

# Hacia el desarrollo de infraestructuras eficientes y sostenibles en América Latina

Anexo 2  
Guía práctica para incorporar  
la digitalización en los proyectos  
del sector de la movilidad



# Hacia el desarrollo de infraestructuras eficientes y sostenibles en América Latina

**Anexo 2**  
**Guía práctica para incorporar  
la digitalización en los proyectos  
del sector de la movilidad**

Título:

Hacia el desarrollo de infraestructuras eficientes y sostenibles en América Latina:

Anexo 2. Guía práctica para incorporar la digitalización en los proyectos del sector de la movilidad

Editor: CAF

Antonio Silveira, Gerente de Infraestructura Física y Transformación Digital

Sandra Conde, Directora de Energía y Transporte

Claudia Flores, Directora (e) de Transformación Digital

Coordinación del estudio:

Mauricio Agudelo, Coordinador de la Agenda Digital y del Observatorio CAF para el Ecosistema Digital (director del estudio)

Eduardo Chomali (director del estudio), Jesús Suniaga, (coordinación editorial y revisión del estudio),

Alejandro Forero, Emily Carrera y Mary Simoes

Revisión sectorial:

Soraya Azán, Milnael Gómez y Andrés Alcalá

Autores:

Julián Gómez Pineda (Tachyon Consultores)

Oswaldo Bejarano (Tachyon Consultores)

Pablo Roda (Económica Consultores)

Francisco Perdomo (Económica Consultores)

Revisión y edición de contenidos: Ana Gerez

Diseño gráfico: Estudio Bilder / Buenos Aires

Las ideas y planteamientos contenidos en la presente edición son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no comprometen la posición oficial de CAF.

La versión digital de este libro se encuentra en: [scioteca.caf.com](http://scioteca.caf.com)

Copyright © 2022 Corporación Andina de Fomento. Esta obra está licenciada bajo la Licencia Creative Commons Atribución-No-Comercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Para ver una copia de esta licencia, visita <http://creativecommons.org/by-nc-nd/4.0/>.



# 8

**Introducción**

# 9

**Importancia de incorporar la digitalización de infraestructuras en la articulación y ejecución de un proyecto del sector de la movilidad**

# 30

**Formulación y evaluación técnico-económica de proyectos de digitalización del sector de la movilidad paso a paso**

# 62

**Incentivos y barreras de la digitalización del sector**

# Cuadros

- 12 Cuadro A.2 1 — Tecnología, nuevos negocios y servicios que promoverán la digitalización del sector de la movilidad
- 19 Cuadro A.2 2 — Tecnologías utilizadas en los sistemas de control
- 19 Cuadro A.2 3 — Tecnologías utilizadas en los sistemas de monitoreo y vigilancia
- 20 Cuadro A.2 4 — Tecnologías utilizadas en el sistema de gestión de información
- 20 Cuadro A.2 5 — Tecnologías utilizadas en los sistemas de recaudo
- 25 Cuadro A.2 6 — Resumen de los principales hallazgos de las experiencias internacionales analizadas
- 39 Cuadro A.2 7 — Equipos o aplicaciones requeridos para la implementación de los componentes de digitalización en los proyectos de Infraestructura del sector de la movilidad
- 41 Cuadro A.2 8 — Funcionalidades de los equipos o aplicaciones requeridos para la implementación de componentes de digitalización en proyectos de infraestructura del sector de la movilidad
- 45 Cuadro A.2 9 — Determinantes de los costos (CAPEX y OPEX) para la digitalización de los proyectos de infraestructura del sector de la movilidad
- 54 Cuadro A.2 10 — Estructura conceptual del flujo financiero del proyecto de digitalización en el sector de la movilidad
- 58 Cuadro A.2 11 — Estructura conceptual del flujo del proyecto de digitalización en el sector de la movilidad para la evaluación beneficio-costo
- 63 Cuadro A.2 12 — Aspectos regulatorios asociados a la digitalización del sector de la movilidad

# Figuras

- 10 **Figura A.2 1 — Componentes de la digitalización del sector de la movilidad**
- 13 **Figura A.2 2 — Diagrama esquemático del subsistema de control de flota**
- 14 **Figura A.2 3 — Diagrama esquemático del subsistema de recarga o recaudo**
- 15 **Figura A.2 4 — Diagrama esquemático del subsistema de información y servicio al usuario**
- 16 **Figura A.2 5 — Diagrama esquemático del subsistema de *big data*, analítica de datos e inteligencia artificial**
- 17 **Figura A.2 6 — Esquema general de los subsistemas requeridos para la digitalización del transporte público**
- 21 **Figura A.2 7 — Concepto de MaaS**
- 30 **Figura A.2 8 — Estructura de la guía para formular y evaluar paso a paso proyectos de digitalización en el sector de la movilidad**
- 35 **Figura A.2 9 — Esquemas y tecnologías digitales aplicados a infraestructuras y activos del sector de la movilidad**
- 38 **Figura A.2 10 — Metodología propuesta para la incorporación de componentes de digitalización en los proyectos de infraestructura del sector de la movilidad**
- 44 **Figura A.2 11 — Estimación de los costos incrementales asociados con la incorporación de componentes de digitalización en las infraestructuras del sector de la movilidad**
- 48 **Figura A.2 12 — Metodología propuesta para el cálculo de los beneficios económicos por la reducción en los tiempos de viaje**
- 49 **Figura A.2 13 — Metodología propuesta para el cálculo de los beneficios económicos por la reducción en costos de operación de los vehículos**
- 51 **Figura A.2 14 — Metodología propuesta para el cálculo de los beneficios económicos por la reducción en la emisión de contaminantes al aire**
- 57 **Figura A.2 15 — Paso de precios de mercado a precios de eficiencia**
- 60 **Figura A.2 16 — Análisis de priorización de componentes**

# Introducción

Esta guía metodológica forma parte de un conjunto de documentos que explican la importancia de incorporar la digitalización en las infraestructuras de los sectores de la energía eléctrica, la movilidad y la logística. En ellos, se presentan los resultados de un estudio en profundidad sobre este tema y los activos físicos en los tres sectores mencionados. El conjunto, formado por un documento principal y tres complementarios, presentados como anexos (uno por cada sector), describe cómo formular y evaluar proyectos de digitalización.

La presente guía está focalizada en el sector de la movilidad y puede ser consultada de manera autónoma o en combinación con los documentos que la acompañan<sup>1</sup>. Su propósito es identificar las oportunidades y establecer los costos y beneficios de la transformación que supone la digitalización de los sistemas de transporte público y los sistemas de control del tráfico.

El documento está estructurado en dos secciones, incluida esta introducción. La primera sección explica las razones subyacentes de incorporar la digitalización de infraestructuras en la articulación y ejecución de proyectos en el sector de la movilidad, describe las tendencias en la materia y presenta dos casos típicos de digitalización en los dos sistemas mencionados (transporte y control del tráfico). En cada uno de estos tipos de proyectos pueden o no incluirse aplicaciones avanzadas de tecnologías propias de la denominada Cuarta Revolución Industrial. Luego, se presentan seis ejemplos internacionales específicos. Estos abarcan diversos tipos de aplicaciones: la digitalización del sistema de transporte público; el uso de los datos generados por los teléfonos móviles para la creación de matrices de origen y destino por horario, utilizando técnicas de *big data* y analítica de datos; el desarrollo de aplicaciones que permiten la integración de diferentes modos de transporte, y la implementación de cargos de congestión o contaminación para controlar el tráfico. Finalmente, analiza ocho tipos distintos de beneficios incrementales que puede traer consigo la digitalización del sector de la movilidad.

La segunda sección presenta, paso a paso, cómo utilizar esta guía metodológica para la formulación y evaluación técnico-económica de proyectos de digitalización en el ámbito de la movilidad. La guía ayuda a resolver en forma práctica la formulación de los objetivos del proyecto, la descripción del promotor y su entorno, así como del propio proyecto (demanda, alternativas, diseño técnico, costos, cronograma, componentes de digitalización, etc.). Además, presenta los insumos para la cuantificación de los beneficios y costos, lo que lleva a la construcción del flujo financiero, el cálculo de indicadores y los análisis de sensibilidad.

Para concluir, se identifican brevemente los incentivos de los proyectos de digitalización del sector de la movilidad y las posibles barreras para su desarrollo, considerando las diferencias institucionales entre los países de la región y la diversidad de estructuras de mercado. Esto permite anticipar riesgos y orientar la exploración de oportunidades.

<sup>1</sup> Las abreviaciones y referencias bibliográficas de este anexo pueden consultarse en el documento principal, titulado "Hacia el desarrollo de infraestructuras eficientes y sostenibles en América Latina: oportunidades y beneficios de la digitalización para los sectores de la energía eléctrica, la movilidad y la logística", disponible en la Scioteca de CAF.



# Importancia de incorporar la digitalización de infraestructuras en la articulación y ejecución de un proyecto del sector de la movilidad

## La importancia de la digitalización en el sector de la movilidad

El crecimiento del número de vehículos en una ciudad trae consigo un incremento en los niveles de congestión y los índices de contaminación ambiental, lo cual se traduce en un detrimento de la calidad de vida de sus habitantes. La ampliación de la infraestructura vial, como medida para reducir la congestión de las ciudades, no resulta viable en muchos casos por limitaciones físicas o económicas y, cuando es viable, suele ser un proceso lento y costoso (Goodall et al, 2017). En todo caso, esa medida podría generar un ciclo reforzador de la congestión o la huella de carbono al fomentar el aumento del número total de vehículos, incluyendo el de aquellos que utilizan combustibles fósiles, que, a su vez, incrementan la producción de partículas contaminantes. La digitalización de los sistemas de movilidad surge como una de las alternativas para resolver esta problemática, ofreciendo la oportunidad de mejorar la eficiencia de los sistemas de transporte.

La inclusión de componentes digitales en la infraestructura del sector de la movilidad ayuda a monitorear, controlar y optimizar la operación de los sistemas de transporte público y los sistemas de control del flujo del tráfico en general. Esto es posible porque los datos generados digitalmente, al ser procesados y analizados, suministran información sobre incidencias viales, las condiciones de las vías y el flujo vehicular, entre otros aspectos (ISO, 2015; Perallos et al., 2016). De esta forma, facilitan a las autoridades responsables del

sector su gestión, la toma de decisiones o la implementación de medidas, como, por ejemplo, los cargos de congestión o contaminación. También permiten el desarrollo de aplicaciones con las que los usuarios pueden planificar sus desplazamientos y conocer las rutas y los modos de transporte que minimizan los tiempos de viaje. Igualmente, posibilitan la creación de aplicaciones que incentivan el uso del transporte público y otros modos alternativos de transporte, como las bicicletas y patinetas eléctricas, que además traen eficiencias en los consumos energéticos y reducen la huella de carbono.

El despliegue y uso de sensores y cámaras mejora las condiciones de seguridad de los sistemas de transporte, permitiendo la generación de alertas a los usuarios orientadas a la prevención de siniestros. Dicho despliegue ofrece, además, la posibilidad de mejorar los tiempos de identificación de incidentes en las vías y facilita el reporte de emergencias, acciones que contribuyen a incrementar la seguridad de las carreteras y, consecuentemente, a salvaguardar la vida de las personas. Estos elementos también habilitan la implementación de sistemas de monitoreo y vigilancia, a través de los cuales se identifican posibles violaciones a las normas de tránsito y se emiten las sanciones correspondientes a los infractores.

La masificación del uso de sistemas de comunicación entre vehículos y entre estos y la infraestructura (V2V y V2I, por sus siglas en inglés) contribuye a reducir los siniestros en las vías. Estos sistemas generan alertas a los conductores y peatones frente a situaciones de riesgo y mejoran el flujo vehicular al permitir recolectar y analizar datos que fundamentan la toma automática de decisiones en los sistemas de control del tráfico (duración de los semáforos, señalización electrónica, control de velocidad, etc.).

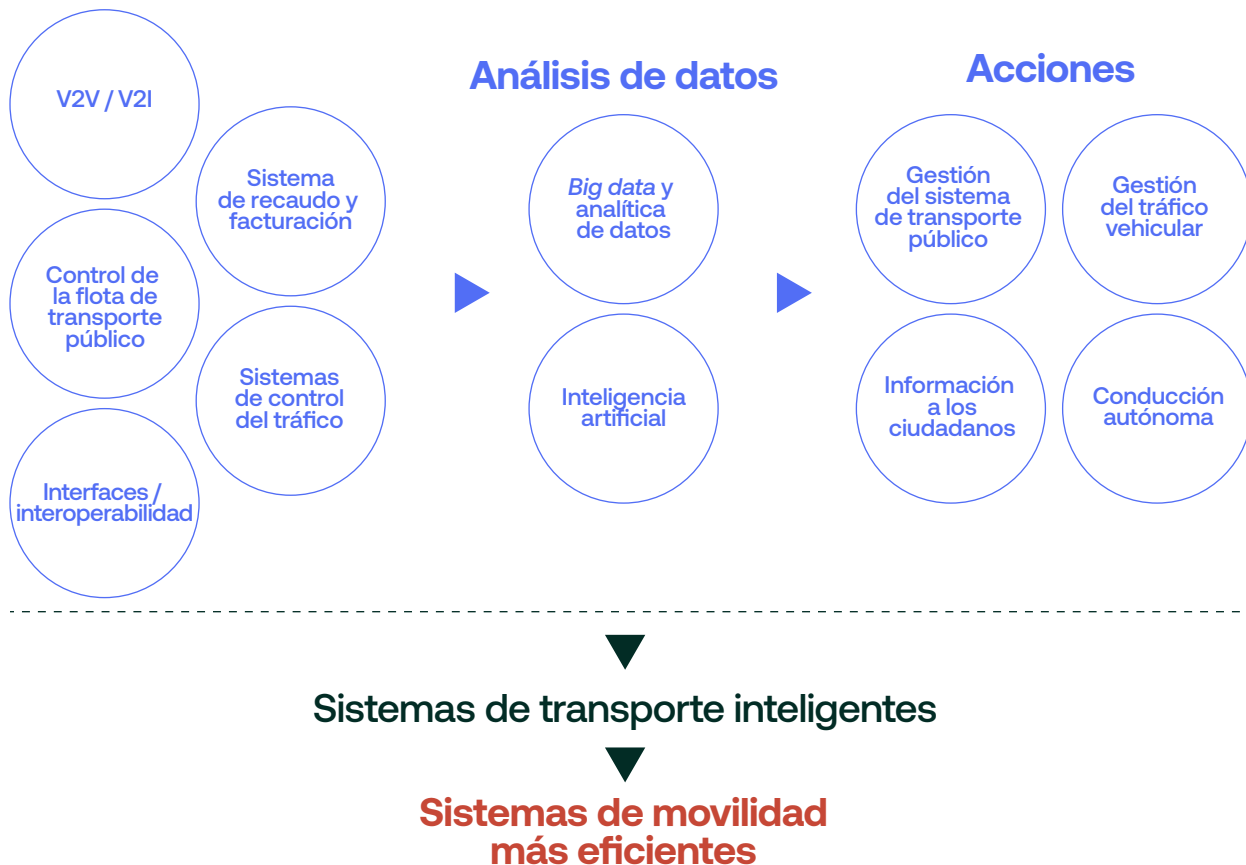
Por su parte, tanto los sistemas digitalizados de control de la flota como de recaudo en el transporte público ayudan a optimizar la operación del sistema de transporte público. Dichos sistemas mejoran la frecuencia de las rutas al facilitar

su programación en función de la demanda y agilizar los tiempos de abordaje, con lo cual se reducen sus costos de operación.

Para que la información generada por la digitalización de los sistemas de movilidad sea de utilidad tanto para los usuarios como para los administradores de los sistemas de transporte, se deben incorporar técnicas avanzadas de almacenamiento y procesamiento de datos, como el *big data*, la analítica de datos y la inteligencia artificial. Estas tecnologías permiten tomar decisiones en tiempo real, fundamentadas en datos, con lo cual se mejora la eficiencia y operatividad de los sistemas de transporte.

Figura A.21 — Componentes de la digitalización del sector de la movilidad

## Recolección de datos



# Tendencias de digitalización en el sector de la movilidad

El desarrollo y la masificación de tecnologías que facilitan la digitalización del sistema de transporte propician la creación de sistemas de transporte inteligentes (STI). Estos, a su vez, incentivan el desarrollo de nuevos proyectos e iniciativas encaminadas a mejorar el funcionamiento y la operación de dicho sistema.

Actualmente existen dos vertientes de digitalización de los STI. Por una parte, se encuentran aplicaciones y servicios maduros, como es el caso de los sistemas automáticos de gestión del tráfico y los servicios de información del transporte público. Por otra parte, se encuentran tecnologías en etapa experimental, tales como los vehículos autónomos y servicios asociados con la implantación de tecnologías que permiten la conexión de los vehículos con otros vehículos (V2V) o con la infraestructura (V2I) (Perallos et al., 2016).

Con respecto a la **digitalización de los sistemas de transporte público**, la integración de los sistemas de control de la flota de este tipo de transporte con los sistemas de información a los usuarios permite a estos conocer el tiempo estimado de llegada del próximo vehículo. Igualmente, la implementación de sistemas inteligentes de recaudo en el servicio de transporte público, junto con el uso de cámaras de reconocimiento facial, mitiga los fraudes asociados con el no pago del pasaje al posibilitar un control más efectivo de la entrada y salida de pasajeros y la identificación de aquellos usuarios que accedieron a él fraudulentamente. Por último, el desarrollo de aplicaciones que integran la utilización por parte de los usuarios de diferentes modos de transporte, tanto tradicionales (vehículos buses, etc.) como alternativos (bicicletas, patinetas eléctricas, etc.), contribuye a la optimización de los tiempos de desplazamiento y a reducir la huella de carbono, además de fomentar el uso del transporte público. El desarrollo de estas aplicaciones o plataformas mejora la gestión de la infraestructura de transporte y vial.

En cuanto a la **digitalización de los sistemas de control del tráfico**, estos generan información sobre el estado de las vías y los niveles de congestión vehicular. De esta forma, permiten modificar el estado de las señales de tránsito de acuerdo con las condiciones en los flujos de tráfico, establecer políticas de prioridad de tránsito, controlar el flujo de velocidad y utilizar peajes electrónicos. Usando esa información también se pueden implementar mecanismos, como los cargos por congestión, que desincentiven el uso de vehículos con motores de combustión fósil y promuevan modos de transporte alternativos (bicicletas, patinetas o vehículos eléctricos).

Las aplicaciones actualmente en fase de experimentación, como la V2V o la V2I, se verán impulsadas por el desarrollo y la masificación de tecnologías de comunicación dedicada de corto alcance (*dedicated short-range communication* o DSRC) y sistemas de posicionamiento global (*global positioning system* o GPS). Esas tecnologías permiten a los vehículos transmitir información relativa a su posición, dirección, velocidad y otros datos de interés a otros vehículos que se encuentren a su alrededor, así como a sistemas de control del tráfico y de información que se encuentren en las vías. Dentro de las funcionalidades que se podrán implementar con estas tecnologías se encuentran:

- Aplicaciones de prevención de siniestros. Tienen por objetivo mejorar la seguridad mediante sistemas de alerta a los conductores o incluso interviniendo en el control de los vehículos.
- Aplicaciones y tecnologías de conducción automática. Sistemas de *hardware* y *software* que introducen funciones de conducción automática cuyo objetivo es mitigar los efectos de los errores humanos mediante el uso de tecnologías V2V y V2I y sensores para la detección de obstáculos.
- Aplicaciones para el manejo de emergencias, alertas de tráfico, seguridad vial y prevención de incidentes. Consiste en la implementación de plataformas de doble vía, que permiten emitir diferentes tipos de alertas que servirán para la toma de decisiones a partir de la información generada por otros vehículos (V2V) y por los sistemas V2I instalados en la infraestructura vial (sistemas de emergencia, sensores que miden el estado de la carretera, etc.).

Estas tecnologías, dependiendo del alcance y el nivel de sofisticación del proyecto, requieren la utilización de técnicas avanzadas, tales como el *big data*, la analítica de datos, la inteligencia artificial y la computación en la nube, para procesar y analizar la información recopilada. Además, necesitan incorporar datos de otras fuentes, como los recopilados y almacenados en los sistemas de información geográfica y los meteorológicos, a partir de los cuales se pueden obtener resultados para, por ejemplo, evaluar y mitigar los riesgos sobre las vías a fin de prevenir siniestros y tomar decisiones en tiempo real sobre los dispositivos de control del tráfico, de manera que mejore el flujo vehicular y se optimicen los sistemas de transporte público. Esos datos facilitan así mismo la implementación y despliegue de tecnologías emergentes, tales como los sistemas de conducción autónoma y de reconocimiento facial, útiles, entre otras cosas, para la prevención de fraudes y mejorar la seguridad del sistema de transporte público.

Cuadro A.2 1 — Tecnología, nuevos negocios y servicios que promoverán la digitalización del sector de la movilidad

Tecnología	Nuevos negocios o servicios	Impactos esperados
Comunicación entre vehículos y entre estos y la infraestructura (V2V y V2I)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Control del flujo de velocidad</li> <li>- Políticas de prioridad de tránsito (vehículos de transporte masivo, atención de emergencias, protección ciudadana, etc.)</li> <li>- Peajes electrónicos</li> <li>- Cargos de congestión o contaminación</li> <li>- Localización de vehículos</li> <li>- Generación de alertas para la prevención de siniestros</li> <li>- Vehículos autónomos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reducción de la siniestralidad</li> <li>- Disminución de los tiempos de desplazamiento</li> <li>- Disminución de la congestión vehicular</li> <li>- Reducción de la huella de carbono</li> <li>- Estandarización de las tecnologías</li> <li>- Disuasión del incumplimiento de las normas de tránsito</li> <li>- Reducción de los costos de operación del sistema de transporte público</li> <li>- Facilidad de acceso a las redes de telecomunicaciones</li> </ul>
Control del recaudo y facturación del sistema de transporte público	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Control de entrada y salida de los usuarios</li> <li>- Validación de los medios de pago</li> <li>- Localización de vehículos</li> <li>- Aplicaciones de micromovilidad compartida y de movilidad como servicio (MaaS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reducción de los fraudes</li> <li>- Disminución de los tiempos de abordaje</li> <li>- Integración modal del transporte público</li> <li>- Facilidad de acceso a las redes de telecomunicaciones</li> </ul>
Control de la flota de transporte público	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Control del flujo vehicular y de la velocidad</li> <li>- Información en tiempo real al usuario</li> <li>- Localización de vehículos</li> <li>- Aplicaciones de micromovilidad compartida y de movilidad como servicio (MaaS)</li> <li>- Sistemas de ayuda a la operación de la flota (uso de activos, programación de mantenimientos, turnos de conductores)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reducción de la huella de carbono</li> <li>- Reducción de los costos de operación</li> <li>- Optimización de las rutas</li> <li>- Integración modal del transporte público</li> <li>- Facilidad de acceso a las redes de telecomunicaciones</li> <li>- Aumento de la calidad del servicio y mejora de la percepción por parte del usuario</li> </ul>
Sistemas de control del tráfico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Políticas de prioridad del tránsito (vehículos de transporte masivo, atención de emergencias, protección ciudadana, etc.)</li> <li>- Control del flujo de velocidad</li> <li>- Peajes electrónicos</li> <li>- Generación de alertas para la prevención de siniestros</li> <li>- Aplicaciones de micromovilidad compartida y de movilidad como servicio (MaaS)</li> <li>- Captura y análisis de datos para la planificación de transporte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reducción de la siniestralidad</li> <li>- Disminución de los tiempos de desplazamiento</li> <li>- Disminución de la congestión vehicular</li> <li>- Reducción de la huella de carbono</li> <li>- Estandarización de tecnologías</li> </ul>

## Casos típicos de digitalización en el sector de la movilidad

### Tecnologías digitales en los sistemas de servicio de transporte público

La digitalización de los sistemas de transporte público requiere de un conjunto de elementos tecnológicos que soporten los sistemas de información, las redes de telecomunicaciones

y los demás dispositivos a través de los cuales se realiza el control y monitoreo de la flota y el recaudo obtenido por diferentes medios de pago. Adicionalmente, los registros de los

teléfonos móviles, las sesiones de conexión de los dispositivos inteligentes a redes wifi públicas y la información generada por las tarjetas inteligentes (*smart cards*), usadas para el pago de los pasajes, permiten observar y analizar los comportamientos de desplazamiento de las personas, facilitando la elaboración

de modelos de demanda que apoyan el diseño de rutas y mejoran la eficiencia del transporte público.

Conceptualmente, la implementación de estas funcionalidades requerirá la integración de cuatro subsistemas, los cuales se presentan de forma esquemática en la Figura A.2 2.

