Ensayo de Investigación

Un enfoque investigación-acción basado en métodos cuantitativos para el diseño de un sistema de bicicletas compartidas An action research approach based on quantitative methods for the design of a shared bike system

María del Pilar Ester Arroyo López¹, Lourdes Loza Hernández^{2*}, Karla Margarita Gámez Pérez³

¹EGADE, Business School del Tecnológico de Monterrey

²Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México

³Escuela de Ciencias e Ingeniería del Tecnológico de Monterrey campus León

Autor de correspondencia:

*llozah@uaemx.mx

Recibido: 18-04-2022 Aceptado: 12-07-2023 (Artículo Arbitrado)

Resumen

El problema de movilidad en las áreas urbanas es un tema de interés para investigadores, autoridades e instituciones encargadas de la planeación y administración de recursos. Los esquemas de bicicletas compartidas son una forma de micro movilidad de bajo impacto ambiental que varias ciudades han implementado con el fin de solucionar este problema de transporte. El objetivo de este trabajo fue diseñar un sistema de bicicletas compartidas (SBC) con el menor costo posible que represente un modo de transporte amigable con el ambiente y satisfaga las necesidades básicas de transporte urbano de los residentes de León, Guanajuato, Méx., empleando un enfoque de Investigación-Acción Participativo (IAP) sustentado en información y métodos de decisiones multi-criterio (MCDM). La aplicación de técnicas estadísticas para la recolección y análisis de datos de una encuesta aplicada a 1,243 residentes que viajan en seis de las 21 macro-áreas de la ciudad, proporcionaron información detallada al equipo tomador de decisión. Los resultados muestran que la construcción de escenarios con un enfoque científico y participativo, basados en información sobre las necesidades de los usuarios y métodos cuantitativos confiables, apoyan a la toma de decisiones en el diseño de sistemas de transporte sustentable.

Palabras clave: Investigación-Acción Participativo, métodos de decisiones multi-criterio, sistema de bicicletas compartidas, métodos cuantitativos, transporte sostenible.

Abstract

The problem of mobility in urban areas is a topic of interest for researchers, authorities, and institutions in charge of planning and managing resources. Shared bike schemes are a form of micro mobility with low environmental impact that several cities have implemented in order to solve this transport problem. The objective of this work was to design a shared bicycle system (SBC) with the lowest possible cost that represents an environmentally friendly mode of transportation and satisfies the basic urban transportation needs of the residents of León, Guanajuato, Mex., using a Participatory Action Research (PAR) approach based on information and multi-criteria decision methods (MCDM). The application of statistical techniques for the collection and analysis of data from a survey applied to 1,243 residents, who travel in six of the 21 macro-areas of the city, provided detailed information to the decision-making team. The results show that the construction of scenarios with a scientific and participatory approach, based on information on user needs and reliable quantitative methods, supports decision-making in the design of sustainable transport systems.

Keywords: Participatory Action Research, multi-criteria decision methods, shared bicycle system, quantitative methods, sustainable transport system.

Introducción

Actualmente, más del 50 % de la población mundial vive en áreas urbanas, esperándose que para el 2045 el porcentaje se incremente 1.5 veces (World Bank, 2023). El crecimiento exponencial de las áreas urbanas exige de las autoridades locales una buena planeación de servicios básicos, entre ellos el transporte urbano. Las deficiencias en los sistemas de transporte urbano de varios países, especialmente aquellos

en desarrollo, hace de la planeación del transporte un problema prioritario (Marsanic y Krpan, 2015). El tráfico es una de las consecuencias más fuertes de las deficiencias del transporte urbano, el cual incrementa los costos de transporte, el tiempo perdido y la contaminación ambiental, afectando negativamente el bienestar de las personas (Wamburu, Hajiesmaili, Irwin, Shenoy, 2021).

Los esquemas de bicicletas compartidas son una forma de micro movilidad que varias ciudades han visualizado como solución al problema del transporte urbano de las personas debido a su bajo impacto ambiental (Ma, Yuan, Van Oort, Hoogendoorn, 2020). Entre los sistemas de bicicletas compartidas (SBC) el tipo más popular es el sistema público debido al costo de inversión y los posibles subsidios para su operación. Esta clase de SBC ofrece una alternativa para la primera/última parte de un recorrido si se integra apropiadamente con el sistema de transporte urbano existente. Actualmente, el número de programas de bicicleta compartida que operan en el mundo es de 1684, con una disponibilidad total de casi 9 millones de bicicletas (The Meddin Bike-sharing World Map, 2022). En Estados Unidos de América y China operan la mayor parte de los SBC con estaciones fijas (las personas pueden tomar y regresar una bicicleta en la estación que más les convenga), y también la nueva generación de SBC sin estaciones que permite al usuario dejar la bicicleta en el lugar donde termina su viaje.

