

Planificación de transporte urbano en ciudades inteligentes

Sergio Nesmachnow¹ [0000-0002-8146-4012], Renzo Massobrio^{1,2} [0000-0002-0040-3681]

Alfredo Cristóbal³ [0000-0003-2297-6031], Andrei Tchernykh⁴ [0000-0001-5029-5212]

¹ Universidad de la República, Uruguay

² Universidad de Cádiz, Spain

³ Universidad Veracruzana, México

⁴ Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México

sergion@fing.edu.uy, renzom@fing.edu.uy,
acristobal@uv.mx, chernykh@cicese.mx

Resumen. Este artículo presenta las principales actividades propuestas por el proyecto ‘Planificación de transporte urbano en ciudades inteligentes’ desarrollado por grupos de investigación de Uruguay y México, en el marco del programa ‘Fondo Conjunto de Cooperación Uruguay–México’. Se describen los principales conceptos de la propuesta y su contexto, y se presentan las actividades en desarrollo y resultados preliminares.

Palabras clave: Ciudades inteligentes, transporte urbano, análisis de datos urbanos.

1. Introducción

La complejidad de las actividades desarrolladas en las ciudades impone desafíos para la movilidad de sus habitantes. En ese contexto, los sistemas de transporte urbano tienen un rol central en las grandes urbes, para el desplazamiento diario de gran parte de la población [7]. En las últimas décadas se ha cambiado la denominación de este fenómeno, pasando del concepto de tránsito al de *movilidad*, presentando una visión sobre la problemática centrada en los usuarios, con interés por el ambiente y que permita comprender la dinámica de los traslados en las ciudades modernas [20].

Actualmente, los principales problemas de la movilidad urbana se relacionan con la incapacidad de los sistemas de transporte público de satisfacer las necesidades de un número creciente de usuarios. Para poder desarrollar soluciones innovadoras es necesario contar con información actualizada y de calidad acerca de la movilidad de los ciudadanos [3]. En general, en las ciudades de Latinoamérica la información disponible en los repositorios de datos del sector público es escasa y de baja calidad. Los mecanismos de recolección y almacenamiento de datos no están sistematizados y están limitados por la escasa disponibilidad de recursos humanos y presupuestales.

Ante el panorama descrito, la incorporación de tecnología en el proceso de diseño y planificación de sistemas de transporte urbano resulta indispensable para ofrecer un servicio de calidad a los ciudadanos. El proyecto ‘Planificación de transporte urbano en ciudades inteligentes’ parte de esta coyuntura y plantea el estudio y desarrollo de metodologías de análisis y diseño para el apoyo a la toma de decisiones relativas a la movilidad y el transporte urbano en ciudades inteligentes.

Las ciudades inteligentes (smart cities) proponen incorporar las tecnologías de la información y la comunicación con el objetivo de mejorar la calidad y eficiencia de los servicios urbanos [4]. Las ciudades inteligentes permiten un uso responsable de los recursos y fomentar la participación activa de los ciudadanos en los procesos de toma de decisiones, con el fin de alcanzar una ciudad sustentable e inclusiva. Los sistemas de transporte inteligente (Intelligent Transportation Systems, ITS) son un componente fundamental en las ciudades inteligentes. Los ITS permiten recolectar una gran cantidad de datos de la movilidad en las ciudades, que pueden ser procesados con el fin de extraer valiosa información acerca de la movilidad de los ciudadanos [6]. Esta información puede ser ofrecida tanto a los usuarios del sistema de transporte como a los planificadores y tomadores de decisiones.

El proyecto propone la resolución de problemas de movilidad y transporte público en el contexto de ciudades inteligentes. Esta temática es interesante desde lo académico, debido a la complejidad de los problemas abordados y a la masividad de los datos a analizar, así como desde lo social, al generar un gran impacto en la experiencia de los ciudadanos en sus desplazamientos, afectando además en aspectos económicos y medioambientales de las ciudades. Las realidades actuales de los sistemas de transporte de los países proponentes (Uruguay, México y Cuba) son variadas. Sin embargo, existe un punto en común: las iniciativas de incorporación de tecnología al proceso de planificación del transporte son recientes o en algunos casos nulas. Por este motivo creemos firmemente que este proyecto puede contribuir en acercar el concepto de transporte inteligente a la realidad de nuestras ciudades.

El artículo se organiza del modo que se describe a continuación. La sección 2 introduce trabajos previos desarrollados en Uruguay y México por los grupos de investigación participantes. El proyecto se describe en la sección 3 y sus principales actividades y resultados parciales obtenidos se detallan en la sección 4. Finalmente, la sección 5 presenta conclusiones y las principales líneas de trabajo actual y futuro.

2. Trabajos previos en Uruguay y México

Esta sección describe trabajos previos desarrollados en la temática del proyecto por los grupos de investigación participantes en la propuesta, en Uruguay y México.

2.1 Uruguay

Los antecedentes de proyectos e investigaciones realizadas en Uruguay por parte del grupo de trabajo de la Universidad de la República incluyen el análisis de grandes volúmenes de datos y resolución de problemas de optimización del transporte público:

- Sincronización inteligente de semáforos utilizando algoritmos evolutivos, para optimizar el flujo vehicular y reducir la polución urbana. Como caso de estudio se optimizaron los ciclos semafóricos para un corredor de transporte público en la ciudad de Montevideo [14,19].
- Procesamiento en la nube de grandes volúmenes de datos de GPS del transporte público en Montevideo. Se procesó información histórica de geolocalización de los autobuses en la ciudad de Montevideo con el fin de obtener estadísticas sobre la eficiencia del transporte público [11].

- Planificación de viajes compartidos en taxis. El proyecto propuso la utilización de inteligencia computacional para planificar los viajes en taxis de un grupo de usuarios con el fin de reducir los costos y minimizar las demoras [10].