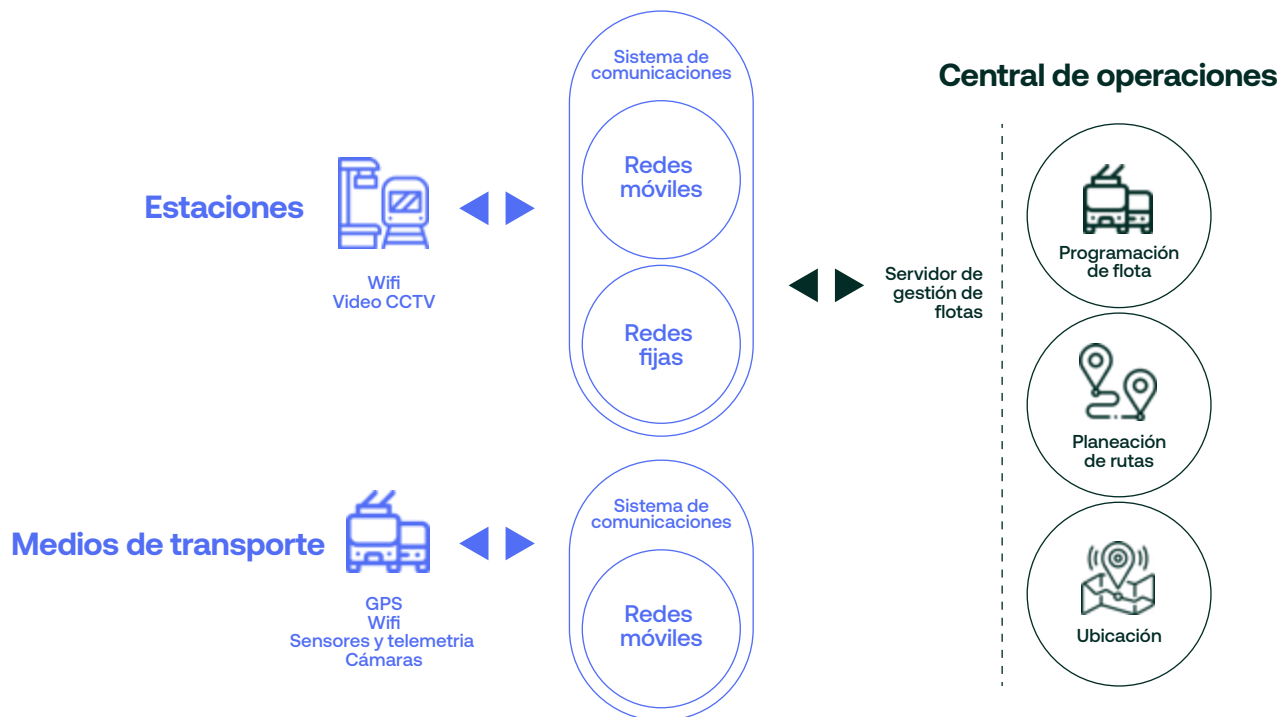
## Subsistema de control de flota

De acuerdo con la norma ISO 14813-1 (ISO, 2015), este subsistema está conformado por las siguientes funcionalidades: i) gestión de la operación del sistema de transporte público, el cual involucra la programación de los itinerarios y rutas de los vehículos y la coordinación de respuestas frente a la materialización de riesgos durante la operación del sistema; ii) gestión de la flota, que se encarga de realizar el control del flujo de vehículos con el fin de satisfacer las necesidades de los usuarios; iii) monitorización del desempeño de los modos de transporte, donde se verifica su funcionamiento, se evalúa la conducción de los operarios

y el estado y el comportamiento de los pasajeros dentro de los vehículos; iv) monitorización de la operación, que permite establecer en tiempo real el estado de las rutas, las demoras o los adelantos de los vehículos y la ocupación del sistema.

Para llevar a cabo estas funcionalidades, se necesitan dispositivos y sistemas de georreferenciación, telemetría, cámaras de video, equipos de comunicaciones de voz y sistemas de procesamiento de *big data* y analítica, capaces de analizar la información recopilada.

Figura A.2 2 — Diagrama esquemático del subsistema de control de flota



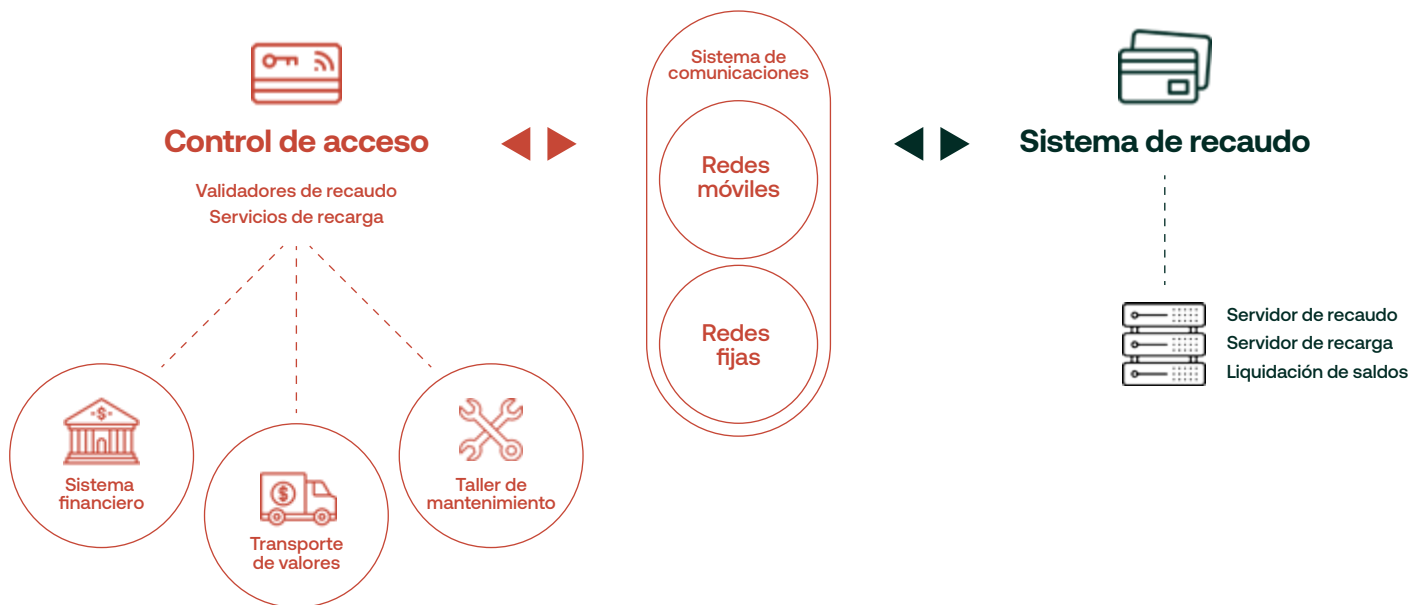
## Subsistema de recaudo

Este subsistema está conformado por los elementos que recolectan la información requerida para la gestión y el control de los mecanismos y procesos a través de los cuales los usuarios acceden al sistema de transporte público.

Los elementos que integran este subsistema son los siguientes:

- Los puntos de recarga o recaudo de las tarjetas utilizadas por los usuarios para acceder al sistema.
- El centro de gestión de recargas y recaudos donde se procesan las transacciones, se realizan las liquidaciones y se calculan los saldos.
- Las compañías de transporte de valores que trasladan el dinero recaudado.
- El sistema financiero, si el sistema de transporte acepta como medios de pago las tarjetas emitidas por entidades bancarias.
- El taller de mantenimiento, que se encarga de ejecutar los procesos de reparación y demás actividades que garantizan la continuidad de la operación del subsistema de recarga o recaudo.

Figura A.2 3 — Diagrama esquemático del subsistema de recarga o recaudo



## Subsistema de información y servicio al usuario

Con la digitalización, los usuarios pueden acceder a la información del sistema de transporte público a través de cuatro medios: i) pantallas o altavoces ubicados dentro de las estaciones y los vehículos que conforman el sistema; ii) aplicaciones instaladas en dispositivos móviles; iii) portal web para consultas a través del internet, y iv) centro de llamadas, donde se atiende a los usuarios mediante contacto telefónico, robot-chats y redes sociales.

Los usuarios tienen generalmente acceso a la siguiente información: i) estación donde se encuentran ubicados; ii) tiempo estimado para la llegada de los vehículos; iii) ruta tomada; iv) paradas que realizará en la ruta; v) destino final de la ruta; y vi) tiempo estimado de llegada al destino del usuario.

Figura A.2 4 — Diagrama esquemático del subsistema de información y servicio al usuario



## Subsistema de inteligencia del negocio (*big data*, analítica de datos e inteligencia artificial)

A través de este subsistema se analizan los datos recopilados por todos los subsistemas para realizar inteligencia empresarial (*business intelligence*). Su finalidad es tomar decisiones en tiempo real e interactuar con los usuarios del sistema de transporte. Este subsistema también se encarga de anonimizar los datos para cumplir la legislación relativa a la protección de datos de los ciudadanos.

Para su operación se requerirán servidores y computadoras de gran desempeño, que pueden ser locales o estar en la nube,

con altas capacidades de procesamiento y almacenamiento. En ellos se ejecutan los programas que permiten almacenar, gestionar y analizar la gran cantidad de datos generados por los otros subsistemas y tomar decisiones en tiempo real. Además, se necesita la implementación de sistemas de gestión de la seguridad de la información que garanticen la integridad, disponibilidad y confiabilidad de los datos almacenados.

Figura A.2 5 — Diagrama esquemático del subsistema de *big data*, analítica de datos e inteligencia artificial

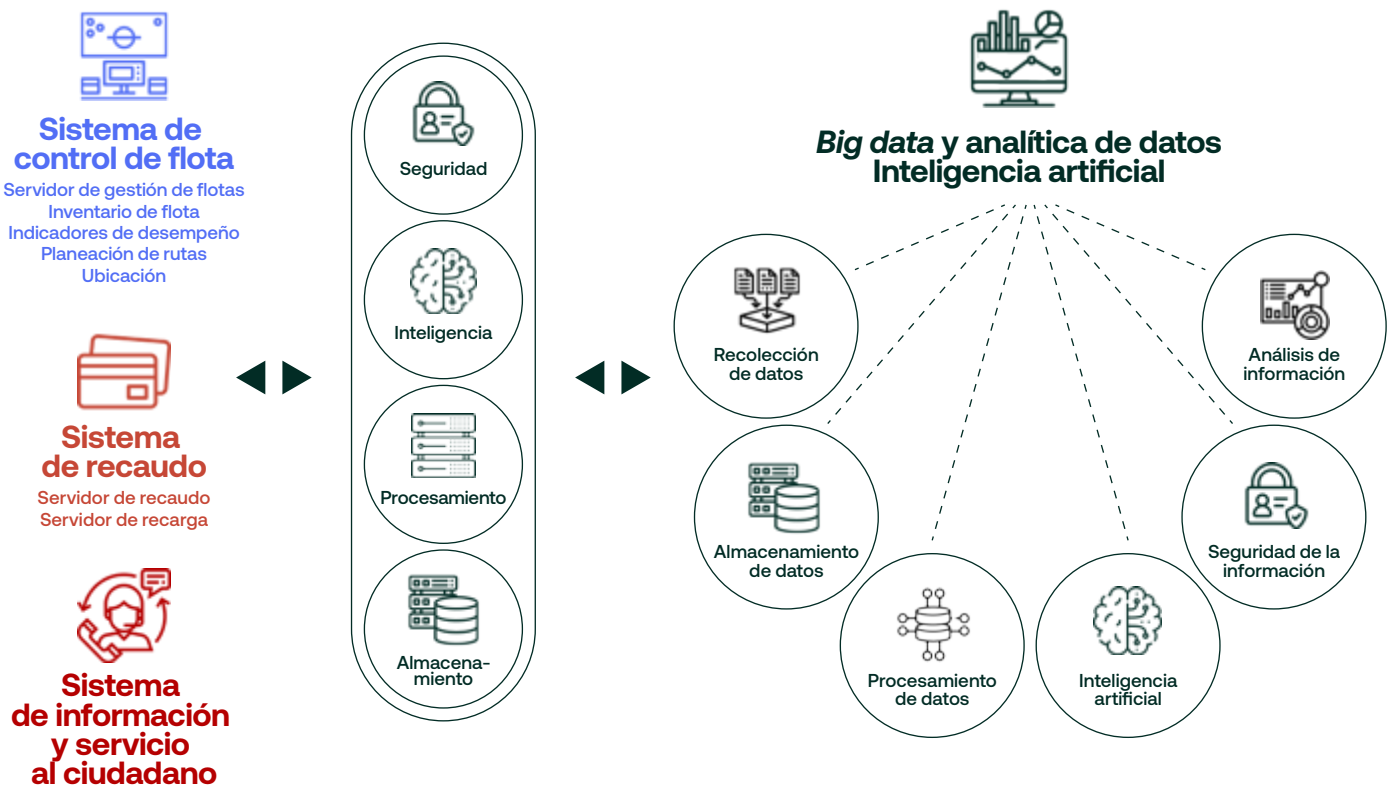
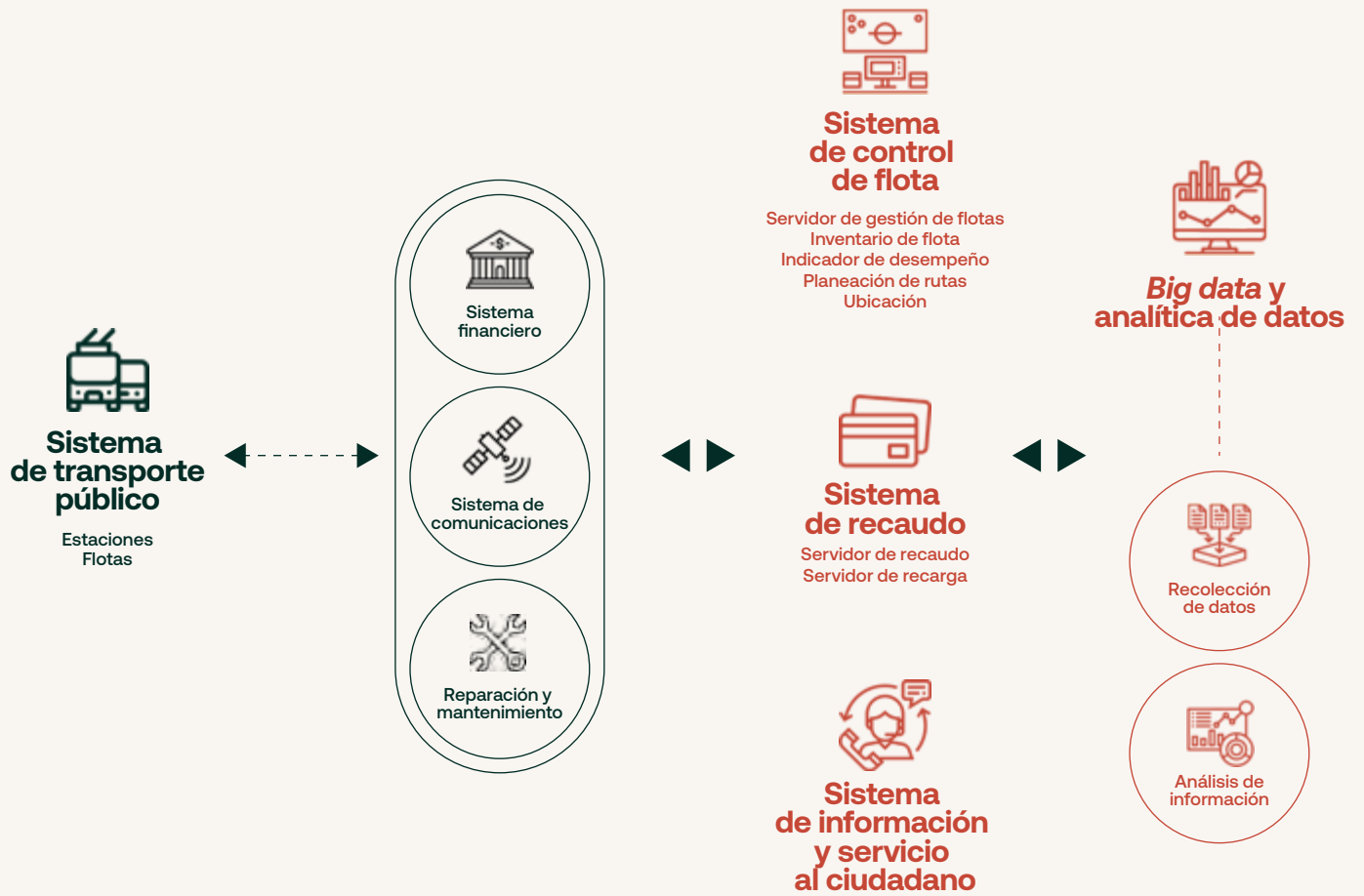




Figura A.2 6 — Esquema general de los subsistemas requeridos para la digitalización del transporte público



## Tecnologías digitales para los sistemas de control de tráfico

Gracias al uso de sistemas de geolocalización, los sistemas de gestión del tráfico permiten a los usuarios conocer el estado del flujo vehicular, los incidentes ocurridos en las vías y los niveles de congestión en los corredores viales. La integración de estos sistemas con sistemas de información meteorológica tiene el potencial de reducir los riesgos de siniestros al generar alertas a los conductores y que las autoridades tomen acciones preventivas frente a situaciones meteorológicas extremas. Estos sistemas también ayudan a mejorar los sistemas de control de los semáforos, incorporando instrumentos automáticos de toma de decisiones que dan mayor flexibilidad a la operación de estos elementos al permitir que su funcionamiento se adapte a las condiciones de tráfico presentes en la vía. Además, posibilitan modificaciones al comportamiento normal de los semáforos cuando se identifica

la circulación de ciertos tipos de vehículos con prelación sobre el tráfico, tales como ambulancias o sistemas masivos de transporte.

El flujo del tráfico en las carreteras interurbanas puede mejorar con la implementación de peajes y sistemas de cobro electrónico por el uso de las vías, los cuales ofrecen la posibilidad de realizar el pago mientras se circula por la carretera, sin la necesidad de realizar paradas.

También permite la implementación de estudios de movilidad urbana y planificación del transporte, así como la implementación de proyectos de micromovilidad compartida con vehículos limpios.

## Aplicaciones prácticas de la digitalización del sector de la movilidad

En algunos países se han adelantado procesos relacionados con la digitalización del sector de la movilidad. Dichos procesos buscaban solucionar diferentes problemáticas, entre ellas las relacionadas con la disminución de los niveles de congestión del tráfico vehicular, la mejora de la planeación y la optimización de la operación del transporte público, la mejora

de la percepción de seguridad y la reducción de la huella de carbono y de las cotas de siniestralidad en las vías públicas. A continuación, se presentan, a manera de ejemplo, algunas experiencias relevantes sobre la incorporación de elementos de digitalización en la infraestructura de movilidad.

### Digitalización del sistema de transporte público de Singapur

Con el fin de atender la alta demanda de desplazamientos, en un contexto de restricciones al crecimiento de la red vial debido a la limitada superficie del país, Singapur desarrolló un sistema de transporte eficiente y de calidad. Para ello, adoptó diversas políticas de largo plazo, tanto desde la perspectiva de la demanda como de la oferta, desarrollando un sistema de transporte moderno basado en tres pilares: sostenibilidad, seguridad e inteligencia. El tercer pilar del sistema, la inteligencia, se ha logrado a través del uso intensivo de la tecnología, mediante la cual se apalancan las medidas de sostenibilidad y seguridad, generando una mayor eficiencia y calidad del sistema de transporte. Los componentes de la inteligencia involucran sistemas de control, de monitoreo y vigilancia, de gestión de la información y de recaudo, como se explica a continuación.

#### Sistemas de control

Los sistemas de control se utilizan para gestionar el flujo del tráfico y la seguridad en vías e intersecciones. En el Cuadro A.2.2 se describen las principales tecnologías implementadas.

## Cuadro A.2 2 — Tecnologías utilizadas en los sistemas de control

Tecnología	Impacto
<b>Semáforos inteligentes (conocido como sistema GLIDE).</b> Detección automática de vehículos y manual de peatones, que ajusta el tiempo de duración de los estados del semáforo.	Mejora el flujo vehicular al reducir las paradas y el tiempo de espera. Aumenta la seguridad de los peatones y conductores.
<b>Señalización de prioridad para buses.</b> Detección automática de buses al aproximarse a una intersección y ajuste de la duración de la luz verde para darle prioridad.	Disminución de los tiempos de desplazamiento en transporte público y de la variabilidad de los tiempos de espera de los buses.
<b>Sistema de detección de adultos mayores</b> en los cruces de las intersecciones a través de la lectura de una tarjeta inteligente.	Incrementa la seguridad de los adultos mayores.
<b>Luces inteligentes</b> instaladas en el suelo, que parpadean cuando se activa el paso peatonal para alertar a los conductores, especialmente por la noche.	Incrementa la seguridad de peatones.
<b>Señalización dinámica de los límites de velocidad</b> según las condiciones de tráfico.	Mejora el flujo vehicular.

Fuente: Elaborado a partir de Haque et al. (2013).

## Sistemas de monitoreo y vigilancia

Tienen como objetivo asegurar que los conductores obedezcan las reglas de tránsito y la regulación. En el Cuadro A.2 3 se describen las principales tecnologías implementadas.

## Cuadro A.2 3 — Tecnologías utilizadas en los sistemas de monitoreo y vigilancia

Tecnología	Impacto
<b>Cámaras de velocidad</b> que detectan en tiempo real la velocidad de los vehículos para que la policía de tránsito genere las multas correspondientes en caso de infracción.	Mejora la seguridad vial al sancionar a los vehículos que exceden los límites de velocidad permitidos.
<b>Cámaras en las intersecciones</b> que detectan si un conductor pasa el semáforo en rojo, para la posterior identificación de la matrícula y emisión de la multa en caso de infracción.	Mejora la seguridad vial al sancionar a los vehículos que se pasan el semáforo en rojo.
<b>Sistema de cámaras de vigilancia en las intersecciones (J-Eyes),</b> que detectan varias situaciones, como alta congestión o parqueo ilegal, permitiendo gestionar el tráfico desde el centro de control.	Mejora el flujo vehicular y permite la identificación y sanción de infractores.
<b>Sistema de cámaras de vigilancia en las avenidas</b> (conocidas por el nombre de EMAS) para detectar en tiempo real accidentes y niveles de congestión, lo que permite el despacho de las autoridades competentes para restaurar el flujo vehicular.	Reduce los niveles de congestión gracias a la rápida respuesta.
<b>Sistema de vigilancia de prioridad de buses.</b> Cámaras ubicadas en los buses que identifican vehículos que infringen la prelación que tienen los buses para el uso de la línea prioritaria.	Disminuye los tiempos de desplazamiento en transporte público y la variabilidad de los tiempos de espera de los buses.

Fuente: Elaborado a partir de Haque et al. (2013).

## Sistemas de gestión de la información

Sirven para compartir en tiempo real información del tráfico y del transporte público. Por ejemplo, en el año 2014, la Autoridad del Transporte Terrestre de Singapur adjudicó el diseño e implementación de un sistema de gestión de flota

unificado para proveer información en tiempo real a los centros de operación, a los conductores de bus y a los pasajeros y poder alinear la oferta y la demanda en tiempo real (Sim, 2014). En el Cuadro A.2 4 se describen las principales tecnologías implementadas.

Cuadro A.2 4 — Tecnologías utilizadas en el sistema de gestión de información

### Tecnologías

### Impacto

**Difusión en tiempo real de información sobre las condiciones de tráfico,** incluyendo niveles de congestión, siniestros, parqueaderos disponibles y tiempo estimado de viaje. La información se adquiere de los sistemas de control, monitoreo y vigilancia descritos en los cuadros A.2 2 y A.2 3, además de la provista por los parqueaderos y el análisis de la información recolectada de los GPS de los taxis. La información puede ser consultada a través de aplicaciones móviles, dispositivos dentro de los vehículos o señalizaciones en las vías.

Permite a los usuarios planear sus rutas con anticipación y durante el viaje, evitando vías congestionadas, lo que se traduce en menor tiempo de traslado y menos congestión. Facilita la identificación de parqueaderos disponibles, reduciendo el tiempo empleado en su búsqueda y la congestión generada en el proceso.

**Difusión en tiempo real de información relacionada con el transporte público** Incluye un mapa del sistema de transporte público integrado, un planeador de viaje, servicios de información a bordo y un sistema de reserva de taxis. Es accesible a través de internet, aplicaciones móviles, mensajes de texto y señalizaciones dentro del sistema.

Permite a los usuarios planear su viaje, mostrando la ruta más rápida, económica o corta, utilizando diferentes modos de transporte.

Fuente: Elaborado a partir de Haque et al. (2013).

## Sistemas de recaudo

Se utilizan para procesar las transacciones relacionadas con el pago de tarifas y peajes. En el Cuadro A.2 5 se describen las principales tecnologías implementadas.

Cuadro A.2 5 — Tecnologías utilizadas en los sistemas de recaudo

### Tecnologías

### Impacto

**Recaudo de tarifas del transporte público y de parqueadero.** Sistema de pago electrónico multimodal (*Symphony for e-Payment* o SeP), que, a través de una tarjeta inteligente, permite abonar el pasaje de transporte público, el parqueadero e incluso pagar en establecimientos comerciales.

Disminuye el tiempo de viaje al acelerar el proceso de abordaje. Mejora la experiencia del usuario al usar una sola tarjeta.

**Cobro de peajes.** Cobro automático utilizando tecnología de DSRC del tipo V2I, que detecta el paso de los vehículos por los peajes al ingresar en una zona de alta congestión. Una segunda versión del sistema utiliza GPS para realizar el cobro por congestión por distancia recorrida y no por ingreso a la zona.

Disminución de los niveles de congestión en la ciudad al agilizar el cobro de los peajes. Cobro de congestión por distancia recorrida más justo.

Fuente: Elaborado a partir de Haque et al. (2013).