Los países latinoamericanos muestran un retraso relativo en la implementación de SBC (Binatti, Decastro, Batahla, 2020; Si, Shi, Wu, Chen, Zhao, 2019). En el caso de México, algunas de las ciudades principales -Ciudad de México, Guadalajara, Puebla, Querétaro, Puebla y Toluca- han implementado SBC, no todas con éxito. El sistema ECOBICI en la ciudad de México es el SBC más grande y exitoso de Latinoamérica, con 4982 bicicletas y 472 estaciones (The Meddin Bike-sharing World Map, 2022). Entre las dificultades para la implementación de un SBC eficaz están las restricciones presupuestales para los proyectos de transporte y la planeación del sistema tomando en consideración los factores que favorecen o inhiben su uso. Entre los factores críticos que influyen en el uso de bicicletas compartidas se citan una buena infraestructura, la integración del SBC con el sistema de transporte público, el nivel de servicio, la seguridad de las ciclovías, la ubicación de estaciones en áreas de alta movilidad y con nivel socioeconómico bajo, una actitud positiva hacia el uso de bicicletas y políticas públicas que apoyen este modo de transporte sustentable (Bao, Xu, Liu, Wang, 2017; Ricci, 2015).

El objetivo de este trabajo es argumentar la conveniencia de aplicar un enfoque de Investigación-Acción Participativo para el diseño del proyecto de

SBC en la ciudad de León, Guanajuato y revisión de los planes iniciales del proyecto para recomendar modificaciones que consideren las restricciones de presupuesto, infraestructura, perfiles, necesidades y patrones de viaje de los usuarios potenciales de las bicicletas compartidas. En este tipo de proyecto de colaboración participan directamente investigadores que aportan conocimientos científicos y tecnológicos y las autoridades municipales que autorizarán y administrarán el SBC, identificados como los tomadores de decisiones (DM por sus siglas en inglés, *Decision Makers*), quienes aportan su experiencia y conocimientos profesionales sobre transporte. Los beneficiarios del proyecto de transporte son los residentes de la ciudad de León quienes participan indirectamente proporcionando información sobre sus patrones de viaje, características sociodemográficas e intenciones de utilizar el SBC bajo diseño.

La literatura académica sobre sistemas de bicicletas compartidas es amplia, variada y se ha incrementado con la introducción de programas de tercera generación, esto es SBC con bicicletas que se alquilan en una estación automatizada o de acoplamiento (portabicicletas especiales que bloquean la bicicleta y la liberan sólo a través de una computadora) y se pueden devolver en cualquier otra estación del mismo sistema (Teixeira, Silva, & Moura e Sá, 2021).

El diseño y operación eficiente de un SBC se ha estudiado desde la perspectiva de varias disciplinas entre las que destacan la Investigación Operativa, la Estadística y las Teorías Conductuales. Varias revisiones de la literatura sobre el tema de SBC se han publicado en los últimos años, una de las más recientes es la revisión de Si et al. (2019), quienes realizan un análisis cuantitativo de cómo ha evolucionado la producción científica sobre el tema en el período de 2010-2018. Un tópico emergente en la evolución de la investigación en SBC es la integración de tecnologías al sistema para mejorar el servicio a usuarios.

Cuatro grandes áreas de investigación surgen de esta revisión: 1) optimización del diseño y administración del SBC, 2) identificación de facilitadores (ej. estaciones cercanas a centros de transporte) y barreras (ej. inseguridad de las ciclovías) para el alquiler de bicicletas, 3) determinación de las conductas (ej. origen-destino de los viajes) y preferencias (ej. horarios de uso) de los usuarios de bicicletas compartidas, y

los beneficios sociales (ej. aumento de la actividad física) y ambientales (ej. reducción del tráfico) de los SBC, y 4) seguridad y sostenibilidad de la red de transporte público a la que se integra el SBC.

El presente trabajo se concentra en la aportación de los primeros tres temas para el diseño óptimo de un SBC y la propuesta de estrategias de promoción de este modo de transporte en la ciudad de León, una de las áreas urbanas más pobladas en la parte central de México y la ciudad más grande del estado de Guanajuato. De acuerdo con los datos del último censo oficial (INEGI, 2020) León tenía casi 2 millones de habitantes en 2020 y se pronostica que tendrá la mayor concentración de vehículos motorizados del estado, cerca de un millón, para el 2025. Dado este escenario, un SBC es un proyecto de transporte estratégico para el Gobierno Municipal de León (2018) y el Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN).

El proceso de diseño de un sistema de bicicletas compartidas

Dada la complejidad para el diseño de un SBC público, el proceso general de planeación se descompone en sub-problemas que involucren decisiones a distintos niveles. A nivel estratégico, los sub-problemas identificados son: establecer la cobertura del sistema (número de estaciones y ubicación), diseñar la red de ciclovías especificando el tipo de vías que se van a construir (desde vías de tráfico mixtas hasta ciclovías especiales protegidas y amplias), determinar el tamaño de la flota de bicicletas por estación y evaluar las ventajas/desventajas de sistemas alternos. La solución a los sub-problemas anteriores requiere de información sobre los recursos financieros disponibles, la infraestructura de transporte y la demanda esperada. El último sub-problema expone la interdependencia de las decisiones que implica el proceso de diseño del SBC. Por ejemplo, el número de bicicletas por estación se puede reducir incrementando la frecuencia del reposicionamiento; sin embargo, esta decisión táctica incrementa los costos de operación del sistema y también la cantidad de emisiones al ambiente (Ricci, 2015). Es por tanto necesario realizar concesiones para compensar el costo de la flotilla de bicicletas con los de reposicionamiento y el costo del SBC con la reducción en la cantidad de emisiones. Más aún, si se opta por un esquema de reposicionamiento estático, el cual implica reposicio-

nar el inventario de bicicletas por estación al final del día, se incrementa la probabilidad de que un usuario no encuentre bicicletas, lo que reduce la calidad del servicio del SBC.