2.2 México

Los antecedentes de proyectos e investigaciones realizadas por parte de instituciones mexicanas vinculadas con el proyecto incluyen:

- Sistema de cobro automático de peaje en zonas de gran tráfico vehicular. El proyecto instrumentó una identificación única de los vehículos y capturar en tiempo real sus posiciones geográficas con el fin de cobrar peaje automáticamente a vehículos que se encuentran en una zona considerada como de alto tráfico vehicular (<http://www.capufe-iave.com.mx>).
- Sistema de monitoreo automático de velocidad de automóviles en tiempo real, donde cada vehículo actúa como un nodo del observatorio ciudadano que permite conocer la velocidad de los vehículos en las calles de la ciudad en tiempo real.
- Sistema para el análisis multidimensional de datos de tráfico utilizando técnicas de minería de datos y de inteligencia de negocios.
- Sistema para asignación de flota de autobuses para cubrir la demanda de pasajeros y reducir la circulación de vehículos semivacíos, haciendo más rentable la operación y favoreciendo la descongestión de las vías [15].
- Sistema para el diseño de horarios y la calendarización de los vehículos para la planificación de transporte público, basado en el estudio y optimización de la frecuencia de los vehículos para evitar sobrecostos, mejorar la calidad del servicio percibida por el usuario, y reducir la contaminación ambiental [15,16].
- Planificación multiobjetivo para la creación de horarios utilizando vehículos con diferente capacidad y costo de funcionamiento, considerando las restricciones de las entidades gubernamentales para los ITS [17,18].

3. Descripción del proyecto

Esta sección presenta una descripción general del proyecto ‘Planificación de transporte urbano en ciudades inteligentes’.

3.1 Beneficiarios del proyecto

Los beneficiarios directos del proyecto son las instituciones participantes, que potenciarán sus actividades de formación, investigación y desarrollo en la temática de ciudades inteligentes. Asimismo, el proyecto será de utilidad para las autoridades locales de las ciudades involucradas, que apoyan la iniciativa: Intendencia de Montevideo (Uruguay), Ayuntamiento de Poza Rica (Veracruz, México) e Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Ensenada (México).

El proyecto cuenta con un fuerte componente social, con impacto directo en aspectos fundamentales de toda ciudad moderna: el transporte y la movilidad de los ciudadanos. Se propone incorporar tecnologías para mejorar los sistemas de transporte actuales, para que ofrezcan una mejor experiencia de viaje. Los principales beneficios que podrán ser observados por los ciudadanos incluyen: la disminución en los tiempos de viajes gracias a la mejor planificación del tráfico, una mejora en los costos debido a la planificación eficaz del sistema de transporte, la posibilidad de adoptar nuevos modos de transporte más ecológicos y económicos contando con infraestructura específica que brinde seguridad y comodidad, entre otros.

El proyecto ofrece beneficios a las empresas de transporte que brindan servicios en las ciudades. Actualmente, la planificación de rutas se realiza de forma manual, con poca información sobre las demandas reales entre puntos de la ciudad. De igual forma, en ocasiones la planificación de los horarios y frecuencias de los servicios de autobuses no se corresponde con las necesidades de los pasajeros, lo que conduce a líneas poco rentables en ciertos horarios o a demandas no cubiertas por parte de las empresas. La incorporación de tecnología en la toma de decisiones sobre líneas y frecuencias de autobuses tiene un impacto directo en la mejora de rentabilidad de las empresas de transporte público de la ciudad.

Los beneficios también se extienden a las autoridades de cada ciudad, que cumplen roles de regulador, establecen las políticas públicas de transporte, controlan y fiscalizan el sistema de transporte. Actualmente, las autoridades cuentan con diversas fuentes de datos provenientes de sensores presentes en los ITS (e.g., registros de venta de boletos, GPS instalados en los vehículos, horarios programados, datos de teléfonos móviles). Sin embargo, estos datos no suelen ser utilizados para extraer información útil que permita mejorar el sistema de transporte y ofrecer un mejor servicio a los ciudadanos. Indirectamente, la planificación del tráfico contribuye a mejorar las condiciones medioambientales. Este es un tema transversal que tiene un impacto directo en la salud y en la calidad de vida de los ciudadanos.

Finalmente, el proyecto propone apoyar a la comunidad de la ciudad de Camagüey, Cuba, para el desarrollo de estrategias de planificación de movilidad y la aplicación de las metodologías y técnicas a desarrollar en la investigación. La comunidad de la ciudad de Camagüey, Cuba es otro beneficiario directo del proyecto.

3.2 Contexto y vínculos con las políticas públicas nacionales, y sectoriales

El proyecto plantea abordar temas pertinentes en el marco de la gestión de servicios públicos en las ciudades involucradas en la propuesta.

La Intendencia de Montevideo (IM) propuso en 2010 el Plan de Movilidad Urbana para reestructurar y modernizar el transporte urbano en la ciudad. En el marco del Plan de Movilidad Urbana se creó el Sistema de Transporte Metropolitano (STM), con el objetivo de integrar el transporte público de Montevideo en un único sistema. Uno de los primeros cambios introducidos por el STM consistió en equipar a los autobuses con unidades GPS e incorporar una tarjeta inteligente para el pago de los viajes. Estos dispositivos permiten recolectar un enorme volumen de datos sobre la ubicación de las unidades, las ventas de boletos, los trasbordos entre distintas líneas, entre otros. Actualmente, la IM recolecta datos enviados por las empresas de transporte pertenecientes al STM. Sin embargo, los datos recolectados no son utilizados con el fin de extraer información respecto a la movilidad de los pasajeros.