La adopción de estas tecnologías digitales ha sido fundamental para facilitar la implementación e incrementar la eficiencia operativa de las diferentes medidas gubernamentales. Con ellas se ha mejorado el flujo del tráfico, reducido los niveles de congestión, aumentado la seguridad de los peatones y conductores y recortado el consumo de

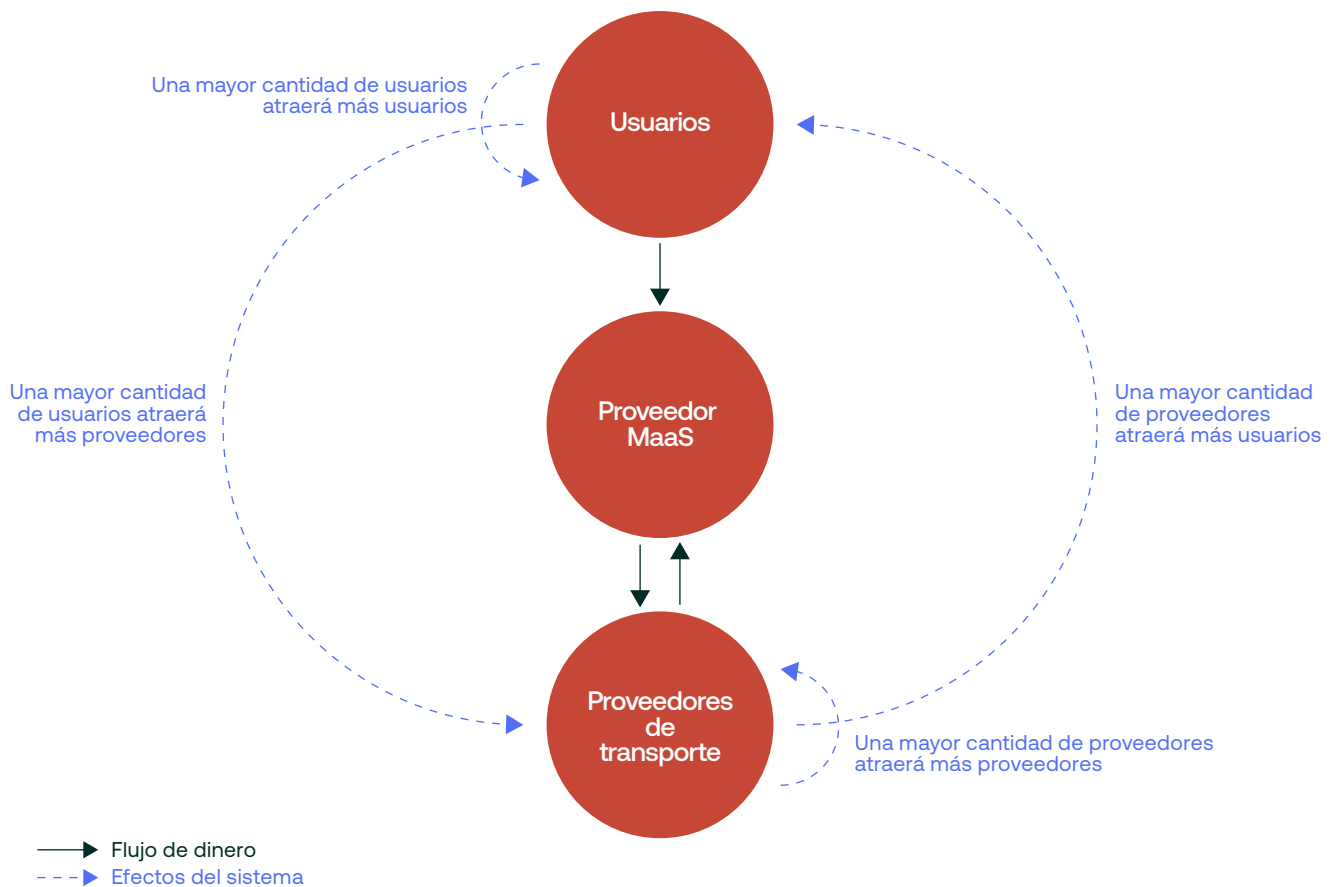
combustible y las emisiones contaminantes, haciendo cumplir las normas viales y mejorando la experiencia del usuario. Este no solo cuenta con un sistema de transporte seguro y confiable, sino que también dispone de información oportuna y veraz que le permite una mejor toma de decisiones con la que reducir el tiempo de sus traslados.

## Movilidad como servicio: el caso de Helsinki (Finlandia)

Movilidad como servicio, más conocido como MaaS (*mobility as a service*), es un concepto cuya visión consiste en desincentivar el uso del vehículo privado como medio de transporte preferido de las personas y así aliviar los problemas de congestión y contaminación creciente de las ciudades.

MaaS se define como el conjunto de soluciones de movilidad, que integra el transporte de proveedores públicos y privados y de medios individuales y colectivos, a través de una única aplicación web o móvil que permite diseñar un viaje según las necesidades específicas del usuario y pagarlo mediante una única cuenta (Audouin y Finger, 2018).

Figura A.27 — Concepto de MaaS



En noviembre de 2017, se lanzó al mercado la aplicación Whim como la solución a las necesidades de movilidad de los ciudadanos de Helsinki. La aplicación permite la planeación de los viajes considerando las condiciones de tráfico y las preferencias de los usuarios sobre los modos de transporte. También hace posible gestionar la reserva, pago y recaudo de los tiquetes electrónicos de diferentes modos de transporte (metro, tren, buses, taxis, bicicletas, vehículos rentados, Uber, etc.). La compañía ofrece diferentes planes, que se ajustan a las necesidades de los usuarios y abarcan el pago por consumo, suscripciones mensuales y para consumo ilimitado (Whim, 2020).

El funcionamiento de MaaS (ver la Figura A.2 7) es explicado a través de un ecosistema de servicios, que involucra la interacción de diferentes actores mediante una plataforma digital. En su forma más simple, el ecosistema MaaS lo conforman: i) los usuarios, del lado de la demanda, ii) los proveedores de transporte, del lado de la oferta, y iii) el proveedor de MaaS, que actúa como intermediario entre los proveedores de transporte y los usuarios.

El proveedor de MaaS compra capacidad de transporte a varios operadores y la empaqueta para venderla a los usuarios a través de una interfaz digital. El valor agregado del proveedor de MaaS a sus clientes (usuarios y proveedores de transporte)

## Implementación de cargos por congestión en Estocolmo (Suecia)

Desde los años 90, el crecimiento del tráfico en el centro de Estocolmo generó grandes congestiones, llevando a que el gobierno considerara, desde el año 2002, la implementación de cargos de congestión. En un principio esta medida no contaba con el apoyo popular, pero la opinión de los ciudadanos y la prensa cambió después de la implementación de una prueba piloto que evidenció las mejoras en la movilidad como consecuencia de la reducción de la congestión vial en el centro de la ciudad (Eliasson, 2014; Eliasson et al., 2009).

Tras obtener la aprobación de la población, la ciudad adoptó los cargos de congestión. Para aplicarlos, se instalaron 18 puntos de cobro digitales que, de forma automática, registran el ingreso de los vehículos al cordón a través del uso de dos tecnologías complementarias: 1) DSRC del tipo V2I, consistente en un conjunto de antenas instaladas en pórticos sobre la vía o postes al lado de la misma, que se comunican con una unidad en el vehículo; y 2) reconocimiento automático del número

se logra gracias al análisis de datos en tiempo real, que permite alinear las necesidades y preferencias de los usuarios con la oferta de transporte y con las condiciones de tráfico (Kamargianni y Matyas, 2017).

Adicionalmente, esta aplicación cuenta con una especificación de interfaz de programación de aplicaciones (*application programming interfaces* o API) y con transferencia de estado representacional (*representational state transfer* o REST)<sup>2</sup>, para que los proveedores de servicios de transporte puedan ofrecer sus servicios a través de Whim.

El ecosistema extendido incluye, además de los actores mencionados anteriormente, a proveedores de datos, infraestructura de tecnologías de la información (TI), servicios de telecomunicaciones, sistemas de venta de tiquetes y recaudo, aseguradoras, sindicatos, el gobierno, el regulador e inversionistas, entre otros.

Según el estudio de impacto realizado por Ramboll (2019), Whim facilitó la integración de varios modos de transporte (transporte público, taxis, bicicletas, vehículos de alquiler y patinetas eléctricas), permitiendo a los usuarios combinar el uso del sistema de transporte público con modos de transporte no convencional para realizar sus viajes.

de matrícula (*automatic number plate recognition* o ANPR), que consiste en un conjunto de cámaras que fotografían la matrícula de los vehículos para su identificación (Universidad de los Andes y UCL, 2013). En el piloto, se priorizó el uso de la tecnología DSRC; sin embargo, debido a su óptimo desempeño, se decidió utilizar la tecnología ANPR para la implementación definitiva del sistema (Eliasson, 2008).

Como resultado de la implantación de los cargos de congestión, se redujo el tráfico vehicular, los tiempos promedio de viaje y las emisiones de dióxido de carbono. Además, se mejoró la seguridad vial y se incrementó el uso del transporte público (Eliasson et al., 2009).

<sup>2</sup> De manera referencial, el término REST se utiliza en arquitectura de software para describir cualquier interfaz de sistemas basados en el protocolo HTTP y sirve para obtener y generar datos e indicar la ejecución de operaciones sobre estos datos.

## La digitalización en la integración del sistema de transporte público de Santiago (Chile)

En febrero de 2007 se inauguró Transantiago (hoy conocido como Red Metropolitana de Movilidad), sistema de transporte integrado multimodal compuesto por el servicio de buses, metro y tren suburbano Metrotren Nos.

Transantiago es coordinado y supervisado por el Directorio de Transporte Público Metropolitano, una agencia estatal que depende del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. La operación de los buses está a cargo de siete compañías privadas, cada una con una flota de entre 400 y 1.200 buses. Por su parte, el metro y Metrotren Nos son operados respectivamente por Metro S.A. y Tren Central. Existen cuatro compañías que ofrecen servicios complementarios al sistema: la administración financiera; la gestión, venta y red de recarga de la tarjeta inteligente; servicios tecnológicos para las compañías de buses; y servicios tecnológicos para el metro (Gschwender et al., 2016).

El sistema utiliza una tarifa integrada por viaje que permite realizar hasta dos transbordos en un período de dos horas en una misma dirección. Si el viaje se realiza en hora pico o

incluye el uso del metro, el valor del pasaje es un poco mayor (DTP Metropolitano, 2020b).

El sistema electrónico de pago de pasajes (SEPP) se basa en una tarjeta inteligente sin contacto, denominada Tarjeta bip!. Esta es la única opción de acceso y pago en los buses y la más popular en el metro, alcanzando un muy alto nivel de penetración, puesto que se utiliza en el 97 % de los cerca de 4,5 millones de viajes diarios en el sistema de transporte público (Gschwender et al., 2016).

La implementación de este sistema permitió el establecimiento de una tarifa integral y la adopción de una tarjeta como medio de pago, agilizó el acceso al sistema de transporte público y mitigó los riesgos asociados con la siniestralidad. Adicionalmente, la digitalización facilitó la recolección de datos para realizar estudios de rutas origen-destino, mejorar los niveles de calidad y servicio del transporte público, aumentar la velocidad de los buses y reforzar la seguridad del medio de pago, entre otros.

## Análisis de movilidad a través de *big data* y analítica de datos en la provincia de Neuquén, en la Patagonia argentina

En la municipalidad de Neuquén, a través de un proyecto liderado por la administración local, financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) e implementado por Telefónica, se realizó un estudio de movilidad urbana utilizando herramientas de *big data* y analítica de datos. En él se analizó la información proveniente de los teléfonos móviles, reemplazando de esta forma las encuestas de movilidad como fuente primaria de información y resolviendo en gran medida las debilidades de dichas encuestas.

La solución se basó en seguir la actividad de los teléfonos móviles, determinando su posición, por medio de la triangulación de señales de al menos tres antenas, y el seguimiento de su actividad a partir de los registros detallados de llamadas (*call detail record* o CDR). Dichos registros, también denominados xDR, se generan cuando se recibe o realiza una llamada o un mensaje de texto y cuando se interactúa con el internet (*internet access logs*). La herramienta desarrollada dentro de este proyecto registró varios atributos asociados con estos eventos, entre los que se encontraban la hora, duración, identificación de la fuente, del destino y de la antena a la que se conectaba el dispositivo, entre otros, pero

sin incluir el contenido de la transacción (Rendón et al., 2020; Gutiérrez Puebla et al, 2019).

El análisis de los registros de actividad de los teléfonos móviles de cada usuario constituye lo que se conoce como la huella digital y arroja información sobre la localización del usuario en el espacio y en el tiempo. De esta forma, es posible determinar los periodos en los que una persona permanece en un mismo lugar (secuencias de registros consecutivos en una misma localización) y los viajes entre lugares (registros consecutivos en los que cambia la localización del usuario) (Gutiérrez Puebla et al., 2019). Los datos de tráfico utilizados en el proyecto se enriquecieron con información recolectada a través de encuestas enviadas por mensajes de texto SMS, con los que se consultó, entre otras cosas, información sociodemográfica, el motivo del viaje y el método de transporte utilizado.

Los datos fueron extraídos en un período de tiempo determinado, anonimizados para proteger la identidad de los usuarios, agregados en zonas espaciales y finalmente extrapolados para representar a la población total de la ciudad. A partir del análisis de datos mediante técnicas de *big data* y

analítica de datos, se elaboraron modelos de estimación de la demanda de transporte con el fin de atender las altas tasas de crecimiento poblacional y realizar estudios de movilidad. A través de este proyecto, se elaboraron patrones de movilidad

y matrices de origen-destino, tanto totales como por franjas horarias, y se facilitó el empleo de tecnologías de uso diario (teléfonos celulares) para la construcción de modelos de movilidad en lugar de encuestas (Gutiérrez Puebla et al., 2019).

## La digitalización del metro de São Paulo (Brasil)

El metro de São Paulo es un sistema de transporte público que cuenta con 101 km de extensión, divididos en 6 líneas con 89 estaciones, y funciona a una velocidad media de 60 km/h. Es operado por la Empresa Metropolitana de São Paulo (METRO), una empresa de capital mixto, donde la parte mayoritaria pertenece al Gobierno de São Paulo, que ejerce el control de sus actividades (Railway Technology, 2021; CAF, 2021).

En algunas de sus líneas, el metro de São Paulo cuenta con un sistema de control de trenes basado en comunicaciones (*communications based train control* o CBTC) y sistemas automáticos de señalización y comunicación que permite que los trenes operen sin la necesidad de un conductor. El metro también dispone de un sistema de información al pasajero, videovigilancia, control del acceso y un sistema de supervisión y adquisición de datos (*Supervisory control and data acquisition* o SCADA), utilizado para monitorear y controlar las líneas del metro, las estaciones y los sistemas de comunicación y video (Railway Technology, 2021; CAF, 2021).

También se ha implementado un centro de control operacional (CCO), desde el cual se dirige y regula el funcionamiento del sistema. Este sistema permite monitorizar el consumo de energía de las estaciones y equipos del metro, así como controlar el flujo de la flota.

En el año 2019 la Empresa Metropolitana de São Paulo abrió una licitación para la implementación de un sistema electrónico de monitoreo para las tres primeras líneas del metro (1-Azul, 2-Verde, 3-Roja). El concurso comprendía el diseño, suministro, instalación y pruebas de los equipos de imágenes para monitorear a las personas, las instalaciones del metro y el centro de control de operaciones, entre otros. Este sistema incluía funciones de inteligencia, tales como el reconocimiento facial, la identificación y seguimiento de objetos y un novedoso sistema de detección de invasión de áreas. El objetivo principal con la instalación de este sistema era mejorar y aumentar la seguridad operativa del metro, teniendo una autonomía de hasta 30 días en el almacenamiento de imágenes (Alamys, 2019). De acuerdo con la Asociación para Maquinaria de Computación (ACM, por sus siglas en inglés), la plataforma cuenta con 5.200 cámaras digitales de alta definición, capaces de escanear los rostros de

4 millones de pasajeros por día y de comunicarse con la base de datos de la policía para ayudar a las autoridades a localizar a los delincuentes (Mari, 2020).

Adicionalmente, con el fin de mejorar los niveles de consumo de energía, en el año 2020, el Metro de São Paulo inició, junto con 14 empresas y consorcios, un proyecto de energía renovable. Su objetivo es controlar el consumo de energía en función de la cantidad de usuarios que estén en el sistema y la capacidad de generación de las fuentes de energía alternativa, a partir de la información recopilada por las cámaras de video, el sistema de monitoreo SCADA y los GPS de cada tren.

Se espera que, con la instalación de sistemas de videovigilancia de reconocimiento facial, disminuya el fraude por el no pago de pasajes y que la implementación del sistema de energía renovable ahorre un 30 % en la electricidad consumida por la red de transporte (PV magazine, 2020; Electricidad, 2015).

Es importante destacar que la instalación del sistema de videovigilancia de reconocimiento facial ha suscitado debates promovidos por ciertos grupos de la sociedad civil. Estos argumentan que no se cuenta con los sistemas de seguridad necesarios para proteger la información recopilada de los usuarios, lo que supone barreras a la implementación de este tipo de soluciones (Mari, 2020; Rendón et al., 2020; Gutiérrez Puebla et al., 2019).



# Resumen de los principales hallazgos de las experiencias internacionales

Las experiencias presentadas en el apartado anterior han proporcionado un conjunto de hallazgos, en cuanto a sus impactos y las barreras encontradas, que se presentan sucintamente en el Cuadro A.2 6.

En general, se encuentra que todas las experiencias internacionales estudiadas son aplicables en el caso de América Latina, con excepción de la experiencia de Singapur, donde se desarrolló un sistema integral para solucionar diferentes problemáticas de movilidad que podrían requerir grandes inversiones, aunque es una política que podría implementarse en el largo plazo.

Cuadro A.2 6 — Resumen de los principales hallazgos de las experiencias internacionales analizadas

Experiencia	Problema	Solución	Impacto	Barreras	Eslabón de la cadena de valor
<b>Singapur</b> Digitalización del sistema de transporte público	Alta demanda de desplazamientos y restricciones de crecimiento de la red vial	Desarrollo de un sistema inteligente mediante sistemas de control, monitoreo y vigilancia, gestión de la información y del recaudo	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Sistema de control para gestionar el flujo del tráfico y la seguridad en vías e intersecciones a través de semáforos inteligentes y sistemas de señalización dinámica</li> <li>– Sistemas de monitoreo y vigilancia para verificar el cumplimiento de las normas de tránsito</li> <li>– Sistemas de gestión de la información para obtener reportes del tráfico y del transporte público</li> <li>– Sistemas de recaudo para procesar las transacciones del pago de tarifas en el transporte público, parqueaderos y peajes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Definición de los protocolos de interoperabilidad V2I y V2V</li> <li>– Las medidas adoptadas deben reflejarse en la experiencia del usuario para que tengan una mayor y más rápida aceptación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Usuarios de los sistemas de transporte público</li> <li>– Usuarios de vehículos de transporte particular</li> <li>– Operadores del sistema de transporte público</li> <li>– Fabricantes de vehículos</li> <li>– Fabricantes de sistemas de control de tránsito</li> <li>– Fabricantes de sistemas de señalización del tráfico</li> </ul>
<b>Finlandia</b> Movilidad como servicio	Crecimiento del número de vehículos, incremento de los niveles de congestión y los índices de contaminación ambiental	Desincentivar el uso del vehículo privado mediante la planeación del viaje a través de medios de transporte alternativos	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Aplicación para desincentivar el uso del vehículo privado como medio de transporte</li> <li>– Integración de servicios de transporte públicos y privados, en medios individuales y colectivos</li> <li>– Planeación del viaje considerando las condiciones del tráfico y las preferencias de los usuarios</li> <li>– Gestión de la reserva y compra de tiquetes electrónicos para diferentes modos de transporte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Su implementación depende del estado de madurez de la ciudad en el ámbito social, regulatorio, tecnológico y de infraestructura de transporte</li> <li>– Se debe tener en cuenta la experiencia del usuario en el diseño de la solución</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Usuarios de los sistemas de transporte público</li> <li>– Operadores del sistema de transporte público</li> <li>– Usuarios de vehículos de transporte particular</li> </ul>
<b>Suecia</b> Implementación de cargos por congestión en Estocolmo	Crecimiento del tráfico en el centro de la ciudad, causando altos niveles de congestión	Cobro de peaje al ingresar o salir del centro de la ciudad con el fin de desincentivar el uso del vehículo particular	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Disminución del tráfico vehicular</li> <li>– Reducción de los tiempos de viaje</li> <li>– Reducción de la huella de carbono</li> <li>– Disminución de los siniestros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Escepticismo de los ciudadanos sobre los beneficios que traen estas medidas</li> <li>– Definición de formas a través de las cuales se realizará el pago</li> <li>– Los beneficios deben verse reflejados de forma rápida para que los ciudadanos acepten este tipo de iniciativas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Usuarios de los sistemas de transporte público</li> <li>– Usuarios de vehículos de transporte particular</li> <li>– Operadores del sistema de transporte público</li> <li>– Fabricantes de vehículos</li> <li>– Fabricantes de sistemas de control del tránsito</li> </ul>

Experiencia	Problema	Solución	Impacto	Barreras	Eslabón de la cadena de valor
<b>Chile</b> Digitalización en la integración del sistema de transporte público de Santiago	Sistema de transporte público ineficiente y congestionado, con largos recorridos, tiempos de viaje largos y recolección del dinero por el conductor	Implementación de un sistema de transporte integrado multimodal con buses equipados con GPS y sistema electrónico de pago	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementación del sistema electrónico de pago de pasajes (SEPP)</li> <li>- Integración e interoperabilidad de diferentes modos de transporte</li> <li>- Establecimiento de una tarifa integral</li> <li>- Agilización del acceso a los buses y minimización del riesgo de siniestros</li> <li>- Recopilación de datos para realizar estudios de rutas origen-destino, calidad del servicio, velocidad de los buses y seguridad del medio de pago, entre otros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se debe garantizar la interoperabilidad de la tarjeta inteligente para realizar los pagos</li> <li>- Contar con un sistema de venta y recarga de tarjetas por toda la ciudad que garantice el acceso a toda la población</li> <li>- Se debe definir un esquema claro de repartición de gastos, ganancias y responsabilidades entre las distintas empresas que conforman un sistema de transporte integrado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Usuarios de los sistemas de transporte público</li> <li>- Operadores del sistema de transporte público</li> </ul>
<b>Argentina</b> Análisis de movilidad a través de <i>big data</i> y analítica de datos en la provincia de Neuquén, en la Patagonia argentina	Elaboración de modelos de estimación de la demanda de transporte para hacer frente a alta tasas de crecimiento poblacional	Uso de herramientas de <i>big data</i> y analítica de datos para estudiar la movilidad a partir de la información proveniente de los teléfonos móviles	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Análisis de los registros de actividad de los teléfonos móviles (huella digital)</li> <li>- Obtención de la información sobre la localización del usuario en el espacio y en el tiempo</li> <li>- Identificación de los periodos en los que una persona permanece en un mismo lugar y trayectos que realiza</li> <li>- Elaboración de patrones de movilidad y matrices de origen-destino, tanto totales como por franjas horarias</li> <li>- Empleo de tecnologías de uso diario (teléfonos celulares) para la construcción de modelos de movilidad, en lugar de encuestas domiciliarias</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Garantizar la protección y seguridad de los datos recopilados de los usuarios</li> <li>- Regulación relacionada con el procesamiento de información recopilada a partir de teléfonos celulares</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Usuarios de los sistemas de transporte público</li> <li>- Operadores del sistema de transporte público</li> <li>- Operadores de las redes de telecomunicaciones</li> </ul>
<b>Brasil</b> Digitalización del Metro de São Paulo	Mejorar la operación del sistema mediante la optimización de los niveles de consumo de energía y minimizar los fraudes asociados con el pago de los pasajes que perjudican al sistema, entre otros aspectos	<p>Sistema automático que permite la operación de los trenes sin conductor</p> <p>Sistema de control de trenes basado en comunicaciones (CBTC)</p> <p>Centro de control de operaciones</p> <p>Sistema de control de acceso</p> <p>Instalación de un sistema para el monitoreo de personas y de reconocimiento facial</p> <p>Implementación de un proyecto de energía renovable para alimentar la operación del metro</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se estima un ahorro del 30 % en los costos de la energía consumida por el sistema</li> <li>- Se espera una reducción de la criminalidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cumplimiento de la normatividad de protección de datos personales</li> <li>- Protección de los derechos de menores de edad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Usuarios de sistemas de transporte público</li> <li>- Operadores del sistema de transporte público</li> </ul>

# Beneficios incrementales del componente de digitalización

A continuación, se exponen los principales beneficios económicos que genera la digitalización en el sector de la movilidad, tanto en transporte público como privado.

## Reducción de los tiempos de viaje

La digitalización de la movilidad actúa por dos vías sobre la velocidad de circulación y los tiempos de viaje de la ciudadanía (Cheng et al., 2020)<sup>3</sup>. En primer lugar, las nuevas tecnologías habilitan una serie de acciones por parte de las autoridades de tráfico impracticables con los métodos tradicionales:

- Control del tráfico. El despliegue de una red de sensores y cámaras en la red vial, incluso en vehículos conectados con la infraestructura, permite monitorear el flujo vehicular en cada arco de la red. Esta información procesada con algoritmos de inteligencia artificial ayuda a optimizar los intervalos de los semáforos de forma que el sistema se adapte a las condiciones del tráfico en tiempo real (Khan, 2019)<sup>4</sup>.
- Señal de precios. La tecnología digital facilita la implementación de sistemas de cargos a los usuarios de las vías, incluso en mallas urbanas<sup>5</sup>. Los sistemas de cargos a los usuarios implementados en Londres, Singapur, Estocolmo y Milán, entre otras ciudades, han mostrado que los viajes en vehículo particular son elásticos al precio. Cada ciudad ha adoptado su propio esquema en términos de tecnología (cámaras, sensores), definición del área de restricción, sistema de cobro (cruzar un límite o circular dentro de un perímetro) y precios (niveles, estructura, dinámicos o fijos). Con la imposición de estas medidas, en todos los casos analizados, se redujo el flujo vehicular, aumentó la velocidad del transporte público y privado y disminuyeron los tiempos de viaje.

La digitalización también facilita el cobro de peajes en la red nacional de carreteras. Los peajes electrónicos reducen los tiempos del tránsito de los vehículos por los pasos de peaje y evitan las colas en períodos de alta demanda.