Para completar el proceso de diseño de un SBC, este trabajo propone aplicar el método psicosocial de Investigación Acción Participativa (IAP), el cual se fundamenta en la participación de distintos agentes cuyos conocimientos, experiencia y prácticas se integran para resolver un problema de impacto social (Koshy, 2010). La IAP busca que el resultado de la investigación refleje las necesidades y preferencias de los beneficiarios o destinatarios de los proyectos propuestos por organizaciones privadas, gubernamentales y no-gubernamentales, que las decisiones que se tomen sean consensuadas, basadas en la investigación científica disponible pero también en las experiencias prácticas de los DM y la comunidad. Bajo este enfoque el investigador ya no es un experto sino un facilitador del proceso de investigación-intervención quien apoya a los responsables del proyecto a valorar las estrategias de solución guiándose en las expectativas y necesidades de los usuarios potenciales.

Siguiendo el enfoque IAP, el diseño del SBC para la ciudad de León inició con una serie de reuniones entre investigadores de diferentes disciplinas y autoridades del Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN) para plantear el proyecto de colaboración. El IMPLAN había realizado estudios previos para evaluar la factibilidad de implementar un SBC en León (IMPLAN, 2009, IMPLAN, 2013), los cuales fueron revisados y el IMPLAN aceptó recolectar información adicional sobre los patrones de viaje y motivaciones de los residentes de León para usar el SBC.

El objetivo general del proyecto se estableció como: diseñar un sistema de bicicletas compartidas al menor costo posible que represente un modo de transporte amigable con el ambiente y satisfaga las necesidades básicas de transporte urbano de los residentes de León. Derivados de este objetivo se formularon dos funciones objetivo a optimizar: el costo total del sistema y la reducción en emisiones de CO₂ alcanzada si los usuarios potenciales sustituyen el transporte motorizado por bicicletas compartidas. Las restricciones para el problema fueron los recursos disponibles y un nivel de servicio satisfactorio. Los recursos financieros se expresaron considerando el presupuesto asignado al proyecto que permitía la

apertura de un número máximo de 15 estaciones y una flotilla inicial de hasta 300 bicicletas; en tanto que el nivel de servicio se estableció para satisfacer un porcentaje de la demanda esperada.

Formulación del problema para el diseño óptimo del SBC

Los métodos de decisiones multi-criterio (MCDM por sus siglas en inglés *Multi-Criteria Decision Methods*), cuyos fundamentos provienen del área de Investigación de Operaciones, permiten considerar objetivos que pueden estar en conflicto cuando se considera el costo-beneficio de un proyecto (Rudolph, Hüe-ging, Lah, McGeever, 2015). La optimización simultánea de más de un criterio busca obtener el “mejor” valor para cada objetivo, por lo que la solución del problema no es única sino una combinación de las soluciones óptimas para cada objetivo. El conjunto de soluciones factibles al problema para las cuales la mejora en un objetivo sólo se puede lograr si decrece el valor en otro criterio con el que está en competencia se denomina Frontera Pareto. A partir del bosquejo de esta frontera de eficiencia, los DM pueden elegir aquella alternativa que les representa la mayor utilidad global.

Pocos estudios han considerado varios objetivos en el diseño de un SBC, aparte de los objetivos tradicionales de maximizar la rentabilidad o minimizar la inversión y costos operativos del proyecto (Lin y Yang, 2011; Lin, Yang, Chang, 2013). La literatura académica coincide en que los SBC benefician a los usuarios, a la sociedad y al ambiente (Zhang y Mi, 2018; Nikitas, 2019) por lo que su planeación debe considerar estos beneficios. Trabajos desarrollados por Woodcock et al., (2018), Johansson et al., (2017), Sobolevsky, Levitskaya, Chan, Postle, Kontokosta, (2018) muestran los beneficios no-monetarios del uso de la bicicleta como medio de transporte y el impacto directo en la calidad del medioambiente a través de la cuantificación de las emisiones de CO₂, también se muestra el efecto negativo que la falta de bicicletas compartidas tiene en los tiempos y costos de viaje, el ahorro de combustible, las emisiones ambientales y la actividad física de los usuarios.