Complementariamente, la ciudad de Montevideo participa desde mayo de 2016 en el desafío “100 ciudades resilientes” impulsado por la fundación Rockefeller. El programa busca capacitar a las autoridades de las ciudades para “diseñar, implementar y administrar soluciones proactivas frente a los desafíos planteados por la urbanización, la globalización y el cambio climático”. Entre varios de los desafíos señalados por la organización se destaca el de un “pobre sistema de transporte”. El objetivo de este desafío es el de lograr un libre movimiento de personas y bienes, a través de un sistema de transporte multimodal.

En México, existe un plan para optimizar el tráfico vehicular en autopistas federales, para el cual los tres niveles de gobierno mexicanos (municipal, estatal y federal) han invertido en tecnología para monitoreo y optimización del parque vehicular de la zona conurbada Poza Rica-Tihuatlán-Papantla-Coatzacoatlán.

Concretamente, la ciudad de Poza Rica, Veracruz, cuenta con proyectos viales para fomentar la sustentabilidad en el transporte público mediante la modernización del parque vehicular, la capacitación vial y el ordenamiento del tránsito para mejorar la movilidad urbana. Estos proyectos se encuentran descritos en el Plan Municipal de Desarrollo Poza Rica 2014-2017. Entre las obras más significativas de este plan se encuentran el cambio de sentido de calles del centro de la ciudad, la construcción de un distribuidor vial, la rehabilitación de rutas alternas para descongestionar el tráfico y la incorporación de rutas largas de transporte público para intercomunicación entre municipios que conforman la zona conurbada.

En Ensenada, como fuente de información se cuenta con la colaboración del Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Ensenada, cuyas autoridades manifestaron interés por el proyecto y se acordó trabajar en conjunto, tomando como base un estudio de tránsito y movilidad realizado en 2016.

3.3 Aportes complementarios sobre temas transversales

La movilidad urbana es un medio que permite realizar actividades esenciales de los ciudadanos y, por lo tanto, impacta tanto desde el punto de vista humano como urbanístico en la vida de las ciudades. El continuo crecimiento del parque automotor en las ciudades impacta negativamente en las emisiones producidas y en la salud de los habitantes. Permitir un flujo de vehículos apropiado en las vías de tráfico de una ciudad asegura una menor contaminación ambiental y sonora.

En este sentido, el proyecto tiene aportes complementarios sobre factores transversales definidos como prioritarios para las ciudades de las instituciones proponentes, con aplicación directa a otras ciudades latinoamericanas. La planificación inteligente del tráfico es de gran importancia en el caso de grandes urbanizaciones y es abordada en el proyecto en los siguientes aspectos: i) la planificación del tráfico vehicular y su relación con la polución y la emisión de contaminantes por parte de los vehículos y ii) el diseño y planificación de vías alternativas para la movilidad de ciudadanos (el caso concreto de las ciclovías). Ambos temas tienen un alto impacto en el desarrollo de sistemas de transporte sustentable y de movilidad sostenible. Las experiencias previas relacionadas con la planificación de tráfico y su impacto en la contaminación ambiental en la ciudad de Montevideo están limitadas a esfuerzos puntuales de la Intendencia junto a la Dirección Nacional de Medio Ambiente. No se conocen antecedentes nacionales que planteen el desarrollo de herramientas para la planificación del tráfico.

Un aspecto importante de la filosofía de diseño de los sistemas a construir en el proyecto es la inclusión y participación de sus beneficiarios finales, los ciudadanos. En este sentido, la integración de los valores, intereses y necesidades de los beneficiarios es clave no solo para el correcto funcionamiento de los sistemas, sino también como forma de enriquecer la experiencia humana [13]. Por este motivo, el proyecto propone involucrar a representantes de la sociedad civil en los diagnósticos y especificación de problemas a tratar, en el refinamiento de los objetivos, la recolección de los datos y su muestreo (a través del uso y difusión de la aplicación de recolección de datos) y la evaluación de las soluciones implementadas. Se propone que estas formas de participación sean coordinadas por las contrapartes locales.

3.4 Proyecciones y sostenibilidad

La proyección y sostenibilidad de la iniciativa una vez concluido el aporte del Fondo Conjunto de Cooperación México-Uruguay está garantizada por las actividades de investigación en la temática que desarrollan los grupos de trabajo. Otro factor relevante para asegurar la sostenibilidad es el interés y el apoyo de las autoridades de las ciudades de las instituciones que participan en la propuesta. Existe un apoyo manifiesto de las universidades y de los gobiernos involucrados en colaborar con las actividades del proyecto y posibilitar su aplicación directa en la práctica. Se propone aplicar las metodologías y técnicas a desarrollar en el proyecto en la ciudad de Camagüey, Cuba. Esta colaboración se plantea como un primer paso para replicar las metodologías, actividades y resultados del proyecto en otras ciudades de Latinoamérica. Dado que el proyecto contempla diversos medios de transporte, se analizará la adaptación de las mejores estrategias considerando las características de la ciudad objetivo. Un aspecto importante es contemplar la realidad del centro histórico de Camagüey, declarado patrimonio de la humanidad por la UNESCO en 2007, que constituye, un ejemplo de asentamiento urbano tradicional con influencia de la arquitectura y el urbanismo de la Europa medieval en el trazado urbano, donde las vías alternativas de transporte (urbano, ciclovías) tienen un importante impacto en la preservación de la zona. La Universidad de Camagüey y el Gobierno Municipal de la ciudad de Camagüey apoyan el proyecto y tienen interés por aplicar las soluciones desarrolladas a la realidad de la ciudad de Camagüey.