En áreas urbanas, las nuevas tecnologías de cobro permiten estructurar proyectos de asociación público-privada (APP), que complementan la red vial y mejoran su desempeño, como en el caso de las autopistas en Santiago. Las concesiones viales en áreas urbanas se pueden estructurar porque existe la tecnología digital para la detección del vehículo, el cobro por el uso de la infraestructura y el recaudo en interconexión con el sistema financiero<sup>6</sup>.

La reducción en los tiempos de viaje también responde a acciones de los usuarios de las vías apoyadas en la infraestructura digital y su conexión con equipos en los vehículos:

- Los conductores toman sus decisiones de viaje con más información. La digitalización de la infraestructura vial y las aplicaciones digitales que procesan la información derivada permiten a los usuarios anticipar las condiciones de la ruta en términos de congestión, clima, siniestros, obras y eventos en la vía. Esos datos dan a los usuarios la posibilidad de tomar decisiones que reducen la congestión, tanto para su propio viaje como para otros que se encuentran en circulación. Entre estas decisiones está la

3 En el análisis econométrico de Cheng et al (2020), realizado con base en encuestas a los hogares en Estados Unidos, se encontró evidencia de la causalidad entre la digitalización de la movilidad y los tiempos de viaje: con las nuevas tecnologías se reduce el número de viajes y su duración, y se acorta la distancia de los trayectos.

4 El estudio de Khan reporta crecimientos de entre el 5,0 % y el 5,6 % en la velocidad del flujo, una reducción al 66 % en la cola máxima promedio y una disminución del 32,4 % del retraso por paradas.

5 Interrumpir el tráfico en una vía urbana congestionada para cobrar un peaje genera un costo social mayor que el recaudo del respectivo peaje, por sus efectos en la velocidad del flujo y los tiempos de viaje.

6 La provisión de capacidad vial en áreas urbanas es un reto para la política pública. En zonas urbanas densas, el precio del suelo es muy elevado y, en consecuencia, los costos de ampliar la capacidad vial son prohibitivos. Dimensionar una red vial urbana con la capacidad necesaria para movilizar los flujos esperados en horas pico a velocidades "normales" exige recursos económicos muy superiores a los que imponen soluciones alternativas, como gestionar la demanda a través de los precios o fortalecer la oferta de transporte público colectivo. Por otra parte, la construcción de vías tiene indivisibilidades que impiden suministrar exactamente la cantidad de capacidad necesaria para satisfacer la demanda, lo que implica subdimensionar o sobredimensionar la malla. En el primer caso, los usuarios tienen que soportar los costos que impone la congestión; en el segundo, se genera un lucro cesante por la capacidad subutilizada.

de aplazar o anticipar el viaje y cambiar de ruta o modo de transporte.

- Los vehículos conectados reducen los tiempos de reacción. Los vehículos equipados con sensores que detectan la presencia de obstáculos y procesan la información

para enviar alertas e incluso tomar decisiones, como frenar<sup>7</sup>, pueden responder más rápido a las condiciones cambiantes del flujo vehicular y reducir los tiempos de reacción. Estos equipos (incluidos los autónomos) permiten aumentar la velocidad media y acortar los tiempos de viaje.

## Reducción de los costos de operación de los vehículos

El aumento en la velocidad promedio reduce los costos de operación de los vehículos, particularmente el consumo de combustible. El rendimiento de los motores, dado en km/ galón, m<sup>3</sup>/km o kWh/km, para vehículos con diésel o gasolina, gas natural o energía eléctrica, respectivamente, se comporta como una función polinómica de la velocidad. A velocidades bajas el consumo por kilómetro es alto. A medida que aumenta la velocidad se reduce el consumo por kilómetro, hasta un límite de velocidad de óptimo rendimiento. Velocidades más allá de este umbral se traducen en mayores consumos de energía por kilómetro. En áreas urbanas, normalmente la velocidad promedio se encuentra en el

rango creciente de la función velocidad/eficiencia. Es decir, si aumenta la velocidad, se reduce el consumo de energía por kilómetro y con ello los costos de operación de los vehículos.

De lo anterior se desprende que los conductos por los cuales la digitalización de la movilidad aumenta la velocidad, descritos en la sección anterior, son los mismos que inciden en una reducción de los costos de operación de los vehículos: optimización en el control de los flujos de tráfico, establecimiento de cargos a los usuarios y peajes electrónicos, sistemas de información a los usuarios de las vías y vehículos conectados con la infraestructura.

## Reducción de la emisión de contaminantes

La digitalización de la movilidad se puede traducir en una mejor calidad del aire que se respira en las ciudades. Como se explicó, el aumento en la velocidad promedio de circulación de los vehículos reduce el consumo de combustibles fósiles y con ello la emisión de contaminantes al aire. Por esta razón, las causas identificadas entre movilidad y velocidad promedio de circulación también se traducen en un impacto ambiental positivo de los proyectos de digitalización.

Por otra parte, la infraestructura digital cuenta con aplicaciones específicas para reducir las emisiones gestionando carriles o corredores. Por ejemplo, sobre infraestructuras equipadas con tecnología digital de monitoreo y control es posible

adoptar medidas de gestión de la demanda (diferentes al precio), como establecer carriles exclusivos para vehículos con varios pasajeros o restricciones de acceso a vehículos contaminantes en áreas densas y con problemas ambientales.

La digitalización, finalmente, incentiva la penetración de los vehículos amigables con el ambiente, como bicicletas, patinetas o autos eléctricos compartidos. Estos vehículos en alquiler pueden ser localizados (GPS), habilitados y se puede pagar por su uso a través de aplicaciones en los teléfonos móviles. La electricidad como fuente de energía tiene cero emisiones en la fase de uso.

## Reducción de los siniestros

Los vehículos autónomos y conectados con la infraestructura están equipados con sistemas de comunicación inalámbricos avanzados, computador para procesar a bordo, sensores de vehículos y GPS. Estos equipos, unidos a la digitalización de la infraestructura, les permiten anticipar situaciones de riesgo

y actuar automáticamente para evitarlas. En el caso de los vehículos no conectados con la infraestructura, la existencia de equipos de monitoreo ayuda a las autoridades a disuadir de infringir la norma y alertar a los conductores ante posibles situaciones de riesgo.

<sup>7</sup> Aún sin considerar los vehículos autónomos, que se encuentran en fase de desarrollo para su uso masivo, las nuevas generaciones de vehículos actualmente en el mercado están equipados con tecnologías que facilitan la conducción y elevan la seguridad.

Algunos estudios reportan reducciones significativas en la siniestralidad con la generalización de vehículos conectados a la infraestructura (V2I). Un estudio experimental en Australia, por ejemplo, reportó una reducción de entre el 37 % y el

86 % en el número de víctimas mortales con la introducción del frenado automático y los sistemas de alerta en vehículos conectados en el sur del país (Khan et al., 2019).

## **Optimización de la operación del transporte público**

Los apoyos digitales para monitorear las condiciones de las vías en tiempo real aportan información del tráfico y la demanda para alimentar la programación de los despachos de buses y mejorar el servicio en un corredor.

Por otra parte, con las tecnologías digitales, las autoridades tienen la capacidad de monitorear la trayectoria de los buses de servicio público y otorgarles prioridad a su paso por las intersecciones semaforizadas<sup>8</sup>. Con esta medida se puede

imponer un castigo de mayor tiempo de desplazamiento a los usuarios del transporte privado, mientras que se aumenta la velocidad y el atractivo para los usuarios del transporte público. En América Latina, un porcentaje mayoritario de la población aún se desplaza en transporte público.

Finalmente, la telemetría puede anticipar fallas mecánicas, con lo cual se programan oportunamente las intervenciones de mantenimiento y se reducen los eventos durante su operación.

## **Reducción de los costos asociados con el recaudo en el transporte público**

El pago del servicio con tarjetas magnéticas u otros medios digitales reduce los costos del recaudo, el manejo de dinero en efectivo y la administración de fondos.

## **Mayor seguridad en el transporte público**

La digitalización en los estándares de seguridad en el transporte público contribuye a reforzar la seguridad de los usuarios. El monitoreo en tiempo real de los vehículos y pasajeros, mediante cámaras de vigilancia y sistemas de

alarma conectados directamente con los operadores del sistema de transporte público y las autoridades, disuade los comportamientos criminales y aumenta la probabilidad de captura y condena cuando se comenten delitos.

## **Planeación de la infraestructura**

La información en tiempo real del flujo vehicular y la capacidad en cada sector de la malla vial permite alimentar los modelos de transporte para identificar cuellos de botella y priorizar inversiones. Con la información digital es posible mejorar las estimaciones del horizonte de tiempo en que cada sector vial alcanza los niveles de saturación, lo que permite programar inversiones para evitar situaciones de congestión.

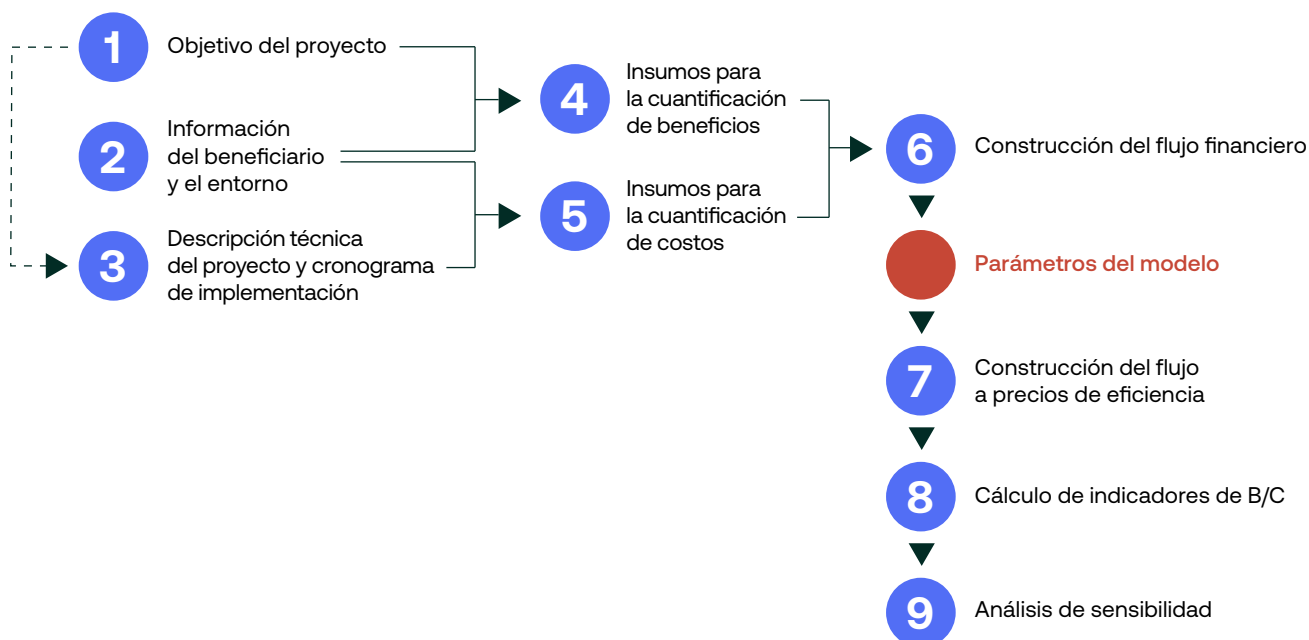
<sup>8</sup> Como, por ejemplo, el TSP (Transit Signal Priority).

# Formulación y evaluación técnico-económica de proyectos de digitalización del sector de la movilidad paso a paso

En esta sección de la Guía se describen las distintas etapas que se deben cubrir para formular y evaluar los proyectos de digitalización en el sector de la movilidad. Como se ilustra en la Figura A.2 8, los primeros pasos están dirigidos a definir el objetivo, los actores involucrados y el entorno del proyecto. En función de los objetivos, en el tercer paso se selecciona la alternativa tecnológica apropiada y se dimensionan los equipos a partir de la proyección de la demanda. En los pasos 4 y 5 se compila la información necesaria para estimar los beneficios y costos del proyecto. En el paso 6 se construye el flujo financiero del proyecto de digitalización, el cual

se traduce a precios de eficiencia en el paso 7, para considerar el valor económico de los beneficios generados y los recursos invertidos. En el paso 8 se estiman los indicadores beneficio-coste (B/C), que permiten determinar la conveniencia de llevar a cabo el proyecto de digitalización desde una perspectiva económica. Finalmente, en la última etapa se sugiere la metodología para llevar a cabo un análisis de sensibilidad que determine qué tan robustos son los resultados a los diferentes supuestos sobre los cuales se estructura el ejercicio de evaluación.

Figura A.2 8 — Estructura de la guía para formular y evaluar paso a paso proyectos de digitalización en el sector de la movilidad



# Objetivo del proyecto

El primer paso consiste en establecer los objetivos del proyecto. El formulador se debe preguntar cuáles son las necesidades específicas del sistema de movilidad que busca resolver con el proyecto de digitalización. Este puede estar dirigido a alcanzar uno o varios de los siguientes objetivos:

- Reducir los tiempos de viaje de los ciudadanos.
- Reducir los costos de operación de los vehículos.
- Reducir la emisión de contaminantes al aire.
- Reducir la siniestralidad.
- Optimizar la operación del transporte público.
- Reducir los costos del recaudo en el transporte público.
- Aumentar la seguridad en los sistemas de transporte público.
- Fortalecer la planeación de la infraestructura al servicio de la movilidad.

Estos objetivos, por su parte, se pueden alcanzar con estrategias variadas, como la digitalización del sistema de semáforos o la imposición de tarifas que envíen la señal de costos externos que generan los usuarios en vías congestionadas. También se puede lograr con la instalación de cámaras y dispositivos de telemetría en los vehículos de transporte público, el uso de información de celulares para alimentar matrices de origen-destino de los viajes o la

promoción de plataformas digitales que promuevan modelos disruptivos de movilidad compartida.

Los objetivos del proyecto se deben enmarcar en las políticas y programas de largo plazo trazadas a nivel nacional, regional o local para el sector. Además, deben ser claros en términos del impacto del proyecto sobre los indicadores más relevantes e, idealmente, dicho impacto debe ser cuantificable.

Las siguientes preguntas pueden ayudar a definir y precisar los objetivos del proyecto:

- ¿Cuál es o cuáles son los problemas que busca resolver el proyecto? Estos pueden ser altos índices de siniestralidad, de contaminación o de inseguridad; tiempos excesivos de viaje para los ciudadanos, altos costos en la operación del transporte público.
- ¿Se han analizado escenarios con diferentes alternativas para solucionar los problemas detectados? Por ejemplo, se puede contemplar no hacer nada, ampliar la capacidad vial, elevar la flota de buses en el transporte público, ampliar la presencia policial en los corredores de mayor afluencia de pasajeros o reducir los límites de velocidad.
- ¿Cuál ha sido el resultado de estos análisis?

## Descripción del promotor del proyecto y su entorno

Se debe enmarcar el proyecto en su entorno, lo que implica describir el contexto económico, social e institucional en el que se desenvuelve<sup>9</sup>. El contexto macro permitirá soportar las proyecciones de demanda que alimentan la evaluación del proyecto. El entorno institucional ayudará a identificar los actores involucrados en el éxito del proyecto y las debilidades y fortalezas de los responsables de su planeación, diseño, ejecución, operación y seguimiento. El entorno se puede describir con los siguientes elementos:

- Variables socioeconómicas del país, región o ciudad donde se lleva a cabo el proyecto (crecimiento histórico y esperado del PIB, población, tasas de inflación, de interés y de cambio, grado de urbanización, etc.). Los indicadores se pueden tomar de agencias especializadas en el monitoreo y proyección de la economía.
- Aspectos políticos, normativos e institucionales que determinan el entorno en que se desarrollará el proyecto<sup>10</sup>. En particular se deben responder las siguientes preguntas:

<sup>9</sup> Esta sección está basada en la guía de evaluación de proyectos de la Unión Europea (Comisión Europea, 2014).

<sup>10</sup> Ver "Incentivos y barreras de la digitalización" en la sección final de esta guía.

- ¿Existe alguna ley o norma sobre las características técnicas y funcionalidades de los equipos digitales (por ejemplo, para las cámaras o los sensores en la infraestructura o los vehículos)?
  - ¿Existe alguna ley o norma que regule las plataformas digitales para ofrecer servicios de movilidad?
  - ¿Existe alguna ley o norma que regule el uso del espacio público para parquear vehículos utilizados temporalmente (en arriendo) a través de plataformas digitales?
  - ¿Existe alguna ley o norma sobre la administración o gobernanza de los datos suministrados por los sensores, cámaras y otros dispositivos generadores de información sobre movilidad?
  - ¿Existe alguna ley o norma relacionada con la protección de datos personales?
  - ¿Existe alguna ley o norma relacionada con el arrendamiento de redes de terceros para la prestación de servicios de telecomunicaciones?
- Otros indicadores del entorno, como consideraciones ambientales o técnicas que incidan en el desarrollo del proyecto.
- Actitud de la población general y los usuarios ante el servicio y sus posibles soluciones. En particular es conveniente contar con un indicador que mida la actitud de los usuarios ante posibles esquemas de cargos (peajes urbanos, cargos de congestión o contaminación), la regulación de plataformas de servicios de transporte o la utilización de cámaras para monitorear la movilidad y la seguridad.

De igual forma, se debe describir al responsable del proyecto en cada una de sus etapas (planeación, estructuración, diseño, ejecución y operación). Se debe especificar si se trata de una empresa pública, una empresa privada, una asociación pública-privada (APP, por iniciativa pública o privada) o de una secretaría de la administración pública del nivel nacional, regional o local.

Desde el punto de vista financiero y de asignación de riesgos, se debe especificar si se trata de una operación soberana, en la cual el repago de la deuda con la banca multilateral está garantizado por el gobierno nacional, o no soberana, en cuyo caso el respaldo de la deuda recae sobre el flujo de caja esperado del proyecto. También hay que establecer si el proyecto cuenta con fuentes de pago propias y qué porcentaje de los ingresos se espera emplear para el cumplimiento de las obligaciones financieras. Se deben especificar, además, las fuentes para obtener los recursos faltantes, como, por ejemplo,

los presupuestos de la entidad prestadora del servicio o las agencias del ámbito local, regional o nacional.

Es necesario igualmente describir las principales variables operativas, tarifarias y financieras del operador responsable del proyecto:

- Red vial a su cargo (km por tipo).
- Parque automotor en la localidad por tipo de vehículo.
- Flujo vehicular en los principales corredores (tránsito promedio diario o TDP).
- Modos, capacidades y demanda de transporte público (pasajeros/día).
- En caso de administrar sistemas de peajes o cargos a usuarios, determinar el número de puntos de cobro, la tecnología de detección, las tarifas y el recaudo por tipo de vehículo.
- El vector tarifario del transporte público y la caracterización de la demanda en cada modo (viajes/año y perfil horario de la demanda).
- El vector tarifario de cargos a los usuarios por tipología vehicular (peajes o cargos de congestión o contaminación).
- Los estados financieros del responsable del proyecto.
- El organigrama y planta de la empresa o secretaría, indicando el área responsable del proyecto y los responsables de las etapas del proyecto tercerizadas (planeación, estructuración, ejecución, operación, seguimiento y regulación de los contratos).

En caso de que la empresa haya acumulado experiencia con proyectos de digitalización en el sector de la movilidad, conviene contar con una breve descripción que indique los factores de éxito o fracaso en los mismos.

El organismo responsable del proyecto debe ser descrito en cuanto a su capacidad técnica, financiera y administrativa para completar a satisfacción todas las actividades previstas. Eventuales vacíos o debilidades de la empresa para acometer alguno de los hitos del proyecto deben ser cubiertos por firmas especializadas bajo procesos de subcontratación.



# Descripción del proyecto

En este paso se establecen con claridad los elementos físicos y actividades que componen el proyecto, el cual debe constituir una unidad autocontenida con la capacidad de suministrar los bienes y servicios planteados en los objetivos<sup>11</sup>.

## Proyección de la demanda

Es preciso describir la demanda relevante en cada uno de los modos (automóvil, bicicleta, moto, bus, peatones, etc.) y los segmentos de la red cubierta por el proyecto. La caracterización de la demanda incluye viajes diarios, distancias por viaje, número promedio de transferencias y costos de viaje en transporte público (tarifa), entre otros aspectos. Esta información se extrae directamente de las encuestas de movilidad de la ciudad o de las matrices origen-destino en los modelos de planificación de la movilidad.

## Análisis de alternativas

Un proyecto específico es el resultado de un proceso de decisión múltiple en el cual se descarta la opción de no hacer nada, pero también la de no emprender proyectos alternativos. Conviene elaborar y comparar, con base en ejercicios simplificados de prefactibilidad, diferentes alternativas de formulación del proyecto para alcanzar los objetivos planteados. La comparación de opciones se basa en variables cuantitativas o en métodos multicriterio que involucran, además, variables de carácter cualitativo, definidas en aspectos estratégicos, tecnológicos y geográficos, entre otras. En la formulación de alternativas es necesario conformar el escenario de “no hacer nada”, que servirá como contrafactual para comparar los costos y beneficios entre la situación con y sin proyecto. El escenario de línea de base contiene los costos en que normalmente incurre el prestador del servicio para mantener las condiciones de movilidad bajo los parámetros objetivo.

Idealmente, los proyectos deben concebirse como la solución a un problema específico (por ejemplo, congestión vehicular con tiempos excesivos de viaje, contaminación, tasas altas de siniestralidad, ineficiencias o inseguridad en el transporte

En la identificación del proyecto se deben definir el área geográfica de cobertura, los beneficiarios y los responsables de cada una de las etapas en el ciclo del proyecto.

La proyección de la demanda (viajes y características de estos) se basa en modelos estimativos aceptados que consideran las proyecciones del entorno macroeconómico y parámetros robustos de elasticidades precios e ingreso. Las proyecciones deben considerar la disponibilidad de infraestructura y la oferta de transporte público en la línea de base y en las cohortes consideradas en el horizonte de proyección. Idealmente, las proyecciones se derivan de la simulación de escenarios en el marco de un modelo de transporte que contenga parámetros de costos y preferencias para las distintas rutas, modos y tipo de usuario.

público). Es decir, es necesario definir cuál es el problema que se quiere resolver antes de determinar la forma de hacerlo. Una vez definido el problema, se deben identificar posibles estrategias alternativas para solucionarlo. Cada alternativa constituye, entonces, un proyecto a evaluar. Si se sigue este procedimiento, no solo se asegura que los recursos se destinen a resolver problemas cuya solución es prioritaria, sino que, además, se cerciora de que la solución planteada corresponde a la alternativa más eficiente desde el punto de vista económico.

El valor agregado de los ejercicios de B/C no se limita al cálculo de los indicadores de evaluación. En el ejercicio también se exploran las alternativas para lograr los objetivos planteados, se valoran diferentes dimensiones para los equipos, se estudia la generación de beneficios y su forma de valorarlos, se investiga la oferta de equipos alternativos y los costos asociados. Estos esfuerzos, organizados alrededor de una evaluación B/C, sin duda contribuyen a la especificación del proyecto y permiten sustentar, sobre bases objetivas, las decisiones sobre la conveniencia de seguir adelante con la iniciativa de inversión.

<sup>11</sup> El análisis beneficio-costos requiere que el proyecto pueda proporcionar los productos esperados sin depender de la realización de otras acciones. En otras palabras, proyectos complementarios requeridos para lograr los objetivos del proyecto, se deberían englobar en un solo proyecto para su evaluación.

La digitalización puede constituir una opción más intensiva en capital para alcanzar las metas de eficiencia. Es conveniente plantear el proyecto alternativo que busca alcanzar estos objetivos a partir de las tecnologías tradicionales, de forma que se cuente con un contrafactual que permita trazar la línea de base del suministro del servicio en un esquema de mantenimiento del *status quo*.

En general, si se sobrestiman los costos en ausencia del proyecto, se estarían imputando a este beneficios excesivos. Es importante que la línea de base refleje la situación sin

proyecto, que no necesariamente corresponde a un escenario de inactividad por el responsable de la infraestructura.

Idealmente, se debe estructurar un proyecto con las tecnologías tradicionales y considerar una opción alterna con los componentes de digitalización. De esta forma, la conveniencia de la digitalización se puede analizar como el cambio incremental de beneficios y costos inducidos por estos componentes. En este caso, la evaluación económica se centrará en la comparación de los beneficios y costos incrementales que la digitalización impone al proyecto de infraestructura.

## Diseños técnicos, costos y cronograma de implementación

Este paso considera:

- La localización del proyecto. Esta supone la definición precisa de su ubicación (mapa), la disponibilidad de predios e inmuebles o la descripción de los procesos contractuales administrativos para su adquisición
- El diseño técnico. Se debe contar con una descripción de los activos que componen el proyecto (equipos, obra civil), la tecnología adoptada, los estándares y sus

especificaciones, los indicadores del nivel de producción y el alcance del proyecto.

- El plan de producción. Conlleva una descripción de la capacidad de la infraestructura y el factor de utilización esperado para cada año en el horizonte de análisis del proyecto.
- El cronograma de ejecución. Este debe aparecer desagregado en las principales actividades de ejecución.

