

USO DE TARJETAS INTELIGENTES PARA CONFECCIONAR LA MATRIZ ORIGEN-DESTINO DE MOVILIDAD EN SISTEMAS DE SÓLO ENTRADA: REVISIÓN DE LA LITERATURA Y UNA PROPUESTA PARA BAHÍA BLANCA

DIEGO ROSSIT¹⁻² - YAMILA GRASSI¹⁻² - FABIO MIGUEL³ - GABRIELA PESCE⁴
MÓNICA F. DÍAZ⁵⁻⁶ - MARIANO FRUTOS¹⁻⁷⁻⁸

¹Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Argentina.

²Instituto de Matemática de Bahía Blanca INMABB UNS-CONICET, Argentina.

³Sede Alto Valle - Valle Medio, Universidad Nacional de Río Negro-CONICET, Argentina.

⁴Instituto de Investigación en Ciencias de la Administración, Departamento de Ciencias de la Administración, Universidad Nacional del Sur, Argentina.

⁵Planta Piloto de Ingeniería Química PLAPIQUI UNS-CONICET, Argentina.

⁶Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Sur, Argentina.

⁷Instituto de Investigaciones Económicas y Sociales del Sur IIESS UNS-CONICET, Argentina.

⁸Instituto de Ingeniería II UNS-CIC, Argentina.

diego.rossit@uns.edu.ar - yamila.grassi@uns.edu.ar - fmiguel@unrn.edu.ar - gabriela.pesce@uns.edu.ar
mdiaz@plapiqui.edu.ar - mfrutos@uns.edu.ar

RESUMEN

La elaboración de la matriz Origen-Destino (matriz OD) es crucial para la toma de decisiones en la gestión del transporte urbano. Los sistemas de tarjetas inteligentes han revolucionado este proceso al permitir la acumulación de grandes cantidades de datos en tiempo real de manera estructurada. Sin embargo, esta disponibilidad también plantea desafíos significativos, como preocupaciones sobre acceso a la información, la privacidad de la información y la gestión de grandes volúmenes de datos. Este trabajo destaca las principales dificultades encontradas al utilizar la información de sistemas de tarjetas que solo registran el inicio del viaje, y presenta una propuesta específica para el caso de estudio de la ciudad de Bahía Blanca.

Palabras clave: OTROS MODELOS Y APLICACIONES DE IO - MOVILIDAD URBANA - TRANSPORTE PÚBLICO - MATRIZ ORIGEN-DESTINO

ABSTRACT

The construction of the Origin-Destination (OD matrix) matrix is crucial for decision-making in urban transport management. Smart card systems have revitalized this process by enabling the accumulation of large amounts of real-time data in an organized manner. However, this availability also presents significant challenges, such as concerns over information privacy and the management of large data volumes. This study highlights the main difficulties encountered in using information from card systems that only record the start of the journey and proposes a specific approach for the case study of Bahía Blanca city.

Keywords: OTHER MODELS AND APPLICATIONS OF OPERATIONS RESEARCH - URBAN MOBILITY - PUBLIC TRANSPORT - ORIGIN-DESTINY MATRIX

1. INTRODUCCIÓN: LA MOVILIDAD EN LAS CIUDADES ACTUALES

En la actualidad la gestión de la movilidad urbana presenta grandes desafíos, si bien la movilidad es clave para el desarrollo de las urbes, también conlleva impactos negativos como la contaminación atmosférica y acústica, la ocupación del espacio público, la congestión de las calles, la inequidad social, la inseguridad vial, entre otros (Mavlutova *et al.*, 2023). En este sentido, se puede considerar un sistema de movilidad urbana como

