precio del combustible que uso actualmente es adecuado
	La forma en que me transporto actualmente es ambientalmente amigable
	Me veo afectado por la mala calidad del aire debida al tráfico
Recomendación	¿Recomendaría a sus conocidos comprar un carro eléctrico para moverse?
Autorización	AUTORIZA usted o NO a usar la información entregada para efectos de investigación.
Correo	Por favor, ingrese su email. (Información requerida únicamente para efectos de nuestro registro interno)

Fuente: Tomada del trabajo de Ardila y otros (2020).

La forma de obtener cada uno de los valores iniciales de los parámetros usados en el modelo es:

- **Pesos anticonformidad θ_{1i} y conformidad θ_{2i}**

Sean:

X_{1i} =Me gusta tener un producto innovador que me distinga de otros que aún no poseen este producto

X_{2i} = Me gusta usar productos innovadores que impresionen a otras personas

$X3i$ = Me gusta comprar productos cuando ya los poseen los demás

$X1i, X2i, X3i \in [1,7]$ donde i representa cada encuestado

$$\theta_{1i} = \frac{\frac{X_{1i} + X_{2i}}{2}}{\frac{X_{1i} + X_{2i}}{2} + X_{3i}} \quad y \quad \theta_{2i} = \frac{X_{3i}}{\frac{X_{1i} + X_{2i}}{2} + X_{3i}}$$

- **Pesos sociales ω_{1i} , funcional ω_{2i} , financiero ω_{3i} y ambiental ω_{4i}**

Sean:

$X1i$ =Considero entre mis prioridades las condiciones de equidad e igualdad para todos y me preocupo constantemente por la justicia social y el cuidado de los débiles

$X2i$ =Me gusta ocupar cargos en los que sea yo quien coordine equipos de trabajo, donde sea posible delegar en otras personas algunas actividades.

$X3i$ =Para mí es muy importante satisfacer mis deseos, disfrutar la vida, hacer cosas que me gustan y que me generan placer

$X4i$ =Considero entre mis principales motivaciones el dinero, la riqueza y las posesiones materiales

$X5i$ =Proteger el medio ambiente, mantener de la calidad ambiental y la naturaleza son principios en mi vida, por eso implemento actividades para prevenir la contaminación y proteger los recursos naturales

$X1i, X2i, X3i, X4i, X5i \in [1,7]$ donde i representa cada encuestado

$$\omega_{1i} = \frac{\frac{X_{1i} + X_{2i}}{2}}{\frac{X_{1i} + X_{2i}}{2} + X_{3i} + X_{4i} + X_{5i}} \quad \omega_{2i} = \frac{X_{3i}}{\frac{X_{1i} + X_{2i}}{2} + X_{3i} + X_{4i} + X_{5i}}$$

$$\omega_{3i} = \frac{X_{4i}}{\frac{X_{1i} + X_{2i}}{2} + X_{3i} + X_{4i} + X_{5i}} \quad \omega_{4i} = \frac{X_{5i}}{\frac{X_{1i} + X_{2i}}{2} + X_{3i} + X_{4i} + X_{5i}}$$

- **Conocimiento Q_i**

Sean:

$X1i$ =Tengo conocimiento sobre la innovación energética limpia (según el caso)

$X2i$ =Sé cuáles son los posibles beneficios y desventajas de la innovación energética limpia en comparación con la tecnología tradicional

X_{3i} =Puedo explicar a otros qué diferencias existen entre la innovación energética limpia y la tecnología convencional (por ejemplo, en impacto ambiental y funcionalidad)

$X_{1i}, X_{2i}, X_{3i} \in [1,7]$ donde i representa cada encuestado

$$Q_i = \frac{X_{1i} + X_{2i} + X_{3i}}{21}$$

- **Ambición A_i**

Sea:

X_{1i} =Soy una persona con ambiciones y aspiraciones; que trabaja y se esfuerza por alcanzarlas

$X_{1i} \in [1,7]$ donde i representa cada encuestado

$$A_i = \frac{X_{1i}}{7}$$

- **Tolerancia incertidumbre T_k**

Según la selección de cada encuestado i , el nivel de tolerancia a la incertidumbre está definido así