3.5 Problemas a abordar en el marco del proyecto

El proyecto propone la aplicación de inteligencia computacional a la planificación de movilidad en el contexto de ciudades inteligentes, en especial problemas de relevancia en las ciudades de Montevideo, Ensenada y Poza Rica. Las soluciones a los problemas abordados considerarán los intereses de todos los actores involucrados: i) los intereses de los ciudadanos, usuarios de los sistemas de transporte, que buscan un transporte confortable, eficiente, económico, confiable y amigable con el medio ambiente; ii) los intereses de las autoridades, que buscan controlar el correcto funcionamiento del sistema, aplicar las políticas de movilidad que estiman necesarias y asegurar que los ciudadanos tengan un servicio adecuado; iii) las empresas de transporte, que persiguen intereses principalmente económicos y que están reguladas por las políticas establecidas por las autoridades. Los detalles de los problemas abordados se describen a continuación.

Análisis de demanda de movilidad. Para poder resolver problemas de optimización de transporte urbano es indispensable conocer los patrones de movilidad de las personas. La movilidad en las ciudades se suele representar mediante matrices origen-destino, que indican la cantidad de personas desplazándose entre cada par de puntos. En los enfoques clásicos del problema, estas matrices se generan mediante encuestas realizadas a los pasajeros. Sin embargo, las encuestas ofrecen solamente una visión parcial de la movilidad de los ciudadanos e implican un gasto considerable cada vez que se desean obtener datos actualizados. El proyecto propone una alternativa para estudiar la movilidad urbana tomando ventaja de datos generados por los ITS.

Adicionalmente, se propone el desarrollo de un mecanismo complementario para la recolección de datos basado en una aplicación móvil. Los datos de movilidad recolectados por la aplicación serán procesados junto a los datos generados por los ITS de la ciudad en un sistema centralizado de almacenamiento y análisis (también a desarrollar en el proyecto). El procesamiento se llevará a cabo utilizando técnicas de inteligencia computacional y computación distribuida, para obtener elementos que facilitarán la planificación u optimización de los sistemas existentes. El resultado de analizar estos datos contribuirá a la comprensión de los modelos de comportamiento y patrones espacio-temporales de las personas, incluyendo la detección de comunidades espacio-temporales de viajeros, la variación de patrones de viajes entre horas y días de la semana y las preferencias de las rutas seleccionadas. La aplicación móvil se desarrolla siguiendo una metodología que contempla el involucramiento de los usuarios finales, ciclos de trabajo cortos y la evaluación continua. El objetivo de la utilización de estas técnicas de desarrollo ágil es la obtención de un resultado final satisfactorio en cuanto a funcionalidades deseadas y facilidad de uso, que fomente un grado de adopción adecuado y que garantice la recolección de un volumen de datos significativo, que no comprometa el resultado de los análisis a realizar.

Planificación de recorridos y frecuencias del transporte público. Los datos recogidos por los ITS permiten extraer valiosa información acerca de la movilidad de los pasajeros, el nivel de utilización de los autobuses, la velocidad y los tiempos de viaje, la puntualidad de los servicios respecto a los horarios programados, entre otros. Esta información es necesaria para la resolución de diversos problemas de optimización del transporte público: el diseño y rediseño de líneas de autobuses, la ubicación óptima de paradas dentro de las rutas, la planificación de horarios para satisfacer la demanda, la generación de agendas para los choferes, entre muchos otros [8,9]. El proyecto propone estudiar el diseño de nuevas líneas y la reforma de líneas existentes en las ciudades de Montevideo, Ensenada y Poza Rica, enfocándose en el estudio de soluciones que permitan, mediante mínimas inversiones por parte de las autoridades, atender demandas específicas que actualmente no son cubiertas de forma adecuada. A modo de ejemplo, se propone la incorporación de líneas de autobuses que permitan interconectar centros de estudio, la modificación de líneas existentes para cubrir la demanda en centros logísticos en la periferia de la ciudad, entre otros.

Planificación de redes alternativas de desplazamiento: peatones y ciclovías. Los medios de transporte motorizados históricamente han representado una solución para la movilidad en las ciudades. Sin embargo, estos modos de transporte tienen efectos negativos como la congestión (que aumenta los tiempos de viaje) y la polución (que degrada el bienestar de todos los habitantes de la ciudad). Como respuesta a esta

situación, tanto por voluntad de los ciudadanos (usuarios) como de las entidades que gestionan las ciudades (planificadores), se ha experimentado un incremento sustancial del uso de la bicicleta para viajes habituales, lo que además ha ayudado a mejorar la equidad y el acceso a oportunidades socioeconómicas de los ciudadanos [22]. La infraestructura específica para la circulación de bicicletas generalmente consiste en una especialización del espacio urbano, ya sea mediante señalizaciones, segregaciones o pavimentos específicos, con diferentes costos de construcción y de mantenimiento [21]. La elección de una determinada infraestructura tiene impacto en la percepción de los usuarios del sistema. Se propone abordar el problema de decidir dónde construir infraestructura y de qué tipo, sujeto a restricciones presupuestales y de diseño urbano, y contemplando los intereses de los usuarios.

Otro aspecto relevante para el diseño de sistemas de transporte sustentables consiste en la construcción de infraestructura específica para el desplazamiento eficiente, confortable y seguro de peatones. Las necesidades de los peatones suelen ser erróneamente relegadas a un segundo plano al momento de planificar los sistemas de transporte de las ciudades. Sin embargo, un adecuado diseño de la infraestructura puede contribuir a una vida más saludable de los ciudadanos, permitiendo el disfrute de los espacios comunes de forma segura y amigable con el entorno.