## Insumos para la cuantificación de costos

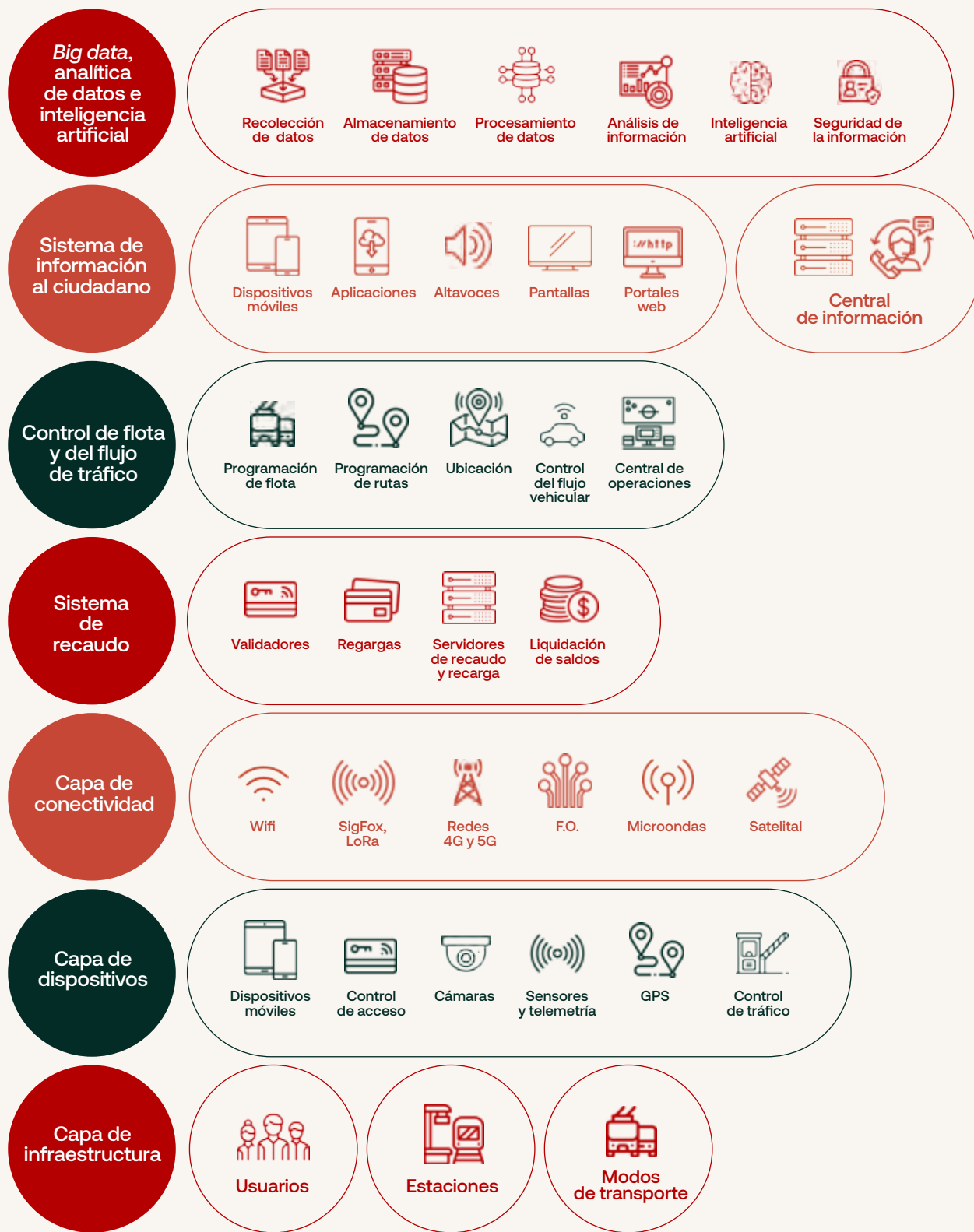
En este paso se determinan los insumos para la estimación de los costos de incorporación de las componentes de digitalización del proyecto (CAPEX y OPEX), considerando una

arquitectura de capas e indicando la metodología empleada (cotizaciones, información del estructurador del proyecto, etc.).

## Incorporación de los componentes de digitalización

Para describir la incorporación de los elementos de digitalización dentro de los proyectos de infraestructura del sector de la movilidad, la presente guía sigue una arquitectura compuesta por siete capas, como se presenta en la Figura A.2 9.

Figura A.2 9 — Esquemas y tecnologías digitales aplicados a infraestructuras y activos del sector de la movilidad



A continuación, se explican de manera esquemática los componentes de cada capa y su función.

### **Capa de infraestructura**

Está conformada por los usuarios, las estaciones del servicio público y los diferentes modos de transporte que pueden utilizar los ciudadanos para trasladarse de un lugar a otro, tales como el metro, los autobuses, automóviles, motocicletas y bicicletas.

### **Capa de dispositivos**

Corresponde a los elementos a través de los cuales se recopila la información sobre la operación y funcionamiento del sistema de transporte que permite la movilidad de los ciudadanos. En esta capa se encuentran los primeros elementos que incorporan componentes de digitalización, tales como:

- Los dispositivos móviles (celulares, tabletas, portátiles, etc.) de los usuarios que se movilizan por las carreteras utilizando diferentes modos de transporte públicos o privados.
- Los sistemas de control del acceso para utilizar el transporte público.
- Las cámaras instaladas para observar el comportamiento del sistema de transporte y de los usuarios.
- Los sensores, componentes de telemetría y dispositivos GPS que permiten ubicar y monitorear el flujo del tráfico vehicular y otros modos de transporte.
- Los sistemas de control del tráfico, como semáforos y peajes que permitirán la implementación de cargos de congestión o contaminación para desestimular el uso de automóviles particulares.

### **Capa de conectividad**

Está conformada por las redes y tecnologías de comunicaciones que transmiten la información entre las capas que conforman la arquitectura del sistema de transporte: i) dispositivos; ii) sistema de recaudo; iii) control de la flota y del flujo de tráfico; iv) sistema de información al ciudadano; y v) *big data*, analítica de datos e inteligencia artificial.

Para transmitir esta información se pueden utilizar redes propias o de terceros. En el caso de utilizar redes propias, estas se despliegan de forma paralela a la infraestructura vial. Son redes de telecomunicaciones conformadas por elementos como estaciones base, fibra óptica, enlaces microondas,

enlaces satelitales y otros equipos. Por su parte, el uso de redes de terceros se tipifica cuando se contratan servicios de telecomunicaciones de voz o datos o cuando se arrienda infraestructura para la instalación o despliegue de equipos de comunicaciones propios.

### **Sistema de recaudo**

Está compuesto por los diferentes componentes que controlan el acceso al sistema de transporte público, tales como tarjetas y otros medios de pago, puntos de acceso, sitios de recarga de pasajes, servidores que administran y gestionan el recaudo y las recargas para acceder al sistema y que permiten la liquidación de saldos. Algunos de los dispositivos de esta capa pueden incluir interfaces con el sistema financiero si se aceptan pagos con tarjetas emitidas por entidades bancarias.

### **Control de la flota y del flujo del tráfico**

A partir de la información recopilada a través de las cámaras y los sensores, los dispositivos de telemetría y GPS, se monitorizará el comportamiento del sistema de transporte, permitiendo la programación de rutas y salida de vehículos del transporte público. Así mismo, se podrá analizar el comportamiento de los usuarios que utilizan el servicio público y realizar el control del flujo vehicular de las vías públicas, lo cual facilitará la definición y el establecimiento de estrategias para mejorar la eficiencia del sistema de transporte.

### **Sistema de información al ciudadano**

Está compuesto por los elementos y la infraestructura a través de los cuales los ciudadanos acceden a la información del sistema de transporte. Además de la información sobre el servicio de transporte público, se podrá compartir información sobre el estado de las rutas, incidentes ocurridos en las vías y estimación de los tiempos de viaje, entre otras.

### **Análítica de datos e inteligencia artificial**

Esta capa hace referencia a los elementos de *hardware* y *software* que permiten tanto el almacenamiento y procesamiento de los datos recopilados como la gestión y el control de los dispositivos electrónicos de la capa de dispositivos. También incluye los componentes de ciberseguridad para salvaguardar y garantizar la seguridad de toda la información recopilada.

Dentro de esta capa se encuentran los proyectos que involucran la implementación de algoritmos de analítica de datos e inteligencia artificial para su aplicación a:

- Sistemas de control de tráfico en tiempo real.
- Sistemas de control de la flota del transporte público en tiempo real.
- Estudios de movilidad urbana y planificación del transporte mediante el uso de dispositivos electrónicos (sensores, celulares, GPS, DCSR, etc.).
- Sistemas de prevención y control del fraude y la criminalidad.
- Gestión de la información sobre las condiciones del tráfico y del transporte público.
- Otros proyectos que requieren el almacenamiento, procesamiento y análisis de datos orientados a mejorar las condiciones de movilidad o la integración de los modos de transporte.

## **Tecnologías digitales para la desintegración de procesos y la obtención de eficiencias**

La información recopilada por los diferentes elementos de la capa de dispositivos (celulares, cámaras de video, GPS, etc.) sirve para determinar el estado de las vías, planificar los viajes, gestionar el flujo del tráfico o mostrar eventos de tráfico en los sistemas de información geográfica (GIS). Por tanto, ayuda a mejorar la eficiencia de los sistemas de transporte al suministrar información útil para la planificación y gestión de las vías, así como para la toma de decisiones.

Para que esta información sea de utilidad, tanto para los usuarios como para los administradores del sistema de transporte, se deben incorporar técnicas de almacenamiento y procesamiento de datos avanzadas, como la analítica de datos y la inteligencia artificial.

Como ya se ha indicado, el desarrollo e implementación de estas tecnologías ayuda a monitorear, controlar y optimizar la operación de los sistemas de transporte público y el flujo del tráfico al facilitar la toma de decisiones en tiempo real por parte de las autoridades que gestionan la movilidad. Además, suministran a los usuarios información sobre las condiciones del sistema y de las vías, con las que puede mejorar sus tiempos de desplazamiento y optimizar el flujo vehicular en las carreteras. Igualmente posibilitan la implementación de medidas, como, por ejemplo, los cargos de congestión o contaminación, y el desarrollo de aplicaciones que permiten a los usuarios conocer las rutas y los modos de transporte

## **Metodología propuesta para la incorporación de componentes de digitalización**

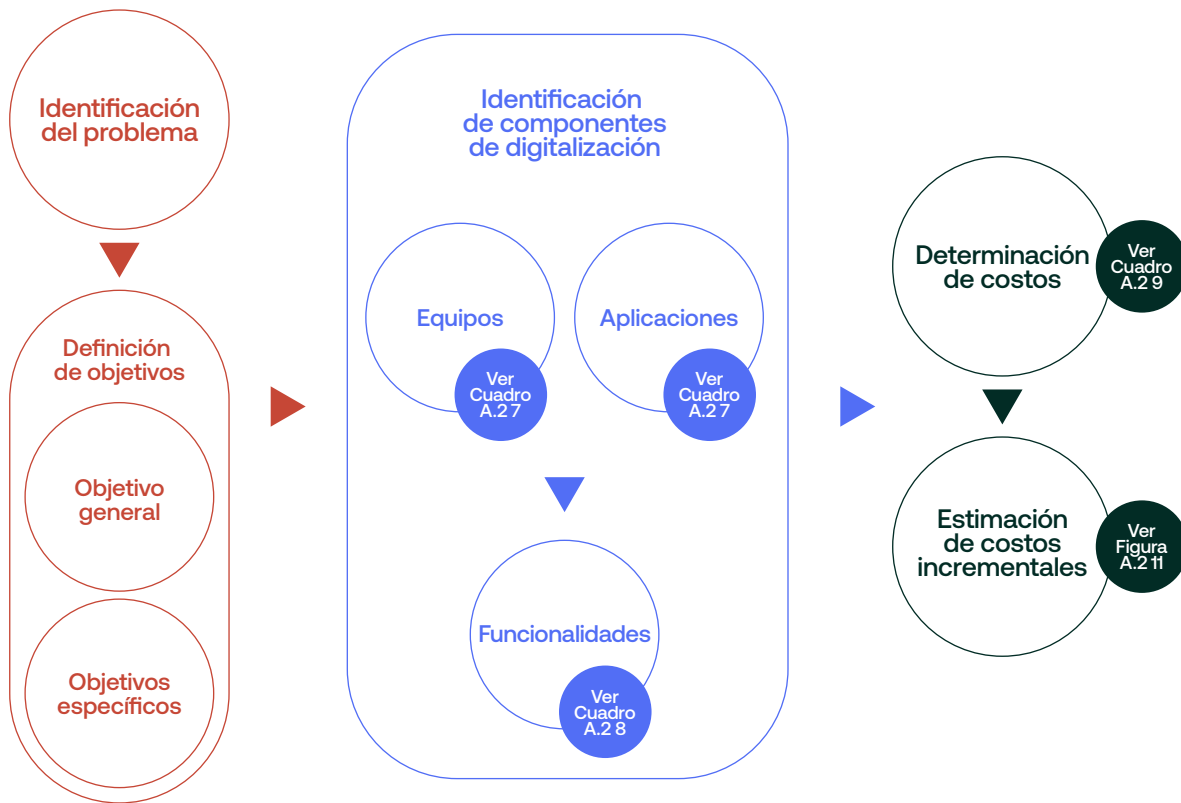
La metodología propuesta para la incorporación de componentes de digitalización en los proyectos de infraestructura del sector de la movilidad se describe a continuación y se presenta de forma gráfica en la Figura A.2 10.

que minimizan los tiempos de viaje, que incentivan el uso del transporte público y otros modos alternativos de transporte, tales como las bicicletas y patinetas eléctricas, y resultan en eficiencias en los consumos energéticos y la disminución de la huella del carbono.

El despliegue y uso de sensores y cámaras mejora las condiciones de seguridad de los sistemas de transporte, puesto que pueden emitir alertas que lleguen a los usuarios del sistema. Esos dispositivos están orientados a prevenir siniestros y acortar los tiempos de identificación de incidentes en las vías, facilitando el reporte de emergencias, acciones que contribuirán a mejorar la seguridad de las carreteras y, consecuentemente, a salvaguardar la vida de las personas. Estos elementos también habilitan la implementación de sistemas de monitoreo y vigilancia, a través de los cuales se identifican posibles violaciones a las normas de tránsito y emiten las sanciones correspondientes a los infractores.

Por su parte, tanto los sistemas digitalizados de control de la flota como los sistemas de recaudo en el transporte público permiten optimizar la operación del sistema de transporte público. Los primeros mejoran la frecuencia de las rutas al facilitar su programación en función de la demanda y los segundos agilizan los tiempos de abordaje, con lo cual se reducen los costos de operación del sistema.

Figura A.2 10 — Metodología propuesta para la incorporación de componentes de digitalización en los proyectos de infraestructura del sector de la movilidad



En primer lugar, se deben definir tanto la problemática que se busca resolver como el objetivo general y los objetivos específicos que se pretenden alcanzar con el desarrollo e implementación del proyecto.

A partir de estas definiciones, en las etapas de estructuración y diseño del proyecto se deben identificar los componentes de digitalización que contribuirán a solucionar las problemáticas y lograr los objetivos propuestos. Dentro de los componentes de digitalización que se pueden incorporar a los diferentes tipos de proyectos, se encuentran los siguientes:

### Digitalización de los sistemas de transporte público

- 1 Sistemas de control de flota, recaudo y facturación que emplean sensores en las vías, cámaras de video, torniquetes automáticos y elementos de recaudo para el pago de los pasajes o tiquetes para acceder al sistema. Entre otras funciones, estos elementos permiten:
  - i) programar los itinerarios y rutas, así como controlar el flujo de los vehículos y la coordinación de respuestas frente

a la materialización de riesgos durante la operación del sistema de transporte público ii) verificar la operación y el funcionamiento del sistema; iii) evaluar la conducción de los operarios y el estado y comportamiento de los pasajeros; iv) establecer en tiempo real el estado de las rutas, las demoras o los adelantos de los vehículos y la ocupación del sistema; y v) gestionar y controlar los mecanismos y procesos a través de los cuales los usuarios acceden al sistema de transporte público.

- 2 Sistemas de prevención y control del fraude y la criminalidad que utilizan, principalmente, cámaras de reconocimiento facial que se instalarían en las estaciones del sistema de transporte público y los corredores viales.

### Digitalización de los sistemas de control de tráfico

- 1 Proyectos de control del tráfico y de monitoreo y vigilancia, que incorporan el uso de diferentes dispositivos, como sensores en la carretera y los vehículos, sistemas de reconocimiento automático del número de matrícula (ANPR),

dispositivos dedicados de comunicaciones (*dedicated short-range communication* o DSCR), cámaras de video, semáforos inteligentes y señalización dinámica. A través de estos dispositivos se podrán implementar diversas funcionalidades, entre ellas: i) el ajuste de los estados de los semáforos de acuerdo con las condiciones del tráfico o para dar prioridad a vehículos de transporte público colectivos o los destinados a la atención de emergencias (ambulancias, policía, bomberos, etc.); ii) la prevención de siniestros mediante la generación de alertas; iii) el control y verificación del cumplimiento de los límites de velocidad; iv) la imposición de multas ante violaciones a las normas de circulación; v) la gestión de estacionamientos; y vi) la gestión de la infraestructura.

- 2 Sistemas de cobro electrónico por el uso de las vías, que se pueden implementar mediante sensores instalados en los vehículos y los puntos donde se cobran los peajes, con tecnologías DSCR o cámaras de video.
- 3 Estudios de movilidad urbana y planificación del transporte, donde la información puede ser recopilada a través de sensores instalados en los vehículos y las vías, los torniquetes para el acceso y salida de los usuarios del sistema de transporte público y los dispositivos que estos utilizan (tabletas, celulares, portátiles, etc.). Esa información es analizada usando técnicas de procesamiento de datos avanzadas, como el *big data*, la analítica de datos y la inteligencia artificial.
- 4 Proyectos de micromovilidad compartida con vehículos limpios, donde se utilizan sensores instalados en vehículos

destinados al transporte público, como bicicletas, patinetas y vehículos eléctricos, y para el desarrollo de aplicaciones que permitan su integración con el sistema de transporte público.

- 5 Gestión de la información sobre las condiciones del tráfico y del transporte público. Esta función involucra el uso de sensores —tanto en las carreteras y estaciones de transporte público como en los vehículos del transporte público— y cámaras de video. Además de la información provista por esos dispositivos, la gestión incluye la información recolectada a través de torniquetes y sistemas de recaudo, la cual es procesada para informar a los usuarios sobre el estado de las vías (incidentes, estado del flujo vehicular, estado de las carreteras, etc.) y del sistema de transporte público (lugar donde se encuentran ubicados, tiempo estimado de la llegada de los vehículos, ruta tomada, paradas que realizará la ruta, destino final de la ruta y tiempo estimado de llegada al destino del usuario).

Una vez seleccionados los componentes de digitalización que se incorporarán en los proyectos de infraestructura del sector, se deben identificar los equipos o aplicaciones requeridas para implementar sus funcionalidades.

En el Cuadro A.2.7 se presentan, para cada componente de digitalización, los equipos y aplicaciones que pueden necesitarse de acuerdo con las funcionalidades que se desean incorporar. En consecuencia, es importante notar que cada proyecto requerirá especificaciones y diseños técnicos detallados para determinar los equipos y aplicaciones que permitirán la implementación de las diferentes funciones.

Cuadro A.2.7 — Equipos o aplicaciones requeridos para la implementación de los componentes de digitalización en los proyectos de Infraestructura del sector de la movilidad

Equipo o aplicación	Control del tráfico, monitoreo y vigilancia	Sistemas de control de la flota, recaudo y facturación	Sistemas de cobro electrónico por el uso de las vías	Estudios de movilidad urbana y planificación del transporte usando <i>big data</i> , analítica de datos e inteligencia artificial	Sistemas de prevención y control del fraude y la criminalidad	Micromovilidad compartida con vehículos limpios (bicicletas, patinetas, carro eléctrico, etc.)	Gestión de la información (condiciones del tráfico y del transporte público)
<b>Capa de dispositivos</b>							
Sensores (en carreteras, estaciones de transporte público)	✓	✓		✓			✓
Sensores vehiculares (en buses, vagones de metro o de tren, vehículos de micromovilidad)	✓	✓	✓	✓		✓	✓

(continúa)

Equipo o aplicación	Control del tráfico, monitoreo y vigilancia	Sistemas de control de la flota, recaudo y facturación	Sistemas de cobro electrónico por el uso de las vías	Estudios de movilidad urbana y planificación del transporte usando <i>big data</i> , analítica de datos e inteligencia artificial	Sistemas de prevención y control del fraude y la criminalidad	Micromovilidad compartida con vehículos limpios (bicicletas, patinetas, carro eléctrico, etc.)	Gestión de la información (condiciones del tráfico y del transporte público)
Sistemas de cobro electrónico por el uso de vías y peajes electrónicos			✓				
Sistemas de ANPR	✓		✓				
Dispositivos dedicados de comunicaciones (DSRC)	✓		✓				
Cámaras de video (CCTV)	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Semáforos inteligentes	✓						
Señalización dinámica	✓						
<b>Capa de conectividad</b>							
<b>Redes propias</b>							
Estaciones base	T	T	T	T	T	T	T
Fibra óptica	T	T	T	T	T	T	T
Enlaces microondas	T	T	T	T	T	T	T
Enlaces satelitales	T	T	T	T	T	T	T
Otros equipos de comunicaciones	T	T	T	T	T	T	T
<b>Redes de terceros</b>							
Contratación de servicios de telecomunicaciones (voz o datos, canales dedicados o de otro tipo)	T	T	T	T	T	T	T
Arrendamiento de infraestructura	T	T	T	T	T	T	T
<b>Capa de recaudo</b>							
Torniquetes automáticos de acceso		✓		✓	✓		✓
Elementos de recaudo para diferentes medios de pago		✓		✓	✓	✓	✓
<b>Sistema de información al ciudadano</b>							
Pantallas					✓	✓	✓
Altavoces					✓	✓	✓
Centro de llamadas					✓	✓	✓
<b>Big data, analítica de datos e inteligencia artificial</b>							
Equipos de cómputo o computación en la nube (servidores, sistemas de almacenamiento)	P	P	P	P	P	P	P

(continúa)



Equipo o aplicación	Control del tráfico, monitoreo y vigilancia	Sistemas de control de la flota, recaudo y facturación	Sistemas de cobro electrónico por el uso de las vías	Estudios de movilidad urbana y planificación del transporte usando <i>big data</i> , analítica de datos e inteligencia artificial	Sistemas de prevención y control del fraude y la criminalidad	Micromovilidad compartida con vehículos limpios (bicicletas, patinetas, carro eléctrico, etc.)	Gestión de la información (condiciones del tráfico y del transporte público)
Software y aplicaciones para el procesamiento de datos e imágenes, control del recaudo y facturación, control de la flota y flujo del tráfico, sistemas de información al ciudadano, control y acceso de los usuarios y ciberseguridad	P	P	P	P	P	P	P

Notas: En el cuadro se utilizan los siguientes símbolos:

✓ El equipo o la aplicación puede ser utilizada para implementar el componente de digitalización.

T Se requiere de una red de telecomunicaciones para transportar la información generada por los dispositivos de la capa de control o de la capa de seguridad hasta los centros de procesamiento donde se encuentran: i) los sistemas de información asociados con sistemas automáticos de medida y generación distribuida, ii) *big data* y analítica de datos; e iii) inteligencia artificial. Esta red puede ser propia (desplegada por el operador de movilidad), de terceros o una combinación de ambas.

P Indica que el equipo o la aplicación se requiere para el procesamiento de la información generada por los dispositivos de la capa de control o de la capa de seguridad.

Las funcionalidades de los equipos o aplicaciones de los componentes de digitalización de los proyectos de infraestructura del sector de la movilidad listados en el Cuadro A.2 8 se presentan en el Cuadro A.2 9.