Opción de respuesta	T_i
Me gustan los nuevos desarrollos tecnológicos y me arriesgaría a ser uno de los primeros en comprar una innovación energética limpia, aunque la relación beneficio-costos no sea muy buena	1
Ve los beneficios potenciales de las innovaciones energéticas limpias y quisiera ser uno de los primeros en usar y sacar provecho de estas sólo si la relación beneficio-costos es buena	0.8
Me gustan las innovaciones energéticas limpias, pero también soy pragmático. Quiero tomarme el tiempo para considerar todos los aspectos y convencerme de los beneficios que brindan	0.6
No soy particularmente entusiasta con las innovaciones, y prefiero estar seguro de mis decisiones. Pienso que sólo se vuelve seguro comprar una innovación energética limpia una vez que han estado en el mercado por un tiempo y tienen beneficios obvios	0.4
Soy tradicional y tengo poca afinidad con las innovaciones energéticas limpias. Pienso que los adquiriría sólo cuando ya no pueda comprar la tecnología tradicional	0.2

Referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2011). *Decreto 677 de 2011*.
<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=45175>
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2012). *Decreto 407 de 2012 Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C.*
<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=48996&dt=S>
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2013). *Decreto 376 de 2013*.
<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=54408&dt=S>
- Alguacil, M. (2016). *Así funciona un freno capaz de generar energía. Movimiento Eléctrico*. <https://corrienteelectrica.renault.es/asi-funciona-freno-capaz-generar-energia/>
- ANDEMOS. (2021a). *Informe Vehículos HEV, PHEV y BEV Mayo 2021*.
- ANDEMOS. (2021b). *Informe Vehículos Mayo 2021*.
- Ardila, L. A., Franco, C. J., & Cadavid, L. (2020). *Metodología para evaluar el impacto de estrategias orientadas a incentivar la difusión de innovaciones energéticas limpias a partir de la influencia social*. 248. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78451>
- Arias-Gaviria, J., Carvajal-Quintero, S. X., & Arango-Aramburo, S. (2019). Understanding dynamics and policy for renewable energy diffusion in Colombia. *Renewable Energy*, 139, 1111–1119. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.02.138>
- Asociación nacional de movilidad sostenible. (2022). *Informe Vehículos HEV, PHEV y BEV DICIEMBRE*. <https://www.andemos.org/index.php/2022/01/07/diciembre-10/>
- BBVA. (2022). *Cuál es la autonomía de un coche eléctrico: claves para su uso*. Retrieved July 20, 2022, from <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/cual-es-la-autonomia-de-un-coche-electrico-claves-para-su-uso/>
- Bischoff, J., & Maciejewski, M. (2014). Agent-based Simulation of Electric Taxicab Fleets. *Transportation Research Procedia*, 4, 191–198.
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.11.015>
- Bischoff, J., & Maciejewski, M. (2015). Electric Taxis in Berlin – Analysis of the Feasibility of a Large-Scale Transition. In *Communications in Computer and Information Science* (Vol. 531). https://doi.org/10.1007/978-3-319-24577-5_15
- Boons, F., & McMeekin, A. (2019). *Handbook of sustainable innovation*. 374.
<https://www.e-elgar.com/shop/usd/handbook-of-sustainable-innovation-9781788112567.html>