Planificación de semáforos. La congestión vehicular constituye uno de los problemas más significativos de las urbanizaciones modernas. El exceso de vehículos en la red de vías de tráfico hace que la velocidad de los vehículos se reduzca, llegando en el peor caso a detener completamente el tráfico. De este contexto surge la necesidad de optimizar los sistemas de control vehicular en las ciudades modernas, para mejorar el flujo del tráfico en horas pico con alta densidad de vehículos por área. Mejorar el flujo de tráfico mediante modificaciones en la infraestructura es una solución costosa e intrusiva para los ciudadanos. Como consecuencia, los enfoques utilizando métodos indirectos de control surgen como alternativas significativamente más económicas y promisorias sin impacto negativo en los usuarios. Uno de los métodos indirectos más útiles para la optimización del tráfico lo constituye la programación de los ciclos de las luces de los semáforos, que permite mejorar la fluidez del tráfico y el control de transporte público y vehículos privados [23].

Los enfoques que aplican inteligencia computacional se han aplicado para proporcionar alternativas viables para resolver los complejos problemas de optimización relacionados con la planificación de semáforos [1]. El proyecto propone la aplicación de métodos de inteligencia computacional combinados con estrategias de simulación microscópica de tráfico, sobre escenarios reales contruidos con datos obtenidos de las ciudades de Montevideo, Ensenada y Poza Rica.

4. Principales actividades y su desarrollo actual

El proyecto propone actividades orientadas al análisis de problemas relevantes y el desarrollo de soluciones para los problemas identificados. Complementariamente, se propone la formación de estudiantes de grado y posgrado en la temática del proyecto, la realización de reuniones científicas y de eventos de difusión para posibilitar la transferencia tecnológica de los conocimientos y soluciones desarrolladas. Los principales detalles de las actividades propuestas se describen a continuación.

4.1 Diseño, implementación y distribución de una aplicación móvil para la recolección de datos de movilidad

Se propuso desarrollar una aplicación multiplataforma, de código abierto, que se beneficie de la utilización de frameworks para minimizar la duplicación de esfuerzos que conlleva el uso de las herramientas de desarrollo nativas de cada plataforma. El sistema de almacenamiento centralizado y los servicios remotos que la aplicación móvil consume se construyen sobre una infraestructura cloud que permite la adaptación dinámica a las cargas de trabajo, que pueden variar significativamente y son difíciles de estimar con antelación. Un enfoque similar se utiliza para desarrollar la componente analítica del sistema, utilizando plataformas de análisis de grandes volúmenes de datos y sistemas de información geográfica para el análisis periódico de la información recabada. Respecto a la distribución de la aplicación móvil, el objetivo inicial es alcanzar un mínimo de mil viajes reportados por día, para los cuales se propone recolectar los datos de duración y muestreo de la ubicación de los usuarios a intervalos regulares de entre 20 y 30 segundos. Se planea llegar al número de mil viajes diarios en un periodo de seis meses a partir de la liberación de la primera versión funcional de la aplicación. El registro de nuevas fuentes de datos y la distribución de la aplicación se hará en forma incremental, comenzando con un grupo de control, expandiéndose luego a los miembros de las contrapartes en el gobierno y llegando finalmente al público general a través de la publicación en las tiendas oficiales de las plataformas móviles. El resultado de esta actividad es una aplicación móvil para la recolección de datos de movilidad en funcionamiento y distribuida en comunidades de las ciudades de las instituciones participantes en la propuesta.

Esta actividad se ha iniciado y los principales avances incluyen un sistema cliente-servidor donde el software cliente captura los datos del usuario y los envía al software servidor para su almacenamiento y su análisis. El software cliente está implementado como una aplicación móvil que tiene dos versiones: una versión para el rol usuario y otra versión para el rol conductor. La versión del conductor es una alternativa barata y funcional a usar un hardware de comunicación incrustado en la unidad de transporte. El uso de una aplicación móvil asume que los conductores tienen un dispositivo móvil o teléfono inteligente que pueden usar para su trabajo. La aplicación móvil permite la captura de la información relacionada con el conductor y también la información relacionada con la unidad de transporte. La aplicación permite iniciar y finalizar un recorrido en la ruta asignada al conductor, y como servicio adicional, la aplicación permite al conductor reportar incidencias (robo, choque, inundación por lluvia de la vía de tránsito, etc.) en el recorrido. Además, la aplicación avisa al conductor sobre alertas de incidencias registradas en la ruta que recorre. La Fig. 1 presenta capturas de pantalla de la aplicación móvil.

En su versión usuario, la aplicación móvil captura datos de la actividad del usuario del transporte público junto con su geoposición y las envía al servidor. Como servicio adicional, la aplicación muestra información sobre el sistema de transporte público de la ciudad y hace recomendaciones al usuario sobre diferentes rutas para llegar a su destino considerando diferentes criterios, por ejemplo: el menor tiempo de recorrido, el menor número de transbordos, el menor costo, el menor número de reporte de incidentes delictivos, y menor riesgo por inundación. La Fig. 2 presenta capturas de pantalla de la aplicación móvil disponible para el usuario final.



Fig. 1. Capturas de la aplicación móvil para el conductor de la unidad de transporte público: (a) inicio de un recorrido por una ruta asignada, (b) muestra de un recorrido de la ruta asignada, (c) muestra de la lista de incidentes en el recorrido.

Ambas versiones de la aplicación móvil envían datos al software servidor cada vez que el usuario envía una solicitud de información al servidor o cada 30 segundos en caso de que el usuario no tenga interacción con el software servidor.

La idea de brindar servicios a los actores involucrados en el sistema de transporte público intenta fomentar el uso de la aplicación. Las aplicaciones móviles además de proveer un servicio comunitario también toman datos de movilidad de los usuarios y de las unidades de transporte público a lo largo de la ciudad. Con los datos adquiridos, se pretende hacer un análisis de frecuencia de uso así como de capacidad de las unidades de transporte público, como se ha explicado anteriormente.