**Cuadro A.2 8 — Funcionalidades de los equipos o aplicaciones requeridos para la implementación de componentes de digitalización en proyectos de infraestructura del sector de la movilidad**

Equipo o aplicación	Funcionalidades
<b>Capa de dispositivos</b>	
Sensores (en carreteras, estaciones de transporte público)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Generación de información para alertar a los conductores sobre el estado de las vías</li> <li>– Comunicación del tipo V2I y V2V</li> <li>– Monitoreo del flujo vehicular</li> </ul>
Sensores vehiculares (en buses, vagones de metro o de tren, GPS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Introducción de funciones de conducción automática</li> <li>– Introducción de funciones para el cobro de cargos por el uso de las vías</li> <li>– Generación de alertas para la prevención de siniestros</li> <li>– Ubicación y monitoreo de los vehículos</li> <li>– Comunicación con sistemas de información geográfica (GIS)</li> </ul>
Sistemas de cobro electrónico por el uso de vías y peajes electrónicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cobro de cargos por el uso de las vías</li> </ul>
Sistemas de reconocimiento automático del número de matrícula (ANPR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Identificación de las placas de los vehículos</li> <li>– Cobro de cargos por el uso de las vías</li> <li>– Imposición de multas a infractores</li> <li>– Control de la salida y llegada de vehículos de transporte público</li> </ul>

(continúa)

## Equipo o aplicación

## Funcionalidades

Dispositivos dedicados de comunicaciones (DSRC)	<ul style="list-style-type: none"><li>- Cobro de cargos por el uso de las vías</li><li>- Introducción de funciones que permitan conocer información relativa a la posición, dirección, velocidad y otros datos de interés de los vehículos</li></ul>
Semáforos inteligentes	<ul style="list-style-type: none"><li>- Detección automática de vehículos y de peatones que ajusta la duración de los estados del semáforo</li><li>- Cambios de estado para priorizar la circulación de ambulancias y vehículos de organismos encargados de garantizar la seguridad o de atención de emergencias</li><li>- Cambios de estado para priorizar la circulación de sistemas de transporte masivo</li><li>- Sistemas de alerta para proteger la vida de los peatones</li></ul>
Señalización dinámica	<ul style="list-style-type: none"><li>- Cambios de señalización para priorizar la circulación de ambulancias y vehículos encargados de garantizar la seguridad o de atención de emergencias</li><li>- Cambios en la señalización para priorizar la circulación de sistemas de transporte masivo</li><li>- Cambios en la señalización para informar de incidentes en la vía o prevenirlos</li><li>- Cambios en la señalización para modificar los límites de velocidad de acuerdo con las condiciones viales y del tráfico vehicular</li></ul>
Cámaras de video (CCTV)	<ul style="list-style-type: none"><li>- Vigilancia en los sistemas de transporte público (estaciones, buses y paraderos)</li></ul>

## Capa de conectividad

### Redes propias

Estaciones base	<ul style="list-style-type: none"><li>- Redes y protocolos de comunicaciones a través de los cuales se transmite la información entre las diferentes capas que conforman la arquitectura del sistema de movilidad</li></ul>
Fibra óptica	
Enlaces microondas	
Enlaces satelitales	
Otros equipos de comunicaciones	

### Redes de terceros

Contratación de servicios de telecomunicaciones (voz o datos, canales dedicados u otros)	<ul style="list-style-type: none"><li>- Servicios contratados de telecomunicaciones para transportar las señales desde los dispositivos de medición y control hasta los centros de monitoreo y control de la movilidad</li></ul>
Arrendamiento de infraestructura	<ul style="list-style-type: none"><li>- Arrendamiento de infraestructura de terceros para la instalación o despliegue de equipos que transportan las señales desde los dispositivos hasta los centros de monitoreo y control de la movilidad</li></ul>

## Capa de recaudo

Torniquetes automáticos de acceso	<ul style="list-style-type: none"><li>- Control de acceso al sistema de transporte público (autenticación y control de la entrada y salida de usuarios)</li></ul>
Elementos de recaudo para diferentes medios de pago	<ul style="list-style-type: none"><li>- Validación de los medios utilizados por los usuarios para acceder al sistema de transporte público</li><li>- Recaudo de los pagos realizados por los usuarios para acceder al sistema de transporte público</li><li>- Recargas a los medios de pago para el acceso al sistema de transporte público</li></ul>

## Sistema de información al ciudadano

Pantallas	<ul style="list-style-type: none"><li>- Despliegue o entrega de información sobre el flujo vehicular</li><li>- Estado de las vías</li></ul>
Altavoces	<ul style="list-style-type: none"><li>- Congestión y tráfico vehicular</li></ul>
Centro de llamadas	<ul style="list-style-type: none"><li>- Eventos que impactan el tráfico de las vías</li><li>- Despliegue o entrega de información sobre el sistema de transporte público</li><li>- Tiempo de espera de las rutas</li><li>- Paradas de las rutas</li><li>- Destino final de la ruta</li><li>- Despliegue o entrega de información sobre el tiempo estimado de llegada al destino</li><li>- Despliegue o entrega de información sobre los sistemas de micromovilidad con vehículos limpios</li><li>- Bicicletas</li><li>- Patinetas</li><li>- Vehículos eléctricos</li></ul>

(continúa)

**Big data, analítica de datos e inteligencia artificial**

Equipos de cómputo o computación en la nube (servidores, sistemas de almacenamiento)

Software y aplicaciones para el procesamiento de datos e imágenes, control del recaudo y facturación, sistemas de información al ciudadano, control y acceso de los usuarios y ciberseguridad

Equipos de cómputo y aplicaciones que permiten lo siguiente:

- Control de la flota de transporte público
- Programación de las rutas de transporte público
- Estudios de movilidad urbana
- Planificación de sistemas de transporte
- Procesamiento de imágenes
- Prevención de fraudes
- Integración de servicios de transporte de proveedores públicos y privados, en medios individuales y colectivos, a través de una única aplicación web o móvil
- Selección por parte de los usuarios de los modos de transporte y rutas que tomará de acuerdo con sus necesidades específicas y para la realización del pago por el uso de los modos de transporte mediante una cuenta única
- Control del flujo vehicular
- Portales web
- Aplicaciones de información al usuario
- Aplicaciones de micromovilidad compartida con vehículos limpios (bicicletas, patinetas, carros eléctricos)
- Aplicaciones de movilidad como servicio
- Reconocimiento facial
- Reconocimiento de placas para la identificación de vehículos
- Procesamiento de imágenes para identificar y prevenir fraudes y evitar el acceso a zonas restringidas
- Prevención y detección de actos criminales en el sistema de transporte público
- Prevención y detección de incidentes en las vías públicas
- Garantía de la integridad, confidencialidad y disponibilidad de los datos
- Encriptación y garantía de la privacidad de la información
- Prevención de ataques que amenacen la seguridad e integridad de los sistemas informáticos utilizados para gestionar los sistemas de transporte público y las vías públicas

Por último, la incorporación de los componentes digitales dentro de las infraestructuras del sector de la movilidad acarreará unos costos incrementales tanto de inversión (CAPEX) como de operación (OPEX). Los primeros están asociados a la instalación y puesta en servicio de los equipos y aplicaciones, mientras que los segundos resultan de la operación, mantenimiento o actualizaciones requeridas para su buen desempeño, como se presenta de forma esquemática en la Figura A.2 11.

Los costos incrementales de CAPEX y OPEX se evalúan de acuerdo con los componentes de digitalización y las funcionalidades que se implementen en las infraestructuras del sector de la movilidad. Estos se identifican mediante diseños técnicos y trabajos de ingeniería detallados, que permiten determinar los costos y cronogramas de implementación requeridos para cumplir con los objetivos y las proyecciones de la demanda del proyecto.

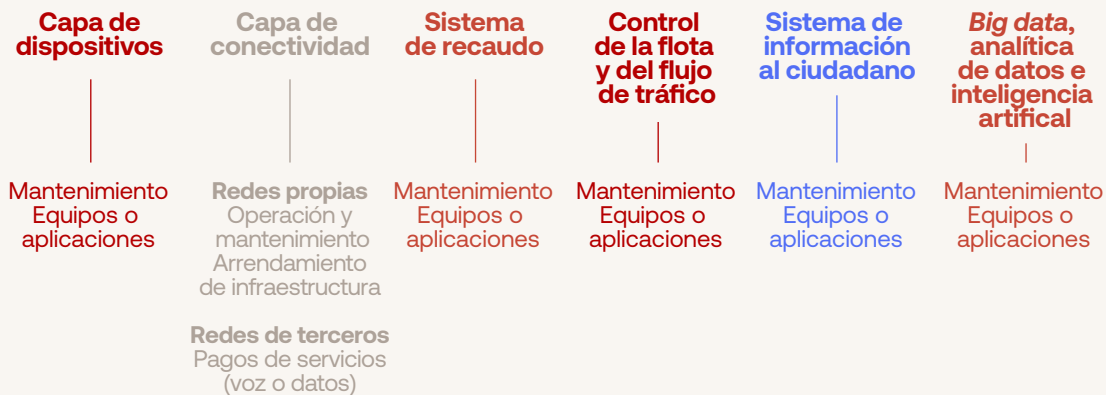
Los costos detallados de los equipos o aplicaciones específicos a utilizar en un proyecto dependen de múltiples variables, desde las especificaciones técnicas precisas hasta la selección del fabricante, pasando por factores que influyen los precios, como el país donde se implementa y las economías de escala y alcance del proyecto. Considerando lo anterior, en el Cuadro A.2 9 se presentan los principales determinantes del costo de los diferentes componentes en cada una de las capas de los proyectos en el sector de la movilidad.

Figura A.2 11 — Estimación de los costos incrementales asociados con la incorporación de componentes de digitalización en las infraestructuras del sector de la movilidad

## CAPEX Σ



## OPEX Σ



**Costos incrementales**

Cuadro A.2 9 — Determinantes de los costos (CAPEX y OPEX)  
para la digitalización de los proyectos de infraestructura del  
sector de la movilidad

Equipo o aplicación	Determinantes de los costos
<b>Capa de dispositivos</b>	
Sensores (en carreteras, estaciones de transporte público)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Tipo de sensores</li> <li>– Proximidad (V2V o V2I)</li> <li>– Pago de peajes o cargos de congestión o contaminación (V2I)</li> <li>– Soporte para la conducción autónoma (V2V o V2I)</li> <li>– Estado de la carretera (mojada, seca, etc.)</li> <li>– Parque vehicular de transporte público que contará con sensores V2V o V2I</li> <li>– Parque vehicular particular que contará con sensores V2V o V2I</li> <li>– Tecnología a través de la cual operarán los sensores V2V o V2I</li> <li>– Vías donde se implementarán los sistemas V2I</li> <li>– Cantidad estimada de sensores por tipo que se instalarán por vía</li> <li>– Costo del transporte, instalación y obra civil requerida</li> <li>– Cantidad de semáforos e intersecciones donde se implementarán los sistemas V2I</li> <li>– Funcionalidades y especificaciones de los sensores</li> </ul>
Sensores vehiculares (buses, vagones de metro o de tren, GPS)	
Sistemas de cobro electrónico por el uso de vías y peajes electrónicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Número de puntos en las vías donde se aplicarán cargos de congestión o contaminación</li> <li>– Número de puntos en zonas donde se implementarán sistemas de cobro electrónico por el uso de las vías</li> <li>– Cantidad de peajes electrónicos que se instalarán en las vías</li> <li>– Flujo máximo estimado de vehículos que transitarán por la zona donde se cobrarán cargos de congestión o contaminación en un periodo de tiempo determinado</li> <li>– Tecnología utilizada para el cobro de cargos de congestión o contaminación y peajes electrónicos</li> </ul>
Sistemas de reconocimiento automático del número de matrícula (ANPR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cantidad de sitios donde se instalarán sistemas DSRC               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Intersecciones viales</li> <li>• Vías con control de velocidad</li> <li>• Espacios públicos para la prevención e imposición de multas</li> <li>• Peajes y zonas donde se aplicarán cargos de congestión o contaminación que utilicen tecnología ANPR</li> <li>• Otros lugares donde se implementarán tecnologías ANPR</li> </ul> </li> <li>– Características técnicas de los sistemas ANPR</li> <li>– Costos de transporte, instalación y obra civil</li> </ul>
Dispositivos dedicados de comunicación (DSRC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Número de puntos (peajes, otro tipo de infraestructura urbana) donde se utilizará tecnología DSRC</li> <li>– Características técnicas de los sistemas DSRC</li> <li>– Costos de transporte, instalación y obra civil</li> </ul>
Semáforos inteligentes	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cantidad de intersecciones donde se instalarán los semáforos inteligentes</li> <li>– Cantidad de semáforos requeridos por intersección</li> <li>– Tecnologías a través de las cuales operarán los semáforos inteligentes</li> <li>– Funcionalidades incorporadas por los semáforos inteligentes</li> </ul>
Señalización dinámica	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Características técnicas de las señales de tránsito dinámicas</li> <li>– Cantidad estimada de señales de tránsito dinámicas que se instalarán por vía</li> <li>– Tecnologías a través de las cuales operarán las señales de tránsito dinámicas</li> <li>– Funcionalidades incorporadas por las señales de tránsito dinámicas</li> </ul>
Cámaras de video (CCTV)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Número de estaciones y paraderos de transporte público</li> <li>– Parque automotor del sistema de transporte público y número de cámaras por tipo de vehículo</li> <li>– Número de emplazamientos con monitoreo remoto</li> <li>– Características de las cámaras</li> </ul>

(continúa)

## Equipo o aplicación

## Determinantes de los costos

### Capa de conectividad

#### Redes propias

Estaciones base	– Áreas geográficas que deberán cubrir las redes
Fibra óptica	– Tecnologías utilizadas
Enlaces microondas	– Estaciones de transporte público
Enlaces satelitales	– Paraderos del sistema de transporte público
Otros equipos de comunicaciones	– Puntos de recarga y recaudo
	– Otras ubicaciones con dispositivos que requieran transmitir información
	– Periodicidad de transmisión de la información
	– Volumen de datos generados por los dispositivos desplegados
	– Servicios que prestarán a través de las redes desplegadas (voz o datos)
	– Ancho de banda requerido para la transmisión de servicios de voz o datos
	– Bandas de frecuencia de espectro radioeléctrico utilizadas (libres o licenciadas)
	– Niveles de calidad y servicios requeridos
	– Costos de transporte, instalación y obra civil

#### Redes de terceros

Contratación de servicios de telecomunicaciones (voz o datos, canales dedicados u otros)	– Áreas geográficas donde se requerirá la prestación de los servicios
Arrendamiento de infraestructura	– Estaciones de transporte público
	– Paraderos del sistema de transporte público
	– Puntos de recarga y recaudo
	– Otras ubicaciones con dispositivos que requieran transmitir información
	– Servicios que se contratarán (voz o datos)
	– Volumen de datos generado por los servicios contratados
	– Niveles de calidad y servicios requeridos
	– Costo mensual por tipo de enlace según el volumen de datos de los servicios contratados
	– Cantidad y elementos de infraestructura que se arrendarán (torres, postes, espacio físico, etc.)
	– Tarifas de arrendamiento (torres, espacios físicos, etc.)

### Capa de recaudo

Torniquetes automáticos de acceso	– Número de estaciones de transporte público
	– Número de paraderos del sistema de transporte público
	– Parque automotor de transporte público
Elementos de recaudo para diferentes medios de pago	– Estaciones de transporte público
	– Paraderos del sistema de transporte público
	– Población estimada que hará uso del servicio de transporte público por estación o paradero
	– Parque automotor del sistema de transporte público
	– Cantidad de puntos de recarga y recaudo
	– Medios de pago habilitados

### Sistema de información al ciudadano

Pantallas	– Parque vehicular de transporte público
Altavoces	– Estaciones de transporte público
Centro de llamadas	– Paraderos del sistema de transporte público
	– Parque vehicular particular
	– Cantidad máxima estimada de usuarios que accederán simultáneamente a cada uno de los sistemas de información al ciudadano
	– Porcentaje de automatización de los centros de llamadas (sistemas de respuesta de voz interactiva y bots con relación a agentes humanos)
	– Número de agentes en el centro de llamadas

(continúa)

**Big data, analítica de datos e inteligencia artificial**

Equipos de cómputo o computación en la nube (servidores, sistemas de almacenamiento)

Software y aplicaciones para el procesamiento de datos e imágenes, control del recaudo y la facturación, sistemas de información al ciudadano, control y acceso de los usuarios y ciberseguridad

- Parque automotor de servicios públicos
- Parque automotor vehicular
- Cantidad de centros de monitoreo y control de operaciones
- Cantidad estimada de vehículos que pasarán por los peajes o zonas donde se cobrarán cargos de congestión o contaminación en la hora de mayor tráfico
- Cantidad estimada de personas que harán uso del sistema de transporte público en hora pico
- Datos generados
- Velocidad de procesamiento y análisis de la información
- Licencias de aplicaciones para el control de dispositivos
- Licencias de aplicaciones de procesamiento (*big data* y analítica de datos, inteligencia artificial, otras)
- Licencias de las aplicaciones requeridas (control del tráfico, control de la flota, control del recaudo y la facturación para el sistema de transporte público, control del recaudo de cargos por congestión y peajes, movilidad como servicio, micromovilidad, otras)
- Licencia de aplicaciones de ciberseguridad
- Cantidad de usuarios con permiso de acceso a lugares restringidos y tipos de acceso por usuario
- Licencias para el control de elementos de seguridad
- Licencias de aplicaciones para el reconocimiento de imágenes

## Insumos para la cuantificación de beneficios

En este paso se organiza la información y se cuantifican los beneficios que arroja el proyecto de digitalización de la infraestructura de movilidad. Para ello, en función de los

objetivos del proyecto, se tratan los beneficios descritos a continuación.

### Reducción de los tiempos de viaje

Los proyectos de digitalización del sistema de semáforos o para la implementación del cobro de cargos de congestión o contaminación en áreas urbanas elevan la velocidad promedio de circulación del flujo automotor en la ciudad. De igual forma, sistemas digitales que permiten dar prioridad al transporte público mejoran la velocidad promedio de operación de los buses. Una mayor velocidad promedio se traduce en menores tiempos de viaje para la ciudadanía. El tiempo que esta se ahorra en sus desplazamientos lo puede dedicar a actividades productivas que generen ingresos o a ampliar las horas disponibles para el descanso y el ocio. La Figura A.2 12 ilustra la metodología para valorar, en términos económicos, los beneficios asociados con el ahorro en tiempo de viaje de la población inducidos por el proyecto de digitalización.

En primer lugar, es necesario caracterizar la movilidad en la línea de base en términos de viajes motorizados al día y la ocupación media de los vehículos, tanto de transporte público como privado. La base de viajes se debe proyectar para cada

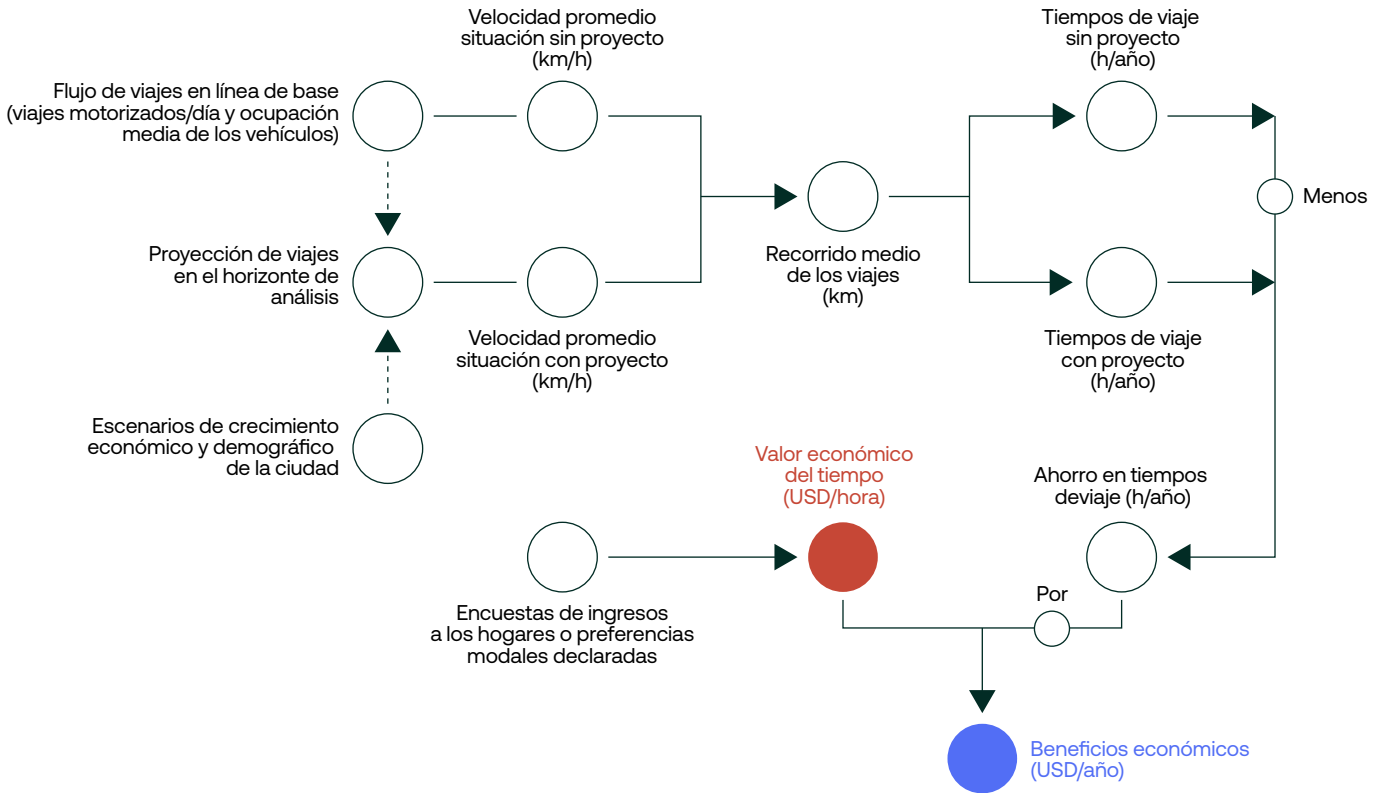
año en el horizonte de análisis, considerando los escenarios de crecimiento económico, demográfico y otros factores que incidan en la generación de viajes, como la densidad urbana y la entrada en operación de nuevos modos o rutas de transporte. Idealmente, esta información se consolida en el marco de un modelo de transporte.

En segundo lugar, es necesario estimar la velocidad de circulación promedio en la línea de base y en la situación con proyecto. Para ello se utilizan las funciones de ingeniería que permiten estimar la velocidad a partir de la relación entre la ocupación de las vías y su capacidad. En proyectos de semaforización inteligente es posible determinar los cambios en la velocidad en el área de influencia cuando se aplican algoritmos para optimizar los intervalos de los semáforos en función del flujo detectado por los sensores y procesado en el centro de cómputo del sistema. Es importante considerar que la velocidad y el flujo varían a lo largo del día. El impacto de este tipo de proyectos recae en las horas de mayor flujo

(congestión) y menor velocidad. Idealmente, el análisis se debe realizar para horas o bloques horarios homogéneos en términos de movilidad y ponderar los resultados con la participación de

cada bloque en los viajes totales del día. Si está disponible, la velocidad en las situaciones con y sin proyecto se pueden modelar en el marco del modelo de transporte.

Figura A.2 12 — Metodología propuesta para el cálculo de los beneficios económicos por la reducción en los tiempos de viaje



Con estos insumos y el recorrido medio del viaje, es posible obtener los tiempos que destina la ciudadanía a sus desplazamientos en las situaciones con y sin proyecto y, como diferencia, el ahorro anual en horas que este genera. Para calcular el beneficio económico basta multiplicar el ahorro en horas al año por el valor económico de una hora en la ciudad bajo análisis. Existen dos aproximaciones para obtener este parámetro: el costo de oportunidad del tiempo y el valor subjetivo del tiempo. En el primer caso se busca determinar cuál es el sacrificio para la economía de destinar una hora adicional en desplazamientos. En otras palabras, cual

es el ingreso que se deja de percibir por dedicar esa hora al desplazamiento y no a actividades productivas. El segundo enfoque busca medir cuanto está dispuesto a pagar un ciudadano por reducir el tiempo de sus desplazamientos<sup>12</sup>.

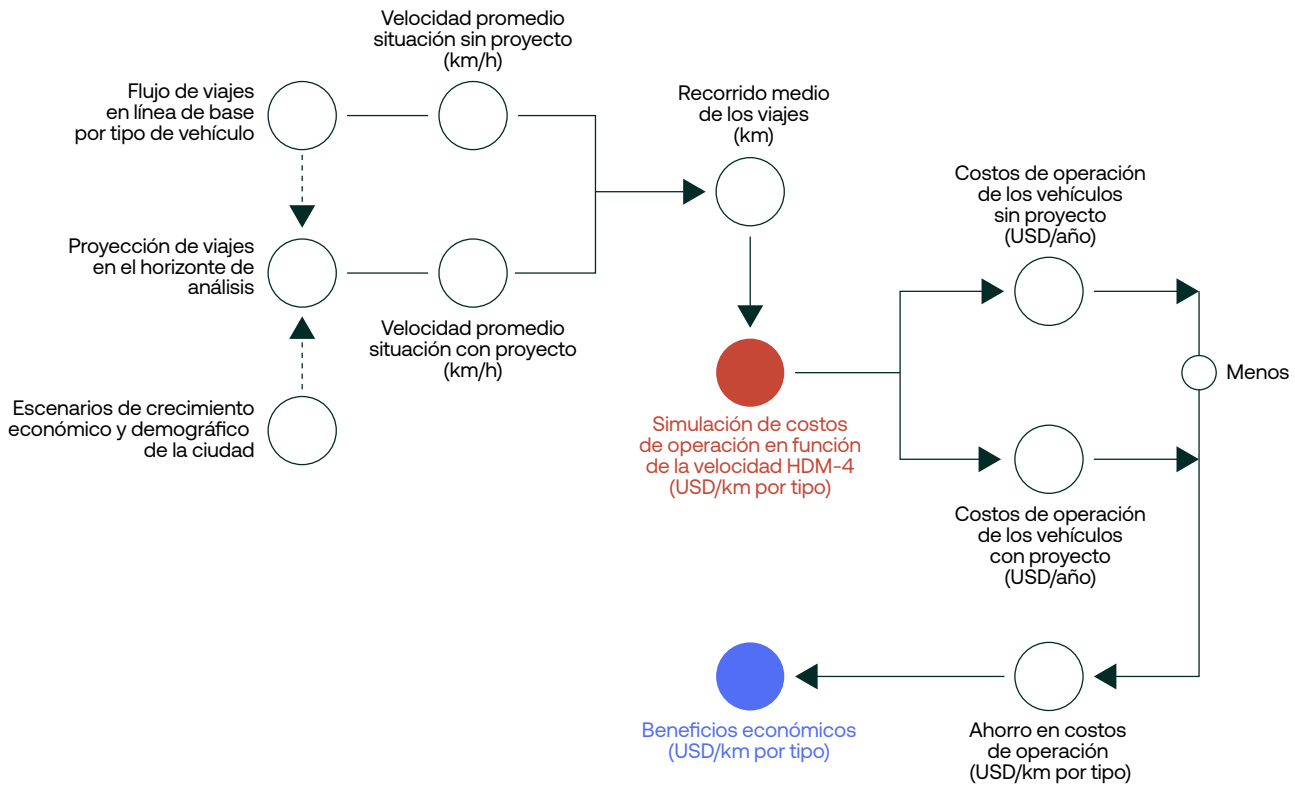
En la metodología de esta guía se toma como referente del costo de oportunidad del tiempo el ingreso medio que dejan de percibir los ciudadanos en sus desplazamientos, considerando los reportes de ingresos declarados en las encuestas de ingresos y gastos administradas por los departamentos de estadísticas de cada país.

12. El valor subjetivo del tiempo se estima con el método de preferencias declaradas. Esta metodología parte de la realización de una encuesta a una muestra representativa de usuarios, a los que se pregunta cuál sería su preferencia ante la oferta hipotética de distintos modos de transporte con tarifas y tiempos de viaje diferenciados en cada una de las alternativas. Con esta información es posible derivar la disponibilidad a pagar de los usuarios por una reducción en el tiempo de viaje y así obtener el valor subjetivo del tiempo.