inteligente a aquel que logra disminuir los mencionados impactos, y equilibrar los tres pilares de la sustentabilidad: el económico, el social y el ambiental (Stjernborg y Mattisson, 2016). En línea con esto es sabido que, el transporte público de pasajeros trae consigo múltiples beneficios en una ciudad, como son la sostenibilidad medioambiental y la reducción del uso de combustibles fósiles, mediante el descenso de la cantidad de vehículos particulares; la disminución de la congestión y los accidentes viales; el incremento de la equidad social; la reducción del uso del espacio público; entre otros (Mohammed y Oke, 2023; Stjernborg y Mattisson, 2016). Si bien los beneficios son muchos, estos se corresponden con un sistema de transporte público eficiente y útil para la comunidad. De poco sirve contar con un servicio que no brinde soluciones a la necesidad de traslado eficiente para todos los miembros de una familia, ya que los ciudadanos buscarán resolver esto de otro modo. Es por ello que, resulta esencial analizar las diferentes variables que intervienen a la hora de diseñar, o rediseñar, un servicio de transporte público de pasajeros de calidad como, por ejemplo, las mencionadas por Ceder (2020): el tiempo de espera (frecuencias); el acceso a destino; la comodidad y seguridad del pasajero; las cuestiones medioambientales; todas estas balanceadas con las limitaciones presupuestarias de quien brinda el servicio y el usuario. Para estudiar estas variables en pos de mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, es necesario utilizar herramientas que permitan analizar los datos generados por el sistema de transporte, una de las más usadas es la matriz Origen-Destino (matriz OD). Esta herramienta juega un rol importante ya que, proporciona datos que permiten comprender los viajes urbanos que realizan las personas con la finalidad de realizar una buena gestión de asignación de recursos, así como también, optimizar el servicio. De esta manera, el conocimiento generado por la matriz OD facilita la planificación eficaz del sistema de transporte público de una ciudad, con la finalidad de satisfacer las necesidades actuales y emergentes de los pasajeros (Mohammed y Oke, 2023).

2. EL TRANSPORTE PÚBLICO EN LA CIUDAD DE BAHÍA BLANCA

La ciudad de Bahía Blanca es la cabecera del partido homónimo situada en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Es una urbe portuaria que cuenta con un importante desarrollo industrial, y que se considera como un nodo logístico estratégico del país. Además, es una ciudad de tamaño mediano debido a la cantidad de habitantes (~335000 en 2022), que ha tenido una expansión en superficie del 110% durante el periodo 1986-2014 (Ferrelli *et al.*, 2016) sin una adecuada planificación, lo que ha llevado a un aumento en los traslados en vehículo particular. Más aún, Bahía Blanca cuenta con un importante parque automotor (~0.57 vehículos por persona en 2018), el cual sigue creciendo (Grassi *et al.*, 2021). Asimismo, estudios previos presentaron que el automóvil particular es el principal vehículo que transita por las calles de la ciudad, con una preponderancia en el microcentro de la ciudad del 70% dentro del parque automotor circulante, calculado mediante conteo manual por observación directa de videos (Grassi y Díaz, 2024). Por otro lado, a partir de una encuesta ciudadana que considera todos los medios de transporte (incluida movilidad a pie), se pudo determinar que la participación del auto se encuentra por arriba del 40%, seguida por la movilidad a pie, el uso del colectivo (movilidad pública), la bicicleta y otros medios (Pesce *et al.*, 2024). Es por esta razón que resulta necesario contar con un sistema de transporte público de pasajeros lo suficientemente eficaz como para alentar el cambio de estilo de traslado y disminuir así el uso del vehículo particular. Entonces, se esperaría observar menor congestión del tránsito, menor contaminación del aire y acústica, mejorando así la calidad de vida de los ciudadanos.

De análisis previos de la movilidad pública en la ciudad de Bahía Blanca (Pesce *et al.*, 2023) se observa que el sistema de transporte de autobuses está compuesto por 18 líneas, 14 de las cuales operan exclusivamente dentro de la ciudad, mientras que las

líneas restantes brindan servicios interurbanos, conectando Bahía Blanca con las localidades de Ingeniero White, General Daniel Cerri y Cabildo. La red de autobuses cubre aproximadamente el 90% del área urbana de la ciudad. Cada línea de autobús extiende su cobertura en un radio de tres cuadras alrededor de su recorrido. El promedio anual de viajes en autobús es de 27 millones de pasajeros. La demanda del servicio de movilidad pública se centra primordialmente en los días de semana (86% aproximadamente de lunes a viernes), con tres significativos picos horarios de 7-8 h, 12-13 h y 17-18 h.

Estudios anteriores en la ciudad de Bahía Blanca (Pesce *et al.*, 2024) también indagaron sobre los determinantes que influyen en los diferentes tipos de movilidad: activa, pública y privada. En particular, encontraron que la propensión a utilizar la movilidad pública (autobús) se ve influenciada positivamente por el género femenino, el traslado por motivos de trabajo o estudio, la distancia a recorrer en el trayecto y el factor económico considerado en la decisión del medio de transporte a utilizar. Por el contrario, la probabilidad a moverse en autobús para el traslado se ve influenciada negativamente por la edad de las personas, la residencia en la zona del macrocentro de la ciudad, la propiedad de un automóvil, el número de viajes diarios y el tiempo del