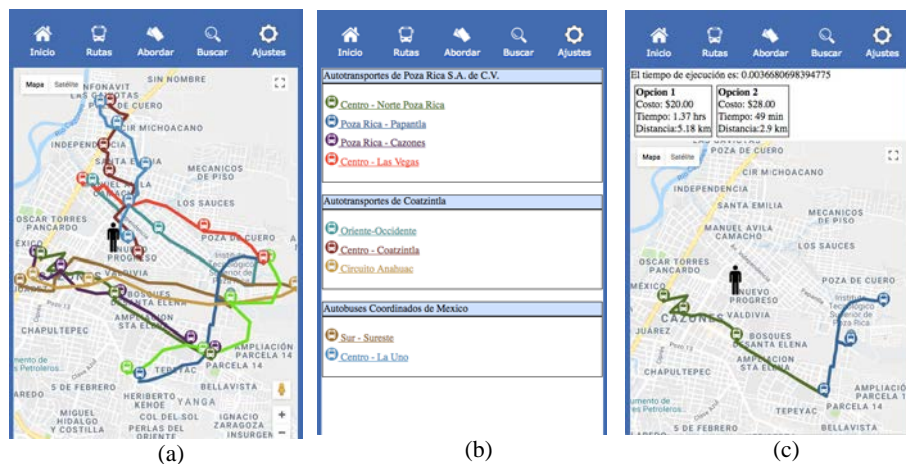


Fig. 2. Capturas de la aplicación móvil para el usuario del transporte público: (a) muestra de todas las rutas de transporte público de la ciudad (b) selección de una ruta específica, (c) planificación de un recorrido por la ciudad.

4.2 Relevamiento estado del arte sobre movilidad en ciudades inteligentes

Esta actividad propone el análisis de trabajos relacionados en las temáticas de planificación de tráfico y transporte público, metodologías y técnicas para análisis de movilidad y construcción de matrices origen destino, y aplicación de inteligencia computacional para problemas de planificación de tráfico. La actividad involucra a los grupos de investigación de todas las instituciones proponentes. El resultado de esta actividad es un documento de análisis de movilidad e identificación de problemas comunes a los sistemas de transporte de Montevideo, Ensenada y Poza Rica.

Esta actividad se ha iniciado y los avances incluyen un relevamiento del estado del arte sobre problemas de planificación de transporte público, el estudio de metodologías para la estimación de matrices origen-destino y para sincronización de frecuencia de autobuses. Parte del relevamiento realizado se ha incluido en el artículo publicado sobre relocalización de paradas de transporte público [5].

4.3 Actividades de formación

El proyecto prevé actividades de formación, incluyendo la asistencia a un curso corto en la temática de sistemas de transporte inteligentes por parte de tres estudiantes de posgrado (un estudiante de cada universidad participante). Las temáticas del curso se relacionarán con la estimación y modelado de demanda en sistemas de transporte inteligentes, el manejo de datos de tráfico y la planificación del transporte urbano. La actividad está planificada para desarrollarse en el segundo semestre de 2018.

Complementariamente, se planifica la realización de pasantías de estudiantes: i) pasantía de estudiante de posgrado de la Universidad Veracruzana en la Universidad de la República, para trabajar en el procesamiento de grandes volúmenes de datos de movilidad. Se propone generar matrices de demanda (origen-destino) a partir de los datos recolectados por el ITS presente en la ciudad de Montevideo y por la aplicación móvil. Se validarán los resultados alcanzados frente a resultados de encuestas realizadas en el pasado por las autoridades. El resultado al finalizar la pasantía consistirá en un informe sobre el análisis de movilidad desarrollado; ii) pasantía de un estudiante de la Universidad de la República en la Universidad Veracruzana para trabajar en el análisis de movilidad y en la implementación de técnicas de inteligencia computacional para resolver problemas relevantes en la ciudad de Poza Rica. El resultado consistirá en un informe sobre la movilidad en Poza Rica y un conjunto de herramientas aplicadas a resolver los problemas de movilidad identificados. Ambos resultados serán entregados a las autoridades de la ciudad para ser considerados por los tomadores de decisión; iii) pasantía de un estudiante del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada en la Universidad de la República para trabajar en la implementación de herramientas de inteligencia computacional para la resolución de los problemas definidos como relevantes en el contexto del proyecto y iv) pasantía de dos estudiantes de la Universidad de la República en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada para trabajar en la implementación de técnicas de inteligencia computacional para la resolución de los problemas de movilidad identificados en las etapas anteriores del proyecto.

4.4 Actividades de investigación

El proyecto propone desarrollar un conjunto de actividades de investigación que incluyen el estudio de problemas relevantes, reuniones científicas y elaboración de reportes e informes.

Formulación de problemas y diseño de herramientas de inteligencia computacional. Esta actividad contempla la formulación de los problemas de movilidad identificados como interesantes, como problemas de optimización matemática. Una vez definidos, se propone diseñar herramientas de inteligencia computacional que permitan resolver los problemas de forma eficiente. El resultado de esta actividad es un documento con la formulación matemática de los problemas identificados y la implementación de técnicas de inteligencia computacional para su resolución.

En este contexto, se ha avanzado en la formalización de problemas relevantes para la planificación de transporte público, incluyendo la relocalización de paradas y la sincronización de frecuencias de transporte público. Para el primer problema se ha propuesto un enfoque de resolución aplicando algoritmos evolutivos, que ha permitido calcular soluciones que mejoran a la realidad actual para escenarios en Montevideo [5]. El problema de sincronización de frecuencias abordado en el proyecto busca mejorar la experiencia de los pasajeros en dos aspectos: i) evitar el fenómeno de agolpamiento de autobuses (*bus bunching*) y ii) minimizar los tiempos de espera al realizar un trasbordo entre líneas. Para solucionar los problemas se propone ajustar las frecuencias de autobuses que comparten una porción significativa de su recorrido, de forma de minimizar el tiempo de espera medio de los pasajeros en la parada y ajustar la frecuencia de pares de líneas en puntos con alta demanda de trasbordos, para minimizar el tiempo de espera de los pasajeros entre el descenso del primer autobús y el ascenso al siguiente. Con este fin es necesario definir aquellos puntos con alta demanda de trasbordos, para en ellos sincronizar las frecuencias.