## Reducción en costos de operación de los vehículos

Figura A.2 13 — Metodología propuesta para el cálculo de los beneficios económicos por la reducción en costos de operación de los vehículos



La reducción de los costos de operación se puede modelar a partir de la relación implícita entre el costo de operación del vehículo (VOC, por sus siglas en inglés) y la velocidad en cada categoría vehicular en el modelo conocido por las siglas en inglés HDM-4<sup>13</sup>. La valoración de estos beneficios, entonces, tomaría como insumo las estimaciones del flujo vehicular y la velocidad obtenidos en el módulo anterior para las situaciones con y sin proyecto. En este caso es importante caracterizar la línea de base y elaborar las proyecciones de flujos y velocidad para cada tipología

vehicular: automóviles, camionetas y camperos, buses, camiones pequeños de dos ejes, camiones grandes de dos, tres, cuatro, cinco y seis ejes.

La información de flujos y velocidades, discriminada por categoría vehicular, se ingresa al HDM-4, el cual debe estar parametrizado con las condiciones del país donde se ejecuta el proyecto. En particular, el modelo tiene la capacidad de estimar los costos (CAPEX y OPEX) por kilómetro si cuenta con información específica del país dónde se hace la evaluación, como, por

<sup>13</sup> El Highways Design Model (HDM) es una herramienta computacional diseñada por el Banco Mundial para modelar el comportamiento de los costos de operación de los vehículos ante diferentes especificaciones de las vías: topografía, estado de la capa de rodadura y velocidad de diseño, entre otras. El modelo también predice el estado de las estructuras viales en función del flujo de tráfico que soportan. El HDM se puede parametrizar con la canasta de costos específica de cada país: costo de los vehículos, precio de los combustibles, costos de mantenimiento, llantas, lubricantes, conductores, etc. Los resultados se obtienen para cada tipología vehicular.

ejemplo, el valor del vehículo nuevo, el precio de los combustibles, el precio de los lubricantes y llantas y el valor del tiempo de los operarios de mantenimiento.

El ahorro resultante en términos de USD/km se agrega a todo el flujo, ponderando por la participación de cada tipo de

vehículo. De esta forma se obtiene el ahorro anual en costos de operación de los vehículos generado por el proyecto. Los beneficios se traducen a precios de eficiencia con la aplicación de los precios sombra a cada categoría de gastos.

## Reducción de la emisión de contaminantes

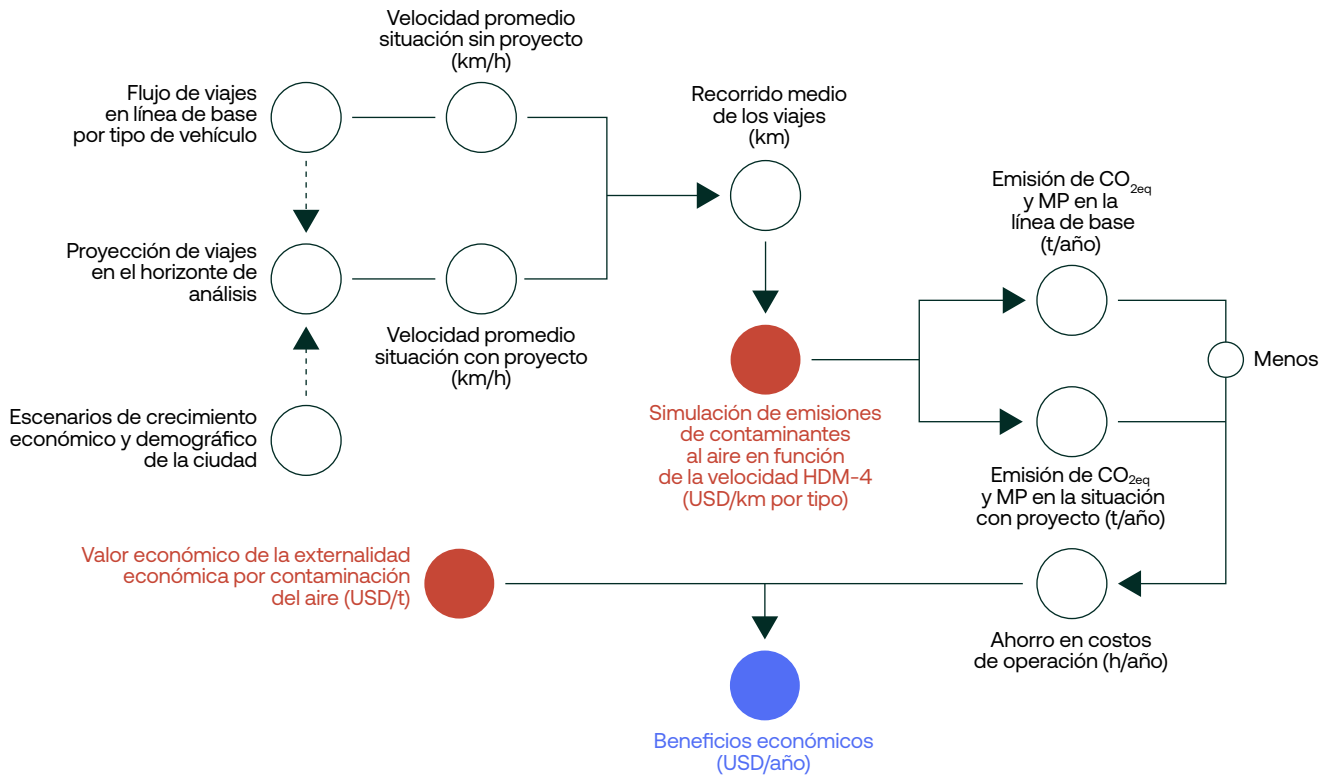
La estimación de los beneficios por menor contaminación se lleva a cabo tomando las estimaciones de kilómetros recorridos y velocidades por tipología vehicular descritas en la sección anterior. En este caso, el HDM-4 se utiliza para modelar las emisiones de contaminantes ( $\text{CO}_{2\text{eq}}$  y material particulado) producidas por el parque automotor en las situaciones con y sin proyecto. En efecto, el HDM puede relacionar la velocidad de circulación con la contaminación para cada categoría vehicular. El diferencial anual de emisiones se valora con base en parámetros internacionalmente aceptados que miden la externalidad negativa (magnitud del daño) que generan las emisiones de estos contaminantes. Se debe recordar que el  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  impacta el cambio climático; el material particulado, por su parte, genera problemas de salud a la población expuesta y eleva los índices de morbilidad y mortalidad<sup>14</sup>.

En el caso de la movilidad compartida es necesario contar con una estimación de la penetración inducida por el proyecto y del proceso de cambio modal. En particular se deben estimar las proporciones de usuarios del modo original que migran a la movilidad eléctrica. Estas proporciones son relevantes porque permiten determinar el nivel de contaminación que caracterizaba a los beneficiarios del proyecto. El impacto sobre el ambiente es mucho mayor si un usuario de automóvil particular a diésel pasa a utilizar una patineta eléctrica que si lo hace un usuario del transporte público. Algo similar ocurre con las políticas de prioridad de acceso para autos compartidos. Es necesario determinar de qué modos provenían los usuarios que incrementan el índice de ocupación por vehículo en respuesta a la política<sup>15</sup>.

14 Los avances de la última década en el monitoreo tanto de calidad del aire como de los patrones de morbilidad y mortalidad han permitido robustecer los análisis estadísticos de causalidad entre la contaminación ambiental y la salud pública. Se ha demostrado que los efectos del material particulado y otros contaminantes sobre las tasas de mortalidad son mucho más elevados de lo que se estimaba con la información disponible en el pasado. Por otra parte, se dispone de estudios que han fijado un valor económico a la morbilidad y la mortalidad. En el primer caso las estimaciones se basan en los gastos de atención médica asociados con enfermedades respiratorias relacionadas con la contaminación del aire y el costo de oportunidad (salario) asociado con los días de incapacidad que en promedio reportan enfermos por estas causas. El valor estadístico de la vida humana es un parámetro polémico obtenido mediante estudios de valor contingente en los cuales se pregunta a un número grande de encuestados cuál sería su disponibilidad a pagar por reducir la probabilidad de mortalidad por una causa específica. Los resultados de estos estudios están disponibles para países desarrollados. Su extrapolación a los países de América Latina donde se aplica la metodología se basa en la relación entre el PIB per cápita del país del proyecto y el PIB per cápita en los países donde se realizó la encuesta.

15 En el mercado están disponibles otras herramientas computacionales con la capacidad de traducir los vehículos/kilómetro en emisiones de contaminantes para cada tipología de vehículo, tipo de combustible e incluso modelo (edad) del vehículo.

Figura A.2 14 — Metodología propuesta para el cálculo de los beneficios económicos por la reducción en la emisión de contaminantes al aire



## Reducción de la siniestralidad

La cuantificación de los beneficios asociados con la reducción de los índices de siniestralidad atribuible a la digitalización de los vehículos y la infraestructura requiere una estimación de la reducción del número de siniestros resultante del proyecto, discriminando por daños materiales, heridos y muertos (Roman y Farrell, 2002; Heeks et al., 2018; Chalfin, 2016)<sup>16</sup>.

Una vez establecido este parámetro se adoptan los siguientes criterios de valoración:

- Los daños materiales se valoran a partir del promedio de los costos de reparación obtenido de las estadísticas de las compañías aseguradoras.
- El valor económico asociado con la reducción del número de heridos se puede aproximar a partir del costo del tratamiento médico y la incapacidad laboral de estadísticas de las aseguradoras.
- Las muertes evitadas se valoran con el valor estadístico de la vida humana, tal y como se expuso en la sección anterior.

<sup>16</sup> Roman y Farrell modelan la criminalidad como un mercado con demandantes (criminales) y oferentes (víctima, entendida como personas vulnerables expuestas). En esta configuración el beneficio de una reducción en las tasas de criminalidad se modela como una reducción en el excedente de los criminales y un aumento en el de las víctimas. Las acciones de política, como la instalación de sistemas digitales de vigilancia, aumentan el riesgo para los criminales y reducen su excedente.

## Optimización de la operación del transporte público

Los beneficios asociados con la optimización del despacho se pueden estimar como la reducción de los costos de operación por evitar despachos ineficientes. De igual forma se podrían evitar costos de capital por el ajuste de la flota a la demanda del servicio. Este efecto es nulo si la flota está correctamente dimensionada para atender la demanda en las horas de mayor concurrencia de público. La medición del beneficio exige que quien formule el proyecto estime los cambios operativos y en dimensionamiento atribuibles a la digitalización de la flota y la infraestructura por donde circula<sup>17</sup>. En particular, es necesario contar con una estimación de los costos variables por despacho y el número de despachos evitados, atendiendo los parámetros de calidad del servicio<sup>18</sup>.

El valor económico del ahorro en tiempo de viaje de los usuarios del transporte público que se obtiene al dar prioridad a los buses en los pasos con semáforo requiere de una estimación de la demanda anual de pasajeros en el corredor, de los tiempos promedio de viaje con y sin prioridad en los

semáforos y del costo de oportunidad del tiempo de los pasajeros. Como se ha mencionado, el valor del tiempo se puede aproximar como el ingreso medio de las personas empleadas, ponderado por la composición socioeconómica de los pasajeros en este modo de transporte. Esta información se extrae de las encuestas de ingresos y gastos que realizan las agencias de estadística en cada país.

El beneficio relacionado con la reducción en las fallas de los buses durante el servicio se puede estimar a partir de los registros históricos del operador, tomando el porcentaje de horas de falla por vehículo y el tiempo medio que tarda la empresa en solucionar el problema a los pasajeros en el momento del incidente. Con estos parámetros y la ocupación media por bus es posible estimar el perjuicio económico de los incidentes mecánicos evitados por el proyecto. Nuevamente, se utilizaría el ingreso medio para valorar el perjuicio económico para los pasajeros involucrados en el incidente y en el tiempo en que dure la solución al problema.

## Reducción de los costos asociados con el recaudo en el transporte público

Para estimar los beneficios económicos asociados con el recaudo por medios electrónicos, se requiere una estimación del costo del recaudo por tiquete bajo el esquema tradicional y el sistema digital. Una vez definidos estos parámetros, se debe agregar el diferencial de costos al flujo de pasajeros esperado en el servicio de transporte público colectivo.

Los sistemas tradicionales en los que el conductor recauda directamente el dinero de los pasajeros no exigen el

despliegue de plataformas para gestionar medios de pago digitales, lo que se puede traducir en un ahorro en el costo del servicio. El ahorro en tecnología, no obstante, se traduce en un incremento significativo en la carga de responsabilidades del conductor, lo que puede derivar en una mayor tasa de siniestralidad, eventuales problemas de fraude e incomodidad para los pasajeros.

## Mayor seguridad en el transporte público

Quien estructure el proyecto debe presentar una estimación de la reducción en las estadísticas de delincuencia en el sistema de transporte público como respuesta al despliegue de tecnología de disuasión en los paraderos, estaciones y vehículos. La literatura económica, por su parte, ofrece metodologías para la estimación del costo asociado con distintos tipos de crímenes: homicidio, asalto, robo y violación.

<sup>17</sup> En el caso del CAPEX se debe considerar el pago equivalente anual del parque que se evitó adquirir.

<sup>18</sup> Se debe considerar que una reducción de despachos puede tener efectos negativos en la calidad del servicio por menores frecuencias, mayor tiempo de espera y reducción de la demanda.

## Planeación de la infraestructura

Los ahorros derivados de una mayor información para estructurar y actualizar la planeación de las mallas viales pueden ser enormes en la medida en que se evitan proyectos no prioritarios o sobredimensionados. De igual forma, se pueden anticipar inversiones para evitar que sectores de la red entren a operar en condiciones de saturación. Estos

beneficios, no obstante, dependen de la disciplina de la autoridad en el rigor de los ejercicios de planeación y la aplicación de los resultados para la priorización de proyectos. Los mejores datos facilitan la planeación, pero no aseguran su aplicación.

## Construcción del flujo financiero

En esta etapa se organiza la información de ingresos y costos del proyecto como el flujo de caja financiero esperado del proyecto. A continuación, se describen los aspectos a tener en cuenta.

### Horizonte de análisis

El análisis se puede llevar a cabo para un horizonte consecuente con la vida útil esperada de los activos. Para proyectos de infraestructura, es correcto emplear horizontes

de entre 20 y 30 años. En proyectos de tecnología se pueden plantear horizontes más cortos, considerando la obsolescencia de los equipos que conlleva el cambio técnico.

### Ingresos

Se debe contar con información de la capacidad de producción del proyecto y su grado de utilización para cada año en el horizonte de análisis. En ocasiones, el proyecto es en sí su producción, por ejemplo, kilómetros de vía. Esta información la suministra el equipo técnico que realiza los estudios de prefactibilidad o factibilidad.

Se debe contar, además, con una estimación de los precios o tarifas que se cobrarán por unidad comercializada. Se

recomienda mantener el análisis en precios constantes del año en que se realiza la evaluación para no afectar los resultados con los supuestos de inflación hacia el futuro<sup>19</sup>. La tarifa puede ser cero en proyectos de bienes públicos que no contemplan cargos a los usuarios.

Los ingresos se obtienen como el producto de las unidades transadas por su precio. Para bienes públicos puros, el ingreso esperado puede ser cero.

### Egresos

Normalmente, los flujos de caja financieros agregan los gastos operativos en muy pocos rubros. En los ejercicios de evaluación económica es importante desagregar los costos y gastos de forma que se puedan discriminar cada uno de los principales insumos, la mano de obra y los impuestos (IVA).

De igual forma, los gastos de capital del proyecto se deben desagregar entre los principales materiales, el alquiler de equipos, la mano de obra, los terrenos y otros inmuebles y los impuestos.

<sup>19</sup> Si quien estructura el proyecto tiene razones fundadas para estimar variaciones en los precios relativos del producto del proyecto en el futuro, es correcto incluir esta variación en términos constantes.

## Financiación

El análisis financiero exige estimar los requerimientos de deuda del proyecto. Por lo anterior, se debe considerar la relación deuda-patrimonio con la que se estructura el proyecto y verificar las necesidades de financiación para cubrir los recursos que puedan faltar. Los intereses causados por este endeudamiento se deben incluir como egresos operativos y los excedentes se deben destinar a amortizar la deuda. El cierre financiero del modelo se logra tras una secuencia de iteraciones, hasta que se cubran los recursos faltantes en cada período y se amortice la totalidad de la deuda. En proyectos de bienes públicos, se deben incluir como ingresos las transferencias de presupuesto para cubrir el OPEX y CAPEX.

Como resultado del análisis del proyecto se estima la tasa de retorno del inversionista (ROE) y el valor presente neto con una tasa de descuento acorde con el nivel de riesgo percibida por los inversionistas. Un signo negativo en el valor presente del flujo de caja financiero no implica que el proyecto no sea conveniente desde la perspectiva económica y social. Cuando el valor presente es menor que cero, el proyecto requiere subsidios. Para determinar si el proyecto es conveniente en términos de eficiencia económica es necesario construir el flujo de beneficios y costos valorados de acuerdo con su costo de oportunidad, como se indica en la siguiente sección.

Cuadro A.2 10 — Estructura conceptual del flujo financiero del proyecto de digitalización en el sector de la movilidad

Horizonte	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
<b>I. Ingresos</b>										
<b>II. Costos</b>										
Mano de obra operación										
Conectividad										
Intereses										
Impuestos										
Amortizaciones										
<b>CAPEX</b>										
Equipos digitales en infraestructura										
Equipos digitales en vehículos										
Equipos de computación										
Software										
Mano de obra instalación										
Materiales										
<b>II. Flujo de caja</b>										
Aportes de <i>equity</i>										
Necesidades de deuda										
<b>Indicadores</b>										
VPN										
TIR										
ROE										

# Construcción del flujo económico

El siguiente paso consiste en identificar cuáles son los costos y beneficios que genera el proyecto a la economía. Es necesario determinar la dirección y magnitud de los cambios en los excedentes de los consumidores y los productores, las externalidades positivas o negativas del proyecto sobre terceros y el impacto en las finanzas públicas. De igual forma, se debe establecer el costo del proyecto en términos de movilización de recursos económicos (bienes y factores).

La metodología general de evaluación de proyectos supone mercados en competencia, donde el precio de los productos iguala el costo marginal y los factores son remunerados por sus respectivas productividades marginales. En la práctica, no obstante, las economías están expuestas a rigideces, distorsiones, externalidades y fallas de mercado<sup>20</sup>. Los factores de precio sombra o precios de cuenta se han construido precisamente para corregir los precios de mercado, de forma que reflejen el verdadero costo de oportunidad de los bienes y factores involucrados en el proyecto. En la medida en que las economías son cada vez más abiertas y están expuestas a menores intervenciones, los precios y salarios convergen a sus respectivos costos de oportunidad y las correcciones por precios de cuenta dejan de ser indispensables.

En algunos países, las oficinas de planeación actualizan los factores de conversión a precios de cuenta, de manera que los analistas puedan traducir los flujos construidos con precios de mercado a flujos en precios de eficiencia. Cuando no se dispone de estos parámetros, conviene hacer algunos ajustes a los flujos con valores de mercado. Así, por ejemplo, los impuestos no representan un costo económico; se trata de una transferencia de los agentes privados hacia el sector público y no del uso final de los recursos. Los bienes

transables se deben valorar a su precio de frontera. Si la economía enfrenta restricciones cambiarias, es necesario ajustar el componente importado de los proyectos de acuerdo con el verdadero costo de oportunidad de las divisas. En condiciones de desempleo, el precio sombra de la mano de obra es inferior al salario de mercado.

Como se describe en la Figura A.2 15, adaptada de la guía de evaluación de proyectos de la Unión Europea<sup>21</sup>, el paso de precios de mercado (flujo financiero) a precios sombra (flujo construido con el costo de oportunidad de los recursos) requiere modificar tanto los ingresos (beneficios) como los egresos (costos).

Los beneficios económicos engloban tanto el producto del proyecto valorado por la disponibilidad de los usuarios a pagar como el valor de las externalidades negativas mitigadas por el proyecto<sup>22</sup>.

El precio o tarifa del producto ofrecido por el proyecto debe excluir cualquier subsidio o transferencia originada en los presupuestos públicos. En sectores poco expuestos a la competencia, con tarifas reguladas o influenciadas por decisiones del sector público, los cargos que pagan los usuarios pueden no reflejar el valor social del bien o servicio. En estos casos, es necesario estimar directamente la disponibilidad de los usuarios a pagar por una unidad del bien o servicio (o la disposición a aceptar una compensación por ser excluido del consumo). Esta variable se estima a partir de modelos microeconómicos y estadísticos, tales como las preferencias reveladas o preferencias declaradas<sup>23</sup>. Alternativamente, cuando no se precise aplicar la disponibilidad a pagar, es correcto emplear el costo marginal

20 Estructuras oligopólicas o monopólicas, donde el precio de mercado supera el costo marginal; servicios subsidiados y de tarifas administrativas, donde el precio es inferior al costo marginal; bienes o servicios que no tienen precio en el mercado o con los que no se realizan transacciones, como las externalidades ambientales.

21 Ver la guía de evaluación de la Comisión Europea (2014).

22 En la sección anterior se han expuesto los beneficios asociados con los componentes de digitalización y la forma de valorarlos, incluidas las externalidades.

23 Esta metodología parte de una encuesta a una muestra representativa de potenciales usuarios. El encuestador define el bien, servicio o atributo y cita un precio (seleccionado aleatoriamente dentro de un rango razonable de valores). Posteriormente pregunta al encuestado si está dispuesto a pagar ese precio por adquirir el bien, servicio o incluir nuevos atributos. A partir de las respuestas se conforma un vector de 0 (no estaría dispuesto a comprar) y 1 (estaría dispuesto a comprar), que actúa como variable discreta dependiente en el análisis econométrico. La matriz de variables independientes está dada por el precio citado a cada individuo y otras variables de control que lo caractericen, como su edad, sexo, ingreso y nivel de ingreso. La estimación del parámetro medio de disponibilidad a pagar se lleva a cabo con métodos econométricos de variable discreta, como Logit y Probit. Normalmente, el diseño y procesamiento de las encuestas requiere la contratación de firmas especializadas que entiendan y corrijan eventuales sesgos, como la ausencia de una real restricción presupuestal del encuestado a la hora de decidir su respuesta (sesgo hipotético). Estos modelos tienen una amplia aplicación en evaluación de proyectos para parametrizar la función de demanda y el valor subjetivo del tiempo (transporte), valorar los perjuicios de no suministrar el servicio (energía eléctrica) o establecer el costo estadístico de la vida (siniestralidad y contaminación con material particulado).

de largo plazo como una estimación del valor económico del producto del proyecto<sup>24</sup>.

En los beneficios se debe considerar el efecto del proyecto en el medio ambiente, como la reducción de las emisiones de GEI o material particulado. La estimación de estos valores es compleja y normalmente quien está a cargo de la evaluación de proyectos acude a estudios internacionales que reporten los resultados de las valoraciones<sup>25</sup>.

Por el lado de los costos, se da un tratamiento diferencial a los bienes transables y a los no transables<sup>26</sup>. En el caso de los insumos transables, el costo de oportunidad se aproxima como el precio de referencia en el mercado internacional (precios de frontera). Si se trata de un bien exportable, el costo de oportunidad es el sacrificio en divisas de exportar este bien y, por lo tanto, el precio en el mercado internacional. Si se trata de uno importable, la mayor demanda de este bien para el proyecto se cubre con un aumento en las importaciones y, nuevamente, el precio de referencia corresponde al precio en los mercados externos. El factor estándar para los distintos tipos de bienes se deriva del peso de los impuestos de comercio exterior en el valor del bien<sup>27</sup>.

En el caso de los insumos no transables, el precio internacional no constituye una señal del costo de oportunidad del bien. Si se trata de insumos menores, es adecuado utilizar los factores de corrección que estiman las autoridades de planificación en los países. Estos factores, aplicados a los precios de mercado, arrojan el precio sombra o precio de cuenta del bien bajo análisis<sup>28</sup>. Cuando la realización del proyecto eleva significativamente la demanda de un insumo no transable, es

necesario analizar el costo incremental de largo plazo para determinar su costo de oportunidad.

En economías con desempleo, un porcentaje de la mano de obra contratada para ejecutar las obras con alguna probabilidad proviene de trabajadores desempleados, cuyo costo de oportunidad puede ser cercano a cero. En este caso, es necesario corregir los salarios de mercado para construir los flujos de costos. El cálculo depende de la tasa de desempleo y del esquema de cargas fiscales y subsidios sobre la nómina.

Los impuestos y subsidios no constituyen un costo para la economía. Se trata de transferencias de recursos entre el sector público y privado. Para construir los flujos del proyecto a precios de eficiencia, los precios de los insumos y productos se deben incluir netos del impuesto al valor agregado (IVA) y otros impuestos directos e indirectos.

En ocasiones, los proyectos pueden reducir las necesidades de transferencias del sector público. Este podría ser el caso de un proyecto que reduzca los costos de suministro de un bien básico. La eventual reducción de subsidios y transferencias desde los presupuestos públicos hacia el servicio inducidos por el proyecto se valoran al costo marginal de los fondos públicos (CMFP). Cuando un proyecto reduce la presión al fisco, genera eficiencia económica, porque disminuyen las distorsiones que impone el sistema tributario a la economía<sup>29</sup>

24 El costo marginal de largo plazo se estima como el costo de producir una unidad adicional en el largo plazo, cuando se opera a capacidad plena. Este concepto engloba tanto el OPEX (en condiciones de eficiencia) como el CAPEX, porque asume que para producir la nueva unidad es necesario expandir la capacidad instalada.