- Cadavid, D. L. (2015). *Aproximación metodológica al análisis de la difusión de innovaciones en productos que utilizan tecnologías limpias considerando elecciones individuales de adopción*. 347. <http://www.bdigital.unal.edu.co/47098/>
- Concejo de Bogotá. (2015). *Acuerdo 619 de 2015*.
<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=63089&dt=S>
- Concejo de Bogotá. (2018). *Acuerdo 732 de 2018*.
<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=82132&dt=S>
- DANE. (2017). Boletín Técnico Resultados PIB departamental 2016. *Marco Geoestadístico Nacional*, 1.
http://sige.dane.gov.co/atlasestadistico/Tomo_III_Economico/mapa/7.1_ValorAgregadoPorGrandesRamasActividadSegunDpto_2010_conPIB.pdf
- Departamento Nacional de Planeación. (2018). *Calidad del aire: una prioridad de política pública en Colombia*. <https://www.dnp.gov.co/Paginas/Calidad-del-aire-una-prioridad-de-politica-publica-en-Colombia.aspx>
- Deyang, K., Dan, M., & Minmin, W. (2016). A Simulation Study of Upgrading Urban Gasoline Taxis to Electric Taxis. *Energy Procedia*, 104, 390–395.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.066>
- Ebrie, A. S., & Kim, Y. J. (2022). *Investigating Market Diffusion of Electric Vehicles with Experimental Design of Agent-Based Modeling Simulation*. <https://www.scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85125909695&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=bd77933712779701a10e2ccd6efd257d&sot=a&sdt=a&cluster=scosubjabbr%252C%2522ENGI%2522%252Ct%252C%2522ENER%2522%252Ct%252C%2522COMP%2522%252Ct%252C%2522SOCI%2522%252>
- El Colombiano. (2019). *Cooperativas De Taxistas | La caja registradora*.
<https://www.elcolombiano.com/blogs/lacajaregistradora/tag/cooperativas-de-taxistas>
- EL CONGRESO DE COLOMBIA. (2019). *Ley 1964 de 2019*.
<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=85510&dt=S>
- EL PAIS. (2021). *Diseño, movilidad y conciencia: Suzuki Swift Híbrido, el carro ecológico al alcance de todos*. <https://www.elpais.com.co/informacion-comercial/disenomovilidad-y-conciencia-suzuki-swift-hibrido-el-carro-ecologico-al-alcance-de-todos.html>
- Electromaps. (2022). *Estaciones de carga en Colombia*.
<https://www.electromaps.com/es/puntos-carga/colombia>
- Ensslen, A., Will, C., & Jochem, P. (2019). Simulating Electric Vehicle Diffusion and Charging Activities in France and Germany. *World Electric Vehicle Journal 2019*, Vol. 10, Page 73, 10(4), 73. <https://doi.org/10.3390/WEVJ10040073>
- Fluchs, S. (2020). The diffusion of electric mobility in the European Union and beyond. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 86, 102462.
<https://doi.org/10.1016/J.TRD.2020.102462>

- García Arbelaez, C., Barrera, X., Gómez, R., & Suárez Castaño, R. (2015). *EL ABC DE LOS COMPROMISOS DE COLOMBIA PARA LA COP21*. 32. http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/colombia_hacia_la_CO_P21/ABC_de_los_Compromisos_de_Colombia_para_la_COP21_VF.pdf
- Georgescu, S., & Okuda, H. (2008). A Distributed Multi-Agent Framework for Simulating the Diffusion of Innovations. *Journal of Power and Energy Systems*, 2(6), 1320–1332. <https://doi.org/10.1299/JPES.2.1320>
- Girard, A., Roberts, C., Simon, F., & Ordoñez, J. (2019). Solar electricity production and taxi electrical vehicle conversion in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 210, 1261–1269. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.092>
- Gnann, T., Funke, S., Jakobsson, N., Plötz, P., Sprei, F., & Bennehag, A. (2018). Fast charging infrastructure for electric vehicles: Today's situation and future needs. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62(March), 314–329. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.03.004>
- Hagman, J., & Langbroek, J. H. M. (2019). Conditions for electric vehicle taxi: A case study in the Greater Stockholm region. *International Journal of Sustainable Transportation*, 13(6), 450–459. <https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1481547>
- Hardman, S., Jenn, A., Tal, G., Axsen, J., Beard, G., Daina, N., Figenbaum, E., Jakobsson, N., Jochem, P., Kinnear, N., Plötz, P., Pontes, J., Refa, N., Sprei, F., Turrentine, T., & Witkamp, B. (2018). A review of consumer preferences of and interactions with electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62(April), 508–523. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.04.002>
- Hörl, S., Becker, F., & Axhausen, K. W. (2021). Simulation of price, customer behaviour and system impact for a cost-covering automated taxi system in Zurich. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 123(January). <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.102974>
- Huang, X., Lin, Y., Zhou, F., Lim, M. K., & Chen, S. (2021). Agent-based modelling for market acceptance of electric vehicles: Evidence from China. *Sustainable Production and Consumption*, 28, 206–217. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2021.04.007>
- IDEAM. (2016). *Informe del estado del aire en Colombia* (Vol. 14, Issue 1). http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023637/Informe_del_Estado_de_la_Calidad_del_Aire_en_Colombia_2011-2015_vfinal.pdf%0Ahttp://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-imageviewer.pl?biblionumber=38104
- Jansson, J., Pettersson, T., Mannberg, A., Brännlund, R., & Lindgren, U. (2017). Adoption of alternative fuel vehicles: Influence from neighbors, family and coworkers. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54, 61–73. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2017.04.012>
- Jiang, C. X., Jing, Z. X., Cui, X. R., Ji, T. Y., & Wu, Q. H. (2018). Multiple agents and reinforcement learning for modelling charging loads of electric taxis. *Applied Energy*,