Lo anterior apoya la propuesta de realizar un análisis costo-beneficio para diseñar el SBC para León, que compare los costos de inversión y operación del proyecto con los beneficios que éste genera, a través

de un modelo de optimización multi-criterio con dos objetivos:

- 1) Minimizar una función de costo que incluye los costos de la inversión inicial para la construcción de la red de ciclovías y estaciones del SBC, los costos de su operación en el primer año y el costo de la demanda insatisfecha (porcentaje de viajes que no se pueden completar por falta de bicicletas disponibles) y,
- 2) Maximizar una segunda función que expresa la reducción en emisiones de CO₂. Esta última función es una variable proxy del beneficio ambiental y de salud pública del SBC que depende de las tasas de sustitución de modos de transporte motorizado por bicicletas.

La función de costos se definió utilizando datos secundarios, detalles sobre su cálculo están reportados en el trabajo de Gámez-Pérez, Arroyo-López, Gaytán-Iniestra (2019). Para especificar la función correspondiente a la reducción de kg de CO₂ anuales se generó información primaria sobre la tasa de sustitución de diferentes modos de transporte por la bicicleta compartida. La reducción en emisiones de CO₂ se calculó considerando el ciclo de vida de las emisiones para diferentes vehículos (Cherry, Weinert, Xinmiao, 2009), agregándose sobre el total de viajes que un usuario estima que realizará en bicicleta en vez de un modo de transporte motorizado y tomando en cuenta la distancia promedio recorrida. La información primaria se obtuvo a partir de encuestas realizadas a residentes de León, en noviembre-diciembre del 2018. La cantidad de emisiones de CO₂ se expresó en g por pasajero por km recorrido (g/pkm); estas cantidades corresponden según la US Environmental Protection Agency (nd) a 204 g/pkm para el automóvil, 60.5 g/pkm para el autobús y 150 g/pkm para la motocicleta. La solución al problema de optimización bi-objetivo define simultáneamente el número y localización de las estaciones y la red de ciclovías que las conectan (Gámez-Pérez, et al. 2019). La demanda por estación se asumió determinística durante el período de planeación y las ubicaciones potenciales para las estaciones lo establecieron las autoridades municipales tomando en cuenta la infraestructura disponible y la posibilidad de construir nuevas ciclovías sin afectar el tráfico y el uso del sue-

lo. La encuesta a residentes permitió además generar la matriz origen-destino (OD), la cual refleja las necesidades de movilidad de los usuarios y es una entrada clave para establecer la ubicación de las estaciones de bicicletas. La distancia entre estaciones para todos los posibles pares, se calculó usando Google maps.

Para simplificar el problema de optimización formulado, se asumió un reposicionamiento estático de las bicicletas. Aunque se espera variación en el número de bicicletas disponibles por estación, como todas estarán localizadas cerca de centros con alto tráfico, es razonable asumir que la variación será lo bastante baja (menor al 30 %) como para no afectar el diseño de lo que se considera un SBC piloto (Gámez-Pérez et al., 2019). La función de costos incluyó el costo de reposicionar las bicicletas después de las horas pico y al final del día como parte de los costos de operación. Finalmente, dadas las restricciones de presupuesto, es de esperar que no todos los viajes en bicicleta se puedan completar, por lo que se propuso un límite inferior para el porcentaje de viajes no-satisfechos.

Como se esperaba, la función de costo se incrementa cuando no existe una ciclovía disponible que conecte dos estaciones. Sin embargo, el número de viajes en bicicleta compartida aumenta si se conectan estaciones con alta demanda, lo que repercute en mayores beneficios ambientales y sociales. La solución de menor costo corresponde a un SBC con el límite preestablecido de 15 estaciones y capacidad para 907 viajes diarios que satisfaría el 48 % de la demanda esperada. El costo de este sistema es de 5,575,350 USD para su primer año de operación y reduciría las emisiones de CO₂ en 255,064 kg por año. En contraste, el SBC que maximiza la segunda función objetivo ubica las 15 estaciones en áreas cercanas a centros de transbordo principales que no están actualmente conectados por ciclovías. Este SBC implica una inversión de 7,283,395 USD pero tiene capacidad para completar 1171 viajes por día lo que permitiría cubrir un 62 % de la demanda esperada. Adicionalmente, este SBC alterno reduciría en 41.871 kg extra las emisiones de CO₂ por año. Aquí es importante remarcar que la reducción en emisiones de CO₂ continuaría para los siguientes años mientras que la inversión en estaciones y red de ciclovías es una inversión única y los pagos por la renta de bicicletas ayudarían a financiar los costos operativos del sistema después del primer año.