La identificación de puntos con alta demanda de trasbordos se realiza a través del análisis de datos provenientes de ITS. En el caso particular de Montevideo, los pasajeros pagan su viaje con su tarjeta inteligente al abordar el primer autobús. Luego pueden abordar otros autobuses durante el período de validez del viaje, presentando su tarjeta inteligente en cada bus. Los ascensos a los buses quedan registrados y asociados a la tarjeta, y es necesario estimar los puntos de descenso. Asumiendo que los pasajeros evitan caminar en exceso al realizar los trasbordos, se considera que un pasajero termina la primer etapa de su viaje en la parada más cercana al origen de la segunda etapa de su viaje, y así sucesivamente. De esta forma se puede estimar el destino del primer viaje, buscando la parada más cercana de esa línea a la parada de origen del siguiente viaje en la secuencia [12].

Como ejemplo del análisis, la Fig. 3 presenta las 50 paradas de autobuses con mayor demanda de trasbordos en Montevideo, de acuerdo al procesamiento de datos de mayo de 2015. Los círculos tienen un tamaño proporcional a la cantidad de trasbordos realizados. Se observa que la gran mayoría de trasbordos se realizan en terminales o intercambiadores especialmente construidos para esta función, a pesar de que el sistema de transporte permite a los pasajeros realizar trasbordos en cualquier parada y entre cualquier línea. Asimismo, se observa una mayor cantidad de trasbordos en la periferia de la ciudad, donde el trazado de líneas hace que sea indispensable realizar trasbordos para llegar a determinadas ubicaciones.



Fig. 3. Paradas de autobuses con mayor demanda de trasbordos en Montevideo.

Reuniones científicas. El proyecto propone realizar actividades científicas en las instituciones participantes, con la participación de investigadores y de estudiantes de cada una de las instituciones participantes. La primera reunión está prevista para celebrarse en Ensenada, en la primera semana de octubre de 2018. Las reuniones en Montevideo y Poza Rica se realizarán en el primer semestre del año 2019.

Publicaciones e informes. Se propone la redacción de al menos dos artículos científicos a ser publicados en revistas y/o conferencias internacionales en la temática de movilidad y transporte inteligente. Asimismo, se elaborarán informes parciales y una memoria final del proyecto, para describir las actividades alcanzadas, los logros obtenidos y las principales líneas de trabajo futuro. El informe final será entregado a las autoridades de las ciudades involucradas para que los resultados del proyecto sean considerados por los tomadores de decisión. Asimismo, se publicará una versión en línea para que quede disponible públicamente para la comunidad científica.

4.5 Difusión y transferencia de conocimientos

El proyecto propone realizar eventos de difusión y reuniones con los tomadores de decisiones en las ciudades que participan en la propuesta. Los eventos se realizarán en las tres ciudades que participan en la propuesta, con el objetivo de compartir los principales avances del proyecto ante investigadores de la región, estudiantes, autoridades y público en general. Se extenderán invitaciones a las autoridades de las ciudades con el fin de incorporar su visión en el proyecto, definir áreas prioritarias de acción, un plan de comunicación durante el transcurso del proyecto, un marco común para el intercambio de datos y un plan para asegurar la sustentabilidad de los esfuerzos de cooperación una vez culminado este proyecto específico. El proyecto también propone realizar una reunión de difusión y transferencia de conocimientos en la ciudad de Camagüey, con la participación de investigadores de todas las universidades involucradas en el proyecto. Se propone elaborar un documento de transferencia de conocimientos que permita aplicar los conocimientos generados en el proyecto a la realidad de otras ciudades.

5. Conclusiones, trabajo actual y futuro

Este artículo presentó el proyecto ‘Planificación de transporte urbano en ciudades inteligentes’ que surge de la colaboración de grupos de investigación de Uruguay y en México en el marco del programa ‘Fondo Conjunto de Cooperación Uruguay–México’. El proyecto plantea el estudio y desarrollo de metodologías de análisis y diseño para el apoyo a la toma de decisiones relativas a la movilidad y el transporte urbano bajo el paradigma de las ciudades inteligentes.

Los principales problemas abordados en el marco del proyecto incluyen: el análisis de demanda de movilidad, la planificación de recorridos y frecuencias del transporte público y de redes alternativas de desplazamiento (e.g., peatones y ciclovías), y la planificación inteligente de semáforos. Para la resolución de estos problemas se propone el uso de técnicas de inteligencia computacional que toman en cuenta los intereses de los ciudadanos, las autoridades y las empresas de transporte. En forma complementaria, el proyecto prevé la formación de estudiantes a nivel de grado y posgrado en la temática, la realización de reuniones científicas y la difusión de los resultados alcanzados tanto a un público experto como no especializado.

Las líneas de trabajo actual y futuro incluyen el desarrollo de una aplicación móvil para la recolección de datos de movilidad, la formulación de problemas y el diseño de herramientas de inteligencia computacional para la resolución de los problemas identificados y la realización de las actividades científicas, de formación y de difusión programadas en el marco del proyecto.

Reconocimientos

La investigación reportada en este artículo es financiada por el programa ‘Fondo Conjunto de Cooperación Uruguay–México’ AUCI–AMEXID.