- 222(November 2017), 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.164>
- Kang, S. C., & Lee, H. (2019). Economic appraisal of implementing electric vehicle taxis in Seoul. *Research in Transportation Economics*, 73(November 2018), 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2018.11.007>
- Kettles, D., Solar, F., Raustad, R., Dunn, M. D., Block, D., Harrison, J., Dunn, M. D., Napolitano, F., Tossani, F., Borghetti, A., Nucci, C. A., Martinez, M. L. B., Lopes, G. P., Santos, G. J. G. Dos, Fagundes, D. R., Wu, X., Hu, X., Moura, S., Yin, X., ... Brooker, D. P. (2016). Electric Vehicle Sales and Future Projections. *Applied Energy*, 168(January), 434–443. <http://fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/fsec-cr-1987-14.pdf%5Cnhttp://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916300988%5Cnhttp://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.09.157%5Cnhttp://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2015.11.019>
- Liang, Y., & Zhang, X. (2018). Battery swap pricing and charging strategy for electric taxis in China. *Energy*, 147, 561–577. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.082>
- Liu, H. C., You, X. Y., Xue, Y. X., & Luan, X. (2017). Exploring critical factors influencing the diffusion of electric vehicles in China: A multi-stakeholder perspective. *Research in Transportation Economics*, 66, 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2017.10.001>
- Martinez, A. (2007). *Motores De Combustion Interna*.
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Resolución 40223 de 2021*. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=114758&dt=S>
- Ministerio de Transporte. (2020). *Resolución 20203040003625 de 2020*. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=93335&dt=S>
- Montalvo, C., & Kemp, R. (2008). Cleaner technology diffusion: case studies, modeling and policy. *Journal of Cleaner Production*, 16(1 SUPPL. 1), S1–S6. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.06.005>
- Moon, H. Bin, Park, S. Y., Jeong, C., & Lee, J. (2018). Forecasting electricity demand of electric vehicles by analyzing consumers' charging patterns. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62(February), 64–79. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.02.009>
- Naciones Unidas. (2021). *Cambio climático*. <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>
- Noticias Vital. (2019). *LOS TAXIS QUE FUNCIONAN A GAS NATURAL NO DEBERÍAN TENER PICO Y PLACA. - NOTICIAS VITAL*. <http://noticiasvital.com/2019/08/15/los-taxis-que-funcionan-a-gas-natural-no-deberian-tener-pico-y-placa/>
- Novizayanti, D., Prasetio, E. A., Siallagan, M., & Santosa, S. P. (2021). Agent-Based Modeling Framework for Electric Vehicle Adoption Transition in Indonesia. *World Electric Vehicle Journal 2021, Vol. 12, Page 73, 12(2), 73*. <https://doi.org/10.3390/WEVJ12020073>
- Oliveira, L., Ulahannan, A., Knight, M., & Birrell, S. (2020). Wireless charging of electric