Participación de los usuarios en el diseño del sistema de bicicletas compartidas

Desde la perspectiva de las Teorías Conductuales, diferentes tipos de variables influyen en la decisión de utilizar bicicletas compartidas. Estas variables incluyen las características sociodemográficas de los usuarios, sus hábitos de transporte urbano, sus conocimientos sobre los SBC y variables psicográficas como su actitud hacia viajar en bicicleta, su conciencia ambiental y sus creencias (control conductual) acerca de poder controlar los factores que facilitan (ej. una estación cercana disponible) o dificultan (ej. distancia a recorrer en bicicleta) el trasladarse en una bicicleta rentada (Munkácsy y Monzón, 2017; Winters, Hosford, Javah., 2019). En México, Gámez-Pérez, Arroyo-López, Cherry (2017) caracterizan al usuario de SBC como personas que no tienen automóvil, son empleados con ingreso bajo a medio y realizan viajes cortos (15-35 min de duración) o muy largos (más de 55 min) debido a que hacen varios trasbordos. El perfil del usuario de un SBC parece ser dependiente del contexto, por tanto, perfilar a los usuarios potenciales de un SBC es más recomendable para estimar la demanda potencial y sugerir acciones para promover el sistema (ej. aumento en la actividad física y reducción del estrés), que tomar decisiones con base en la experiencia y datos de sistemas que operan en contextos diferentes.

Siguiendo el enfoque IAP, la encuesta sobre las características, necesidades y expectativas de los usuarios potenciales permitió su inclusión en el diseño del proyecto. En la encuesta se recolectaron datos sociodemográficos (género, edad, nivel educativo, ocupación e ingreso familiar) y se preguntó al encuestado si posee automóvil y/o bicicleta. Las preguntas sobre patrones de viaje incluyeron el origen y destino de los viajes entre semana, la duración, horarios, propósito, el modo de transporte utilizado y las transferencias en el sistema de transporte público que la persona realiza para completar su viaje. Respecto al uso de bicicletas compartidas se obtuvo información sobre su conocimiento e intención de utilizar el SBC, la frecuencia y horarios en que utilizaría las bicicletas compartidas y si realizará viajes redondos o en una dirección. También se recolectó información sobre la conciencia ambiental y las barreras percibidas para el uso de las bicicletas compartidas ya que es-

tos elementos tienen un impacto positivo y negativo, respectivamente, en el interés de usar bicicletas compartidas y cuando se manejan apropiadamente convencen a las personas de la conveniencia de ser usuario del SBC.

Diferentes métodos estadísticos se utilizaron para planear y analizar los datos de la encuesta aplicada a 1243 residentes que viajan en seis de las 21 macro-áreas en que está dividida la ciudad de León. El plan de muestreo fue por conveniencia en dos etapas y las áreas fueron elegidas a juicio de las autoridades municipales de acuerdo con su aptitud para el ciclismo. En la primera etapa se tomó una muestra sistemática en 5 % de las intersecciones próximas a los centros de transporte público más importantes localizados en cada área. En la segunda etapa se entrevistó, con el apoyo de una aplicación móvil, a 10 % de las personas que pasaron por las intersecciones seleccionadas entre 8:00 a.m. a 5:00 p.m., en un día a la semana elegido aleatoriamente para cada intersección. La información recolectada permitió atender a los siguientes propósitos:

- 1) Determinar el perfil sociodemográfico del usuario potencial del SBC a partir de un modelo de regresión logística ajustado a los datos. Tomando como referente este perfil, se utilizaron datos geoestadísticos (INEGI, 2020) para ubicar las zonas generadoras de mayor demanda y el porcentaje de residentes (6.7% global) interesados en ser usuarios del SBC, y también para sugerir estrategias de promoción para la bicicleta compartida.
- 2) La información sobre intenciones de cambiar del modo de transporte actual a la bicicleta compartida se utilizó para calcular las tasas de intercambio para los diferentes modos de transporte, estimar la demanda potencial para el SBC y la reducción en emisiones de CO₂. De acuerdo con los datos de encuesta, 62 % de las personas se trasladan en automóvil propio o rentado, 30 % viajan en autobús, 7 % caminan o usan motocicleta y 1 % usan su propia bicicleta. De los usuarios de automóvil, 41 % declararon intención de cambiar a bicicleta compartida, la tasa de intercambio para autobús fue del 50 % y para los otros modos de transporte del 9 %. Dada la brecha establecida entre intenciones y conducta actual (Chandon Morwitz, Reinartz, 2005), en este caso viajar en bicicleta com-

partida, las tasas de intención se ajustaron para obtener las siguientes tasas conservadoras: 3 % para usuarios de automóvil, 10% para usuarios de autobús y 6.3 % para usuarios de otros modos de transporte, con estos datos y el promedio de viajes diarios a completar con bicicleta, se estimó la demanda potencial por día para el sistema. El número de viajes no se distribuye uniformemente durante el día, por lo cual la demanda diaria (no. de viajes) se desagregó a lo largo de 16 períodos horarios por día. Para ello se utilizaron herramientas estadísticas (promedios móviles) para calcular índices horarios, los cuales determinaron que los horarios de mayor demanda son de 7-9 y 17-19 hrs. Por tanto, los horarios de reposicionamiento de bicicletas se establecieron a las 9 y 19 hrs. y al final del día.

- 3) La información sobre variables psicográficas y de patrones de viaje se utilizó para definir la matriz OD y para sugerir estrategias de comunicación que promueven al sistema de bicicletas compartidas como un modo de transporte sostenible y conveniente en la ciudad.