6. Referencias

- [1] F. Ahmed y Y. Hawas. An integrated real-time traffic signal system for transit signal priority, incident detection and congestion management. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* **60**, 52–76 (2015).
- [2] A. Ceder. *Public Transit Planning and Operation: Modeling, Practice and Behavior*, Butterworth-Heinemann, Oxford (2007).
- [3] C. Chen, J. Ma, Y. Susilo, Y. Liu y M. Wang. The promises of big data and small data for travel behavior (aka human mobility) analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* **68**, 285–299, (2016).
- [4] M. Deakin y H. Al Waer. From intelligent to smart cities. *Intelligent Buildings International* **3**(3), 133–139 (2011).
- [5] E. Fabbiani, S. Nesmachnow, J. Toutouh, A. Tchernykh, A. Avetisyan, G. Radchenko. Analysis of mobility patterns for public transportation and bus stop relocation. *Programming and Computer Software* (2018) [in press].
- [6] L. Figueiredo, I. Jesus, J. Machado, J. Ferreira y J. De Carvalho. Towards the development of intelligent transportation systems. In *Intelligent Transportation Systems* **88**, 1206–1211 (2001).
- [7] S. Grava. The promises of big data and small data for travel behavior (aka human mobility) analysis, *Urban Transportation Systems*. McGraw-Hill Professional (2002).

- [8] W. Lam y M. Bell. *Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning*, Emerald Group, Bingley, UK (2002).
- [9] J. Lee y B. Park. Development and Evaluation of a Cooperative Vehicle Intersection Control Algorithm Under the Connected Vehicles Environment. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* **13**(1), 81–90 (2012).
- [10] R. Massobrio, G. Fagúndez, S. Nesmachnow. Multiobjective evolutionary algorithms for the taxi sharing problem, *International Journal of Metaheuristics* **5**(1), 67–90 (2016).
- [11] R. Massobrio, A. Pías, N. Vázquez y S. Nesmachnow. Map-Reduce for Processing GPS Data from Public Transport in Montevideo, Uruguay, 2º Simposio Argentino de Grandes Datos, Buenos Aires, Argentina (2016).
- [12] R. Massobrio, S. Nesmachnow. Análisis de datos de movilidad del transporte público de Montevideo. XIX Congreso Latinoamericano de Transporte Público y Urbano, pp. 1–11 (2016).
- [13] E. Mumford. *Designing Human Systems for New Technology: The ETHICS Method*. Manchester: Manchester Business School (1983).
- [14] S. Nesmachnow, E. Arreche, R. Massobrio, C. Mumford, A. Olivera y P. Vidal. Traffic light optimization for Bus Rapid Transit using a parallel evolutionary algorithm: the case of Garzon Avenue in Montevideo, Uruguay, XVIII Latin-Iberoamerican Conference on Operations Research, Santiago, Chile (2016).
- [15] D. Peña, A. Tchernykh, S. Nesmachnow, R. Massobrio, A. Drozdov, S. Garichev. Multiobjective vehicle type and size scheduling problem in urban public transport using MOCell. *IEEE International Conference on Engineering & Telecommunications*, pp. 110–113 (2016).
- [16] D. Peña, A. Tchernykh, G. Radchenko, S. Nesmachnow, J. Ley-Flores, R. Nazariega. Multiobjective Optimization of Greenhouse Gas Emissions Enhancing the Quality of Service for Urban Public Transport Timetabling. IV IEEE International Conference on Engineering & Telecommunications pp:114–118 (2017).
- [17] D. Peña, A. Tchernykh, S. Nesmachnow, R. Massobrio, A. Feoktistov, I. Bychkov. Multiobjective Vehicle-type Scheduling in Urban Public Transport. In *IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops*, pp. 482–491 (2017).
- [18] D. Peña, A. Tchernykh, S. Nesmachnow, R. Massobrio, A. Feoktistov, I. Bychkov, G. Radchenko, A. Drozdov y S. Garichev. Operating Cost and Quality of Service Optimization for Multi-Vehicle-Type Timetabling for Urban Bus Systems. *Journal of Parallel and Distributed Computing* (2018) [in-press]
- [19] M. Péres, G. Ruiz, S. Nesmachnow y A. Olivera. Multiobjective evolutionary optimization of traffic flow and pollution in Montevideo, Uruguay, *Applied Soft Computing* **70**, 472–485 (2018).
- [20] C. Rey y O. Cardozo. La vulnerabilidad y la movilidad urbana. Capítulo 11 de *Aportes conceptuales y empíricos de la vulnerabilidad global* (A. Foschiatti, ed.). Universidad Nacional del Nordeste, Argentina (2007).
- [21] C. Reynolds, M. Harris, K. Teschke, P. Crompton y M. Winters. The impact of transportation infrastructure on bicycling injuries and crashes: a review of the literature. *Environmental Health*, 8–47 (2009).
- [22] R. Ríos, A. Taddia, C. Pardo y N. Lleras. *Ciclo-inclusión en América Latina y el Caribe: guía para impulsar el uso de la bicicleta* - Banco Interamericano de Desarrollo. [Online] <https://publications.iadb.org/handle/11319/6808>. Accedido en mayo de 2018.
- [23] J. Sánchez, M. Galán y E. Rubio. Applying a Traffic Lights Evolutionary Optimization Technique to a Real Case: “Las Ramblas” Area in Santa Cruz de Tenerife. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* **12**(1), 25–40 (2008).
- [24] D. Washburn, U. Sindhu, S. Balaouras, R. Dines, N. Hayes, y L. Nelson. *Helping CIOs Understand ‘Smart City’ Initiatives: Defining the Smart City, Its Drivers, and the Role of the CIO* Cambridge, MA Forrester Res. Inc. (2010).