- taxis: Understanding the facilitators and barriers to its introduction. *Sustainability (Switzerland)*, 12(21), 1–21. <https://doi.org/10.3390/su12218798>
- Revista Turbo. (2019). *Medellín estrena su primer taxi 100% eléctrico*. <https://www.revistaturbo.com/noticias/medellin-estrena-su-primer-taxi-100-electrico-1776>
- Rodríguez Sarmiento, C. E. (2019). *TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN ENERGÍA DIRECTOR: YECID ALFONSO MUÑOZ MALDONADO Ph. D CODIRECTOR:*
- Rogers, E. M. (1976). New Product Adoption and Diffusion. *Journal of Consumer Research*, 2(4), 290–301. <https://doi.org/10.1086/208642>
- Rojas, N. Y. (2019). *Aire y problemas ambientales de Bogotá*.
- Sarmiento-Delgado, F., Clairand, J. M., Guerra-Teran, P., & Escriva-Escriva, G. (2019). Electric Vehicle Charging Load Prediction for Private Cars and Taxis Based on Vehicle Usage Data. *IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON 2019*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/CHILECON47746.2019.8988007>
- Scorrano, M., Danielis, R., & Giansoldati, M. (2020). Mandating the use of the electric taxis: The case of Florence. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 132(October 2019), 402–414. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.11.018>
- Secretaría Distrital de Hacienda. (2019). *Concepto 1260 de 2019*. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=88429&dt=S>
- Secretaría Distrital de Movilidad. (2012). *Resolución 324 de 2012*. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=50780&dt=S>
- Secretaría Jurídica Distrital. (2020). *Circular 006 de 2020*. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=90756&dt=S>
- Shi, Y., Feng, D., Yu, S., Fang, C., Li, H., & Zhou, Y. (2022). The projection of electric vehicle population growth considering scrappage and technology competition: A case study in Shanghai. *Journal of Cleaner Production*, 365, 132673. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.132673>
- Soltani-Sobh, A., Heaslip, K., Stevanovic, A., Bosworth, R., & Radivojevic, D. (2017). Analysis of the Electric Vehicles Adoption over the United States. *Transportation Research Procedia*, 22, 203–212. <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2017.03.027>
- Sumasto, F., Imansuri, F., Agus, M., Safril, & Wirandi, M. (2020). Sustainable development impact of implementing electric taxis in Jakarta: A cost-benefit analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 885(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/885/1/012027>
- Sun, L., & Lubkeman, D. (2021). Agent-Based Modeling of Feeder-Level Electric Vehicle Diffusion for Distribution Planning. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(1), 751–

760. <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3013641>

- Teixeira, A. C. R., & Sodr , J. R. (2016). Simulation of the impacts on carbon dioxide emissions from replacement of a conventional Brazilian taxi fleet by electric vehicles. *Energy*, 115, 1617–1622. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.095>
- Universidad Pontificia Bolivariana &  rea Metropolitana del Valle de Aburr . (2018). Actualizaci n inventario de emisiones atmosf ricas del Valle de Aburr -A o 2016. *Area Metropolitana Del Valle de Aburr *, 50. https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/Inventario-de-emisiones/Inventario_FuentesM viles2016.pdf
- Wang, Z., Zhang, J., Liu, P., Qu, C., & Li, X. (2019). Driving cycle construction for electric vehicles based on Markov chain and Monte Carlo method: A case study in Beijing. *Energy Procedia*, 158, 2494–2499. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.389>
- Weldon, P., Morrissey, P., & O'Mahony, M. (2018). Long-term cost of ownership comparative analysis between electric vehicles and internal combustion engine vehicles. *Sustainable Cities and Society*, 39, 578–591. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2018.02.024>
- Yang, J., Dong, J., Lin, Z., & Hu, L. (2016). Predicting market potential and environmental benefits of deploying electric taxis in Nanjing, China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 49(July 2014), 68–81. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.08.037>
- You, Y., Zhu, J., Huang, Y., & Jing, Z. (2021). Optimal Decision-Making Method for a Plug-In Electric Taxi in Uncertain Environment. *IEEE Access*, 9, 62467–62477. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3074568>
- Zhou, M., Long, P., Kong, N., Zhao, L., Jia, F., & Campy, K. S. (2021). Characterizing the motivational mechanism behind taxi driver's adoption of electric vehicles for living: Insights from China. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 144(2), 134–152. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.01.001>