Evaluación interactiva de sistemas de bicicletas compartidas alternos

Para facilitar la exploración de las alternativas eficientes (frontera Pareto óptima), las cuales representan un balance entre el costo del SBC y la reducción en emisiones de CO₂, se aplicó el método STEM. STEM es un método interactivo que presenta al grupo decisor las soluciones más cercanas al ideal en el sentido minimax, es decir la alternativa que representa la menor pérdida posible respecto a la solución ideal, es decir la que optimiza todos los criterios (Benayoun, Montgolfier, Tergny, 1971). El grupo decisor discute si esta solución es aceptable, de ser el caso la búsqueda se detiene. De ser insatisfactoria la solución, el DM ha de decir qué objetivo(s)/criterio(s) de la solución puede empeorarse para mejorar en otro(s). El DM también indica cuál es el grado de detrimento admisible para los objetivos en la nueva iteración. El proceso termina cuando el DM ya no está dispuesto a empeorar algún objetivo para obtener mejora en otro(s).

Cada una de las soluciones eficientes implica un análisis costo-beneficio; dependiendo de la inversión que el gobierno municipal de León esté dispuesto a

realizar, este incremento en la inversión está compensando por beneficios adicionales en la reducción de la cantidad de emisiones de CO₂ y también en el nivel de servicio del SBC. Si el IMPLAN decide relajar la restricción de un número máximo de 15 estaciones, la cobertura extendida aumenta el número de viajes y por ende el beneficio socioambiental. El uso de STEM asume, por tanto, que los responsables del SBC están dispuestos a realizar compensaciones y a cooperar con autoridades de otros institutos, particularmente el Instituto de Ecología (IE) para proponer un SBC que contribuya a la formación de un sistema de transporte multi-modal sostenible para León.

Aunque la agregación de preferencias de tomadores de decisión con distinta formación profesional, experiencia y preferencias ha sido cuestionada, el método STEM facilita la discusión del grupo heterogéneo de DM y la identificación de soluciones que satisfagan a la mayoría de los integrantes. Siguiendo el enfoque IAP, el grupo de investigadores coordinó una sesión con las autoridades municipales para realizar el análisis costo-beneficio de SBC alternos. Dos grupos tomadores de decisión, uno integrado por autoridades del IMPLAN y otro por miembros del IE, evaluaron un conjunto selecto de soluciones no-dominadas previamente designado por el grupo académico. La evaluación se realizó en dos etapas, primero cada grupo analizó el conjunto de alternativas de acuerdo con sus objetivos y responsabilidades y posteriormente ambos grupos se reunieron para llegar a un consenso.

Los dos grupos de tomadores de decisión tenían claramente objetivos en conflicto, el IMPLAN demostró interés en mantenerse dentro del presupuesto

planeado mientras los DM del IE buscaba lograr la máxima reducción en emisiones de CO₂. Al reconciliar sus posiciones con el conjunto de soluciones no-dominadas contra el ideal, el grupo de IE asignó el menor peso (0.26) a la inversión requerida y el mayor a la reducción en emisiones de CO₂ (.74). En tanto que los representantes IMPLAN asignaron pesos opuestos, esto es ponderaron con 0.72 la función de costos y con 0.28 a la función de emisiones. Los resultados de la aplicación de STEM y las soluciones que representan el mejor compromiso se reportan en la Tabla 1.

En la discusión se desagregó el número de viajes que se podrían completar desde la estación de origen *i* a la estación de destino *j* durante el día para todos los posibles pares origen-destino y períodos horarios, enfocándose en las horas pico, así como la cantidad de viajes no completados debido a falta de bicicletas. Por simplicidad, en la Tabla 1 se reportan los promedios de viajes satisfechos y no-satisfechos.

El análisis de alternativas fue guiado por el equipo de investigación. Las autoridades del IMPLAN quienes son los responsables del SBC eligieron la alternativa 3 la cual implica un aumento aceptable de la inversión prevista ya que implica un aumento de sólo 4 % en el presupuesto asignado (de 5,575,350 a 5,797,300 USD) y representa una reducción adicional del 6.5 % en las emisiones de CO₂ y la realización de 9.6 % más viajes en bicicleta rentada que la solución de menor costo.

En el caso del grupo de decisión del IE, eligió la alternativa 5, la cual implica una pérdida del 13 % en la cantidad de emisiones de CO₂ que reduciría el SBC con respecto a la solución que maximiza la función

Tabla 1. Mejores soluciones compromiso según el método STEM.