25 Por ejemplo, la guía de la Unión Europea fija en 40, 25, y 10 euros por t de CO<sub>2e</sub> los valores alto, medio y bajo de los gases efecto invernadero. Estos valores se aplican en las evaluaciones de proyectos que soliciten fondos comunitarios.

26 Bienes transables son todos aquellos que, por sus características, pueden negociarse en el mercado internacional. En este grupo se encuentran los productos agropecuarios, mineros y manufactureros, entre otros. Los bienes no transables, por su parte, físicamente no se pueden situar en el mercado internacional. Este es el caso de la tierra, los inmuebles y los servicios públicos por redes (energía, agua, saneamiento y telecomunicaciones), entre otros.

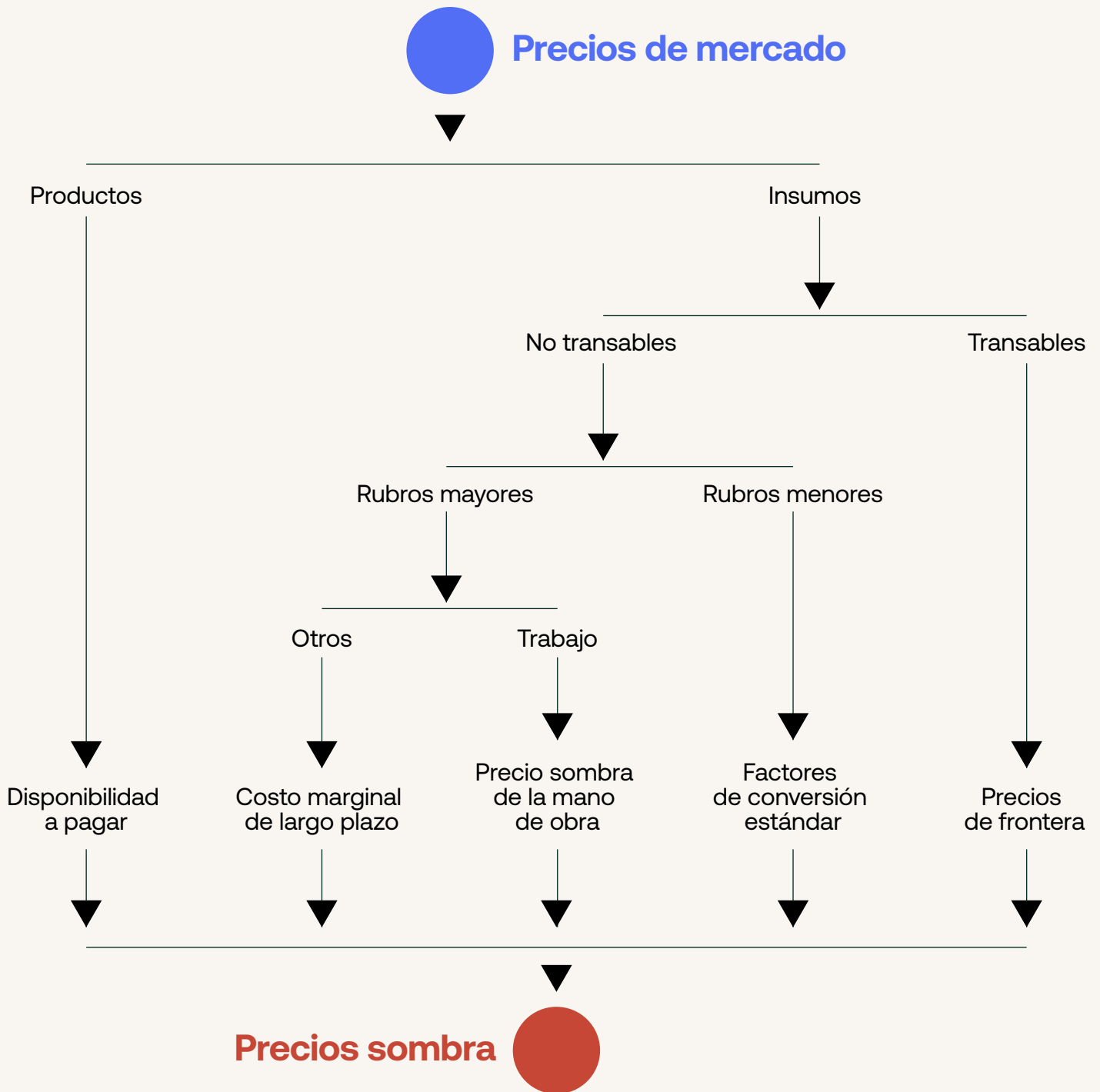
27 En el caso de bienes importados se considera el valor de costo, seguro y flete (CIF, por sus siglas en inglés), sin aranceles ni IVA. En el caso de bienes exportables el precio de frontera corresponde al valor franco a bordo (FOB, por sus siglas en inglés). El factor de precio de eficiencia para los bienes transables se estima como la relación del valor del comercio internacional del respectivo bien, es decir la suma de las importaciones (M) y las exportaciones (X) dividida por el valor comercial, incluyendo los impuestos aduaneros (TM):  $\text{Factor} = (M+X)/(M+X+TM)$ .

28 La estimación de estos factores se lleva a cabo con metodologías que utilizan los coeficientes técnicos de la matriz insumo-producto.

29 A pesar de que los impuestos constituyen una transferencia entre agentes y no un costo, es importante tener en cuenta que el sistema impositivo genera distorsiones en la economía que la alejan de su potencial. Estas distorsiones son necesarias para ofrecer a la población bienes públicos, pero es conveniente medirlas. Analizando el sacrificio en generación de valor agregado que impone la elevación de las tasas tributarias en modelos de equilibrio general, se obtiene el CMFP. Este parámetro es útil para, por ejemplo, estimar los beneficios de un proyecto que reduce la necesidad de entregar subsidios. En este caso, el proyecto reduce una transferencia del sector público al privado, lo cual, en principio es neutro. No obstante, al reducir la presión fiscal, disminuyen las distorsiones del sistema tributario sobre la economía, con un impacto positivo en bienestar estimado dado por el CMFP.



Figura A.2 15 — Paso de precios de mercado a precios de eficiencia



Fuente: Adaptado de Comisión Europea (2014).

Una vez contruidos los flujos del proyecto en valores económicos (costo de oportunidad), no se deben valorar los posibles efectos indirectos que genere el proyecto en la economía, porque se corre el riesgo de sumar dos veces el mismo beneficio. Por ejemplo, incluir como beneficio el número de empleos creados por el proyecto es un error. Los salarios son un costo y no un beneficio del proyecto. La mano de obra que emplea el proyecto deja de producir en actividades alternativas. Como se mencionó, cuando se corrige el valor de mercado de la nómina por el precio sombra de este factor, ya se está incorporando en el flujo del proyecto el hecho de que parte de los trabajadores atraídos por el proyecto eran desempleados.

Algo similar ocurre con la inclusión de los efectos indirectos que puede tener el proyecto sobre otras ramas de la actividad

económica. En efecto, es posible, a partir de los coeficientes de consumo intermedio de la matriz insumo-producto, estimar la mayor demanda y valor agregado generado por la demanda de insumos de otros sectores inducida por el proyecto. El punto es que, si se quisieran incluir los efectos indirectos como un beneficio adicional del proyecto, sería necesario estimar los efectos que se dejaron de dar por no aplicar estos mismos recursos a proyectos alternativos. Tanto De Rus (2010) como la guía de la UE recomiendan no sumar este tipo de beneficios indirectos adicionales. El flujo del proyecto, corregido con precios de eficiencia, mide el impacto del proyecto en la economía. El Cuadro A.2 11 sugiere la estructura del flujo del proyecto a precios económicos. Los beneficios y costos que se deben incluir dependen de la tipología específica de cada proyecto de digitalización.

**Cuadro A.2 11 — Estructura conceptual del flujo del proyecto de digitalización en el sector de la movilidad para la evaluación beneficio-costos**

Horizonte de análisis	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
<b>I. Beneficios</b>										
Ahorro en tiempos de viaie										
Ahorros en costo de operación de los vehículos										
Reducción en emisión de contaminantes										
Reducción de la accidentalidad										
Optimización del transporte público										
Mayor seguridad a los usuarios del transporte público										
<b>II. Costos</b>										
<b>OPEX</b>										
Conectividad										
Personal operación										
<b>CAPEX</b>										
Sensores y cámaras										
Equipos de computación										
Software										
Mano de obra instalación										
Materiales										
<b>Flujo neto del provecto = I - II</b>										
<b>Indicadores</b>										
VPN										
TIR										
B/C										

# Cálculo de los indicadores de beneficio-costo

Para establecer la bondad de un proyecto a partir de las estimaciones de los flujos de beneficios y costos, se utilizan normalmente tres indicadores complementarios entre sí: el valor presente, la tasa interna de retorno y la relación beneficio-costo. En algunos contextos, esos indicadores se estiman tomando como referente los flujos en precios de eficiencia para diferenciarlos de los indicadores estimados a partir de los flujos financieros del proyecto. En los flujos económicos, como se discutió anteriormente, los beneficios incluyen la valoración del servicio por parte de los usuarios (disponibilidad a pagar) y todas las posibles externalidades sobre la economía o el medio ambiente. Los costos, por su parte, se ajustan para corregir las fallas del mercado y otras distorsiones, de forma que reflejen el costo de oportunidad de los recursos invertidos en el proyecto.

El valor presente neto (VPN) se calcula como la suma descontada de los beneficios ( $B_i$ ), netos de costos ( $C_i$ ), en cada año ( $i$ ) en el horizonte de análisis ( $T$ ). Puesto que los flujos se descuentan con la tasa social ( $r$ ), que refleja el costo de oportunidad de los recursos públicos, si el VPN es positivo, la ejecución del proyecto es conveniente para la economía. En ese sentido, el VPN es un indicador contundente para determinar la bondad de los proyectos. No obstante, su capacidad para priorizar proyectos dentro de una lista de iniciativas evaluada es limitada porque arroja valores absolutos. Es decir, un proyecto puede generar un VPN mayor que otro porque el volumen de recursos movilizados es más alto y no necesariamente porque sea más rentable en términos económicos y sociales.

$$VPN = \sum_{i=0}^T \frac{B_i - C_i}{(1+r)^i}$$

Un indicador que no depende del volumen de recursos movilizado por el proyecto y que, por lo tanto, es útil para priorizar proyectos cuando se enfrenta una restricción presupuestaria es la tasa interna de retorno (TIR). La TIR se define como la tasa a la cual el valor presente neto del proyecto es igual a cero. La TIR expresa la rentabilidad económica de los recursos que se destinen al proyecto. Cuando la TIR es superior a la tasa de descuento, el VPN es positivo y, por lo tanto, la ejecución del proyecto es conveniente para la economía. A pesar de su poder como indicador para establecer el orden de prioridad en una

lista de proyectos, en el cálculo y aplicación de la TIR es necesario tomar dos precauciones. En primer lugar, la solución matemática de la TIR no siempre es única. El analista puede tomar decisiones erradas si la TIR estimada por el modelo no corresponde a la solución dentro de los rangos relevantes del proyecto<sup>30</sup>. En segundo lugar, la TIR supone que los excedentes que genera el proyecto se reinvierten a esa misma tasa. En muchos proyectos esto no es posible, con lo cual el indicador puede sobrestimar la verdadera rentabilidad del proyecto.

$$\sum_{i=0}^T \frac{B_i - C_i}{(1+TIR)^i} = 0$$

Finalmente, la relación beneficio-costo (B/C) se calcula como el cociente entre el VPN de los beneficios y el VPN de los costos. Cuando la relación es mayor que 1, el VPN del proyecto es positivo y la TIR supera la tasa de descuento. En estos casos, conviene ejecutar el proyecto. Si los recursos disponibles no son suficientes para financiar todos los proyectos con  $B/C > 1$ , se pueden aplicar reglas para priorizar los proyectos hasta agotar los recursos disponibles para inversión, a partir del aporte marginal de cada proyecto en los beneficios por recurso invertido.

$$\frac{B}{C} = \sum_{i=0}^T \frac{B_i / C_i}{(1+r)^i}$$

Además de estos tres indicadores básicos de evaluación, se han construido indicadores para determinar si un proyecto se debe acometer inmediatamente o conviene postergar su entrada en operación. En particular, esta puesta en marcha es conveniente en el año en que los beneficios netos de costos superen la tasa de descuento:  $(B-OPEX) > r(CAPEX)$ . El primer año en que se cumpla esta desigualdad, conviene iniciar el proyecto (Económica Consultores, 2016).

En el caso de la digitalización, es muy probable enfrentar situaciones en las que resulta necesario establecer cuál es la profundidad óptima para la introducción de tecnologías disruptivas 4.0 en los proyectos de despliegue o reposición de la infraestructura. En general, la digitalización de redes o servicios se puede desarrollar en etapas, comenzando por aquellos componentes o fases con mayor impacto. El análisis B/C permite priorizar el orden de inclusión de los componentes

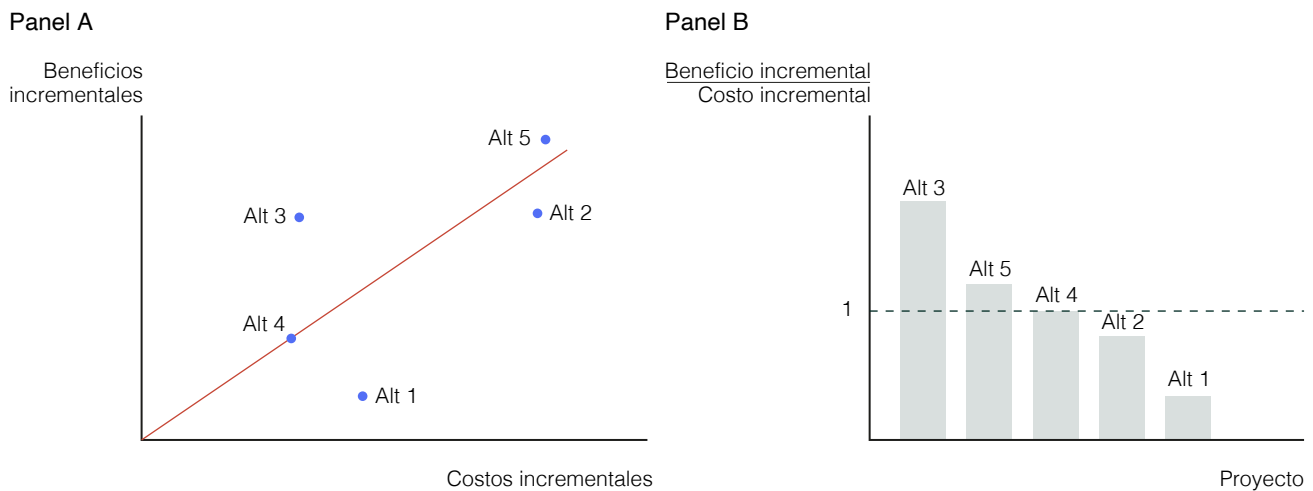
<sup>30</sup> En términos matemáticos, la TIR es una raíz de un polinomio de grado  $T$  ( $T$  corresponde a los períodos contemplados en el horizonte de análisis). El número de raíces reales o imaginarias es igual al grado del polinomio.

de digitalización. El primer paso es comparar el aporte incremental, tanto en beneficios como en costos, de cada alternativa de digitalización con relación a la línea de base, que refleja el proyecto estructurado con base en las tecnologías tradicionales.

Como se observa en el panel A de la Figura A.2 16, algunas alternativas de digitalización arrojan mayores beneficios incrementales que otras. De igual forma, los costos adicionales que impone al proyecto llevar a cabo cada alternativa varían. La línea roja en el gráfico (45 grados) divide el plano en dos. Las alternativas localizadas encima de la línea se caracterizan por generar beneficios incrementales superiores

a los costos incrementales (alt 3 y alt 5). En principio, si lo permite la restricción presupuestal, es conveniente, desde la perspectiva económica y social, incluir estos componentes de digitalización en el proyecto. Las alternativas de digitalización situadas por debajo de la línea (alt 1 y alt 2) demandan recursos superiores a los beneficios incrementales que aportan al proyecto, lo que indica la conveniencia de postergar estas inversiones en el tiempo. En efecto, la reducción en los costos de la tecnología o incrementos en los beneficios, por efectos como un mayor número de usuarios o de su ingreso, pueden elevar en el futuro la rentabilidad económica del componente. Finalmente, incluir o excluir la alternativa 4 es indiferente ya que los beneficios incrementales igualan los costos incrementales.

Figura A.2 16 — Análisis de priorización de componentes



Una forma alternativa de llevar a cabo el análisis de priorización de componentes se muestra en el panel B de la figura. En este caso se grafica directamente la relación entre beneficios y costos incrementales. Desde una perspectiva económica, es conveniente implementar todas las alternativas de digitalización con un coeficiente superior a 1 y rechazar las que arrojen valores inferiores. Si el responsable del proyecto enfrenta restricciones presupuestarias, debe considerar la inclusión de componentes en el orden sugerido por el indicador hasta agotar los recursos.

En algunos componentes de digitalización, existen relaciones de dependencia entre alternativas. Dos alternativas pueden ser complementarias, de manera que para desplegar la alternativa 4 de digitalización es necesario haber desplegado la alternativa 2. También se puede dar el caso

de alternativas sustitutas. Por ejemplo, si se desplegó la alternativa 4, ya no es posible desplegar la alternativa 2. En caso de interdependencia, el análisis de beneficios y costos incrementales se debe estructurar sobre estrategias de despliegue de los componentes, considerando el carácter complementario o sustitutorio de las opciones evaluadas. Cada estrategia plantea una secuencia viable de despliegue de alternativas para alcanzar los objetivos de digitalización.

# Análisis de sensibilidad

La estimación de beneficios y costos se estructura sobre supuestos del comportamiento de variables que no están bajo el control de quien ejecuta el proyecto. El crecimiento demográfico, el comportamiento de la actividad económica, la evolución futura del precio de los factores, como los salarios, la tasa de interés o la de cambio, influyen en los resultados del proyecto y no es posible predecirlos con precisión. Por ello, conviene llevar a cabo un análisis de sensibilidad para determinar qué tan robustos son los indicadores del proyecto ante escenarios ácidos de comportamiento de las variables externas.

El análisis de sensibilidad se debe concentrar en aquellas variables con mayor incidencia en el proyecto y considerar que algunas variables externas están correlacionadas entre sí. Se trata de incluir en el flujo de evaluación un cambio en los supuestos y registrar el nuevo resultado. La relación de los cambios porcentuales en el resultado final y el cambio porcentual en el supuesto de modelación es un indicador de la sensibilidad del desempeño del proyecto a cada una de las variables consideradas en el análisis. De igual forma, es posible establecer cuál es el rango de valores de determinada variable en el cual los resultados del proyecto son aceptables. Este ejercicio es útil porque permite crear una noción del riesgo que existe de que el proyecto se aleje de los objetivos en determinados estados de la economía o el sector. Si es improbable que las variables se salgan del rango, el ejercicio de evaluación se puede considerar robusto para soportar las decisiones y seguir adelante con la inversión. En caso contrario, es necesario llevar a cabo un análisis de riesgo más profundo. El análisis de sensibilidad también se puede conformar analizando el efecto simultáneo de varias variables sobre el desempeño del proyecto. En este caso, se trata de conformar escenarios —optimista, medio y pesimista— y reportar los resultados cuando el modelo simula los indicadores del proyecto con cada uno de ellos.

Es útil y en ocasiones una exigencia estructurar una matriz de riesgos del proyecto. La matriz contiene, en las filas, una lista de los riesgos a los que el proyecto se puede ver expuesto. En las columnas, por su parte, se incluyen las posibles causas de la ocurrencia; el impacto de la ocurrencia sobre los resultados

del proyecto (proviene del análisis de sensibilidad); los efectos negativos sobre el proyecto; el nivel (rango) de probabilidad de ocurrencia<sup>31</sup> y la severidad del impacto<sup>32</sup>, y las medidas para mitigar su ocurrencia o impacto. La combinación de probabilidad y severidad del impacto permiten, a su vez, establecer el nivel de riesgo del proyecto. Es recomendable descartar proyectos con niveles muy elevados de riesgo. La construcción de la matriz de riesgo constituye una forma de incluir en la estructuración medidas orientadas a mitigar o prevenir los riesgos con un alto impacto en el desempeño del proyecto, tanto en la etapa de construcción como en la de operación. En particular, el ejercicio permite asignar los riesgos entre los diferentes agentes involucrados en el proyecto. Como regla general, los riesgos se deben asignar a quien esté en mejores condiciones para gestionarlos.

En proyectos de gran tamaño y para riesgo de alto impacto, conviene llevar a cabo un análisis del riesgo. Se trata de caracterizar la función de distribución subyacente de las variables aleatorias bajo análisis. Con los parámetros de la función se alimenta un “modelo de Montecarlo”, el cual permite realizar un número grande de simulaciones, en las que la variable adquiere diferentes valores generados aleatoriamente a partir de la función de distribución. En cada simulación, se reportan los resultados de los indicadores del proyecto (VPN, TIR, B/C). Con esta información, es posible construir una función de distribución del desempeño del proyecto y determinar, por ejemplo, cual es la probabilidad de que el VPN del proyecto sea negativo.

<sup>31</sup> En la guía de evaluación de la UE (Comisión Europea, 2014) se sugiere catalogar los riesgos por rangos de probabilidad: muy improbable (0-10 % de probabilidad); improbable (10-30 % de probabilidad); tan probable que ocurra como que no ocurra (33-66 % de probabilidad); probable (66-90 % de probabilidad); muy probable (90-100 % de probabilidad).

<sup>32</sup> De igual forma, la guía de la UE (Comisión Europea, 2014) clasifica los efectos de la ocurrencia sobre el proyecto en seis categorías, donde la categoría 1 es ningún efecto y la categoría 6 es catastrófico.

# Incentivos y barreras de la digitalización del sector

Los avances tecnológicos en la digitalización de la infraestructura de movilidad tienen un impacto significativo en términos económicos y de calidad de vida. Los gobiernos, la academia y los fabricantes de autos (y de equipos de conectividad) en Estados Unidos, Europa y Asia trabajan para unificar protocolos y tecnologías. Esos esfuerzos están dirigidos a optimizar la forma en que se comunican los vehículos con la infraestructura y los vehículos entre sí. Las tecnologías más avanzadas de automóviles autónomos y drones solo se empezarán a desplegar en América Latina una vez que hayan madurado en los países desarrollados.

Mientras esto ocurre, la región debe hacer esfuerzos por cerrar las brechas existentes en materia de digitalización de la movilidad. Desde el punto de vista técnico, es imperativo adoptar protocolos que aseguren la interoperabilidad de los equipos en redes viales de diferentes jerarquías y a cargo de distintos responsables. Idealmente, los países deben contar con un protocolo único que permita a un vehículo pagar los peajes o cargos de congestión o contaminación sin detenerse y en cualquier segmento de la red vial. La digitalización ofrece soluciones tecnológicas ya ensayadas para detectar el paso de los automóviles sin detenerse y continuar el proceso electrónico de liquidación y recaudo.

En paralelo es importante avanzar en la estructuración de marcos normativos que permitan el cobro a los usuarios por el uso de las vías. La literatura económica muestra que, tanto desde el punto de vista del fisco como de los usuarios, lo mejor es cobrar cargos a los usuarios que aseguren la financiación del mantenimiento de la red. En áreas urbanas congestionadas, como se discutió, es óptimo disuadir de usar los automóviles privados mediante el cobro de una tarifa. La

norma debe permitir a las autoridades implementar estos sistemas de cobro, condicionado a la realización de estudios técnico-jurídicos y económicos que muestren la bondad de la medida, los niveles tarifarios y las reglas para la aplicación de los recursos. Se debe hacer un esfuerzo importante de convencimiento para que la ciudadanía acoja positivamente las medidas. Las evaluaciones ex post en lugares donde se han implementado estos mecanismos muestran un apoyo mayoritario por parte de la población.

También es importante regular el manejo de la información de cámaras y sistemas digitales para disuadir del incumplimiento de las normas y controlar los flujos vehiculares. Los protocolos y normas que armonicen la entrada de estas tecnologías pueden tener efectos positivos en su ritmo de expansión.

El sector público, a diferentes niveles de gobierno, debe modernizar los sistemas de control y gestión de las flotas de transporte público, de forma que se desplieguen las tecnologías digitales en los procesos de gestión de despachos, vigilancia en buses y estaciones, pago electrónico y telemetría para el control de velocidad, entre otras. La adopción de nuevas tecnologías puede enfrentar rigideces contractuales con concesionarios del servicio o el recaudo.

Finalmente, se deben incluir en la agenda todas aquellas acciones regulatorias que faciliten la formación de empresas orientadas a ofrecer, mediante plataformas digitales, servicios compartidos de movilidad en las áreas urbanas. Las normas deben asegurar la conformación de organizaciones eficientes y competitivas de la industria y permitir un aprovechamiento del espacio público en armonía con otros usos.

Cuadro A.2 12 — Aspectos regulatorios asociados a la digitalización del sector de la movilidad

**Regulación técnica**

Adoptar protocolos que aseguren la interoperabilidad	Entre vehículos
	Entre la infraestructura y los vehículos
Protocolo único de detección vehicular y pago electrónico	Peajes urbanos
	Peajes interurbanos
	Cargos por congestión
Reglamentación del STI para transporte público	Sistemas de recaudo digital
	Sistemas de telemetría
	Cámaras en vehículos y estaciones

**Regulación económica**

Reglamentar cargos de usos de vías	Peajes urbanos
	Peajes interurbanos
	Cargos por congestión
Promover y reglamentar la generación de servicios compartidos apoyados en plataformas digitales	Reglas de entrada y organización de la industria
	Aprovechamiento del espacio público
Protocolos para la digitalización	Gobernanza y privacidad de los datos generados en las cámaras y sensores de la infraestructura de vehículos