Alternativa No-dominada	Costo (USD)	Reducción en emisiones de CO ₂ (kg/año)	Demanda promedio (# de viajes) cubiertos (<i>i, j</i>) durante el día	Demanda promedio no-satisfecha (# de viajes) (<i>i, j</i>) durante el día	Porcentaje de la demanda esperada satisfecha por el SBC (%)
1	5,575,350	255,064	907	982	48
2	5,681,501	269,342	975	914	52
3	5,797,300	271,714	994	895	53
4	6,434,199	284,236	1013	876	54
5	6,463,149	290,107	1071	818	57
6	7,206,194	291,909	1131	758	60
7	7,283,395	296,935	1171	718	62

Fuente: Elaboración propia

de beneficios; esta alternativa implica incrementar el presupuesto para el SBC en 12.7 %. Debido a que las autoridades municipales son las responsables directas del SBC, su elección tiene preferencia. Gracias a la discusión sistemática promovida bajo el enfoque IAP, la evidencia de los datos recolectados, el sustento aportado por los métodos cuantitativos y la transparencia y objetividad del proceso de diseño del SBC, el IMPLAN obtuvo el apoyo del Instituto de Ecología para promover el SBC y gestionar en colaboración la obtención de fondos adicionales (estatales y federales) para que se autorice un SBC de mayor cobertura (opciones 4 o 5).

Conclusiones

La evaluación de proyectos de transporte se ve favorecida si se aplica un enfoque IAP y se realiza un cuidadoso análisis costo-beneficio a través de herramientas cuantitativas que considere el costo del proyecto, las necesidades de transporte de los usuarios, la funcionalidad, seguridad y beneficios ambientales y sociales del proyecto. Usando el enfoque IAP, académicos y autoridades de transporte pueden colaborar para diseñar un SBC cuyas características (cobertura, nivel de servicio y beneficio ambiental) tengan un mayor impacto socioambiental. La obtención de datos primarios sobre las necesidades, patrones de viaje y características del segmento meta para el SBC es un elemento crítico para incluir a los beneficiarios en el proceso de diseño y para reunir los datos necesarios para formular un modelo de optimización multi-criterio que permita incluir objetivos tanto de costo como de beneficio que en general están en conflicto.

El diseño del SBC desarrollado en este trabajo se sustenta en una encuesta aplicada a 1243 habitantes de la ciudad de León lo que permitió obtener estimados apropiados de la tasa de sustitución de vehículos motorizados por bicicleta. Actualmente, estas tasas de sustitución son menores al 10 %, lo que indica que el diseño de un programa de mercadotecnia social, enfocado a promover el uso de modos de transporte más amigables con el ambiente que además tienen beneficios directos para el usuario, como la actividad física y la conveniencia en tiempo de viaje, es otra actividad importante a completar por parte de las autoridades, para que el SBC planeado para León alcance niveles de uso que justifiquen su inversión y que resulten en los beneficios esperados.

La aplicación de métodos de optimización, técnicas estadísticas para la recolección y análisis de datos, y métodos de decisión interactivos permite proporcionar información confiable y detallada al equipo tomador de decisión, apoyando el reemplazo de la toma de decisiones basada exclusivamente en costos. La participación de académicos con conocimientos sobre estos temas asiste a las autoridades para que gestionen un proceso de diseño sistemático y basado en información sobre las necesidades y características de los beneficiarios del SBC. Una vez implementado el SBC, se recomienda continuar con el enfoque IAP para analizar los datos sobre su uso con el propósito de realizar futuras modificaciones al SBC, por ejemplo, afinar el sistema de reposicionamiento de bicicletas y abrir/cerrar estaciones después de revisar los patrones de movilidad reales.

La División de Movilidad de León asumió la responsabilidad de la administración del SBC cuya implementación fue concluida en septiembre de 2019, con un total de 55 estaciones y una flotilla total de 500 bicicletas, con una inversión de aprox. 400,000 USD aprovechando las ciclovías existentes.

Este trabajo sostiene que la construcción de escenarios como los descritos en la Tabla 1, basados en información y métodos cuantitativos confiables, es un enfoque científico y participativo con potencial para apoyar el diseño de sistemas de transporte sostenibles.

Referencias

- Bao, J., Xu, C., Liu, P. & Wang, W., (2017). Exploring Bikesharing Travel Patterns and Trip Purposes Using Smart Card Data and Online Point of Interests. *Netw. Spat. Econ* 17, 1231–1253 (2017). doi.org/10.1007/s11067-017-9366-x
- Benayoun, R., de Montgolfier, J., Tergny, J. et al. (1971). Linear programming with multiple objective functions: Step method (STEM). *Mathematical Programming*, 1, 366–375. doi.org/10.1007/BF01584098.
- Binatti, G., Decastro, J., & Batahla, Y. (2020). 2019 Bike Sharing Systems in Latin America. *Technical Report*. July, 2020. doi: 10.13140/RG.2.2.12526.84800.
- Chandon, P., Morwitz, V. G., and Reinartz, W. J. (2005). Do intentions really predict behavior? self-generated validity effects in survey research. *Journal of Marketing*, 69(2), 1-14. doi.org/10.1509/jmkg.69.2.1.60755.
- Cherry, C. Weinert, J. and Xinmiao, Y. (2009). Comparative environmental impacts of electric bikes in China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(5), 281-290. doi.org/10.1016/j.trd.2008.11.003.

- Gómez-Pérez, K., Arroyo-López, P. E. and Cherry, C. (2017). Defining a primary market for bikesharing programs: a study of habits and usage intentions in León, Mexico. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2634, 50-56. doi.org/10.3141/2634-09.
- Gómez-Pérez, K., Arroyo-López, P. E. and Gaytán-Iniestra, J. (2019). Supporting the strategic design of public bicycle sharing systems: The experience of a large Mexican city. *Contaduría y Administración*, 65(3), 1-27. doi.org/10.22201/fca.24488410e.2020.2192.
- Instituto Municipal de Planeación [IMPLAN] (2009). *Bike Paths Master Plan for the City of León*. Mexico City: IMPLAN. pp. 55-67.
- Instituto Municipal de Planeación [IMPLAN]. (2013). *Promoting Non-Motorized mobility for the City of León*. Mexico City: IMPLAN. pp. 138-157.
- INEGI (2020). *Marco Geoestadístico. Censo de Población y Vivienda 2020*. Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463807469&fbclid=IwAR3VKpzE5wi5wjaFaAqpm9xOirxLBJsDyCAaegmMwzKxvfKOHpRe_p4-7B4.
- Johansson, C., Lövenheim, P. S., Wahlgren, L., Almström, P., Markstedt, A., Strömgren, M., Forsberg, B. and Sommar, J. N. (2017). Impacts on air pollution and health by changing commuting from car to bicycle. *Science of the Total Environment*, 584-585, 55-63. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.145.
- Koshy, V. (2010). *Action Research for Improving Practice: A Practical Guide*. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications. Recuperado de: https://www.sagepub.com/sites/default/files/upm-binaries/36584_01_Koshy_et_al_Ch_01.pdf.
- Lin, J. R. and Yang, T. H. (2011). Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(2), 284-294. doi.org/10.1016/j.tre.2010.09.004.
- Lin, J. R., Yang, T. H. and Chang, Y. C. (2013). A hub location inventory model for bicycle sharing system design: Formulation and solution. *Computers & Industrial Engineering*, 65.1, 77-86. doi.org/10.1016/j.cie.2011.12.006.
- Ma, X., Yuan, Y., Van Oort, N., & Hoogendoorn, S. (2020). Bike-sharing systems' impact on modal shift: A case study in Delft, the Netherlands. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120846.
- Marsanic, R. and Krpan, L. (2015). Contemporary issues of urban mobility. *International Journal Vallis Aurea*, 1(2), 5-12. doi.org/10.2507.IJVA.1.2.1.12.
- Munkácsy, A., Monzón, A. (2017). Potential user profiles of innovative bike-sharing systems: The case of BiciMAD (Madrid, Spain). *Asian Transport Studies*, 4(3), pp. 621-638. doi.org/10.11175/eastsats.4.621.
- Ricci, M. (2015). Bike sharing: A review of evidence on impacts and processes of implementation and operation. *Research in Transportation Business & Management* 15, 28-38. hdoi.org/10.1016/j.rtbm.2015.03.003.
- Rudolph, F., Hüging, H., Lah, O. and McGeever, J. (2015). Decision-making in sustainable urban mobility planning: common practice and future directions. *World Transport Policy and Practice*, 21(3), 54-64. Recuperado de: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6092/file/6092_Rudolph.pdf.
- Si, H., Shi, J., Wu, G., Chen, J., & Zhao, X. (2019). Mapping the bike sharing research published from 2010 to 2018: A scientometric review. *Journal of Cleaner Production*, 213, 415-427. doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.157.
- Sobolevsky, S., Levitskaya, E., Chan, H., Postle, M. and Kontokosta, C. (2018). *Impact of bike sharing in New York City*. Recuperado de: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1808/1808.06606.pdf>.
- Teixeira, J. F., Silva, C., & Moura e Sá, F. (2021) Empirical evidence on the impacts of bikesharing: a literature review, *Transport Reviews*, 41:3, 329-351, doi: 10.1080/01441647.2020.1841328.
- Wamburu, J., Hajiesmaili, M. H., Irwin, D., Shenoy, P. (2021). Ride substitution using electric bike sharing: feasibility, cost, and carbon analysis. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 5(1), Article No.: 38, pp 1-28. doi.org/10.1145/3448081.
- Winters, M., Hosford, K., & Javah, S. (2019). Who are the 'super-users' of public bike share? An analysis of public bikeshare members in Vancouver, BC. *Preventive Medicine Reports*, 15, 100946. doi.org/10.1016/j.pmedr.2019.100946.
- Woodcock, J., Abbas, A., Ullrich A., Tainio, M., Lovelace R., Sa, H., Westgate, K. and Goodman, A. (2018). Development of the Impacts of Cycling Tool (ICT): A modelling study and web tool for evaluating health and environmental impacts of cycling uptake. *PLoS Med*, 15(7), e1002622. doi.org/10.1371/journal.pmed.1002622.
- World Bank (2023). *Urban Development*. Recuperado de: <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment>.
- Zhang, Y. and Mi, Z. (2018). Environmental benefits of bike sharing: A big data-based analysis. *Applied Energy*, 220, 296-301. doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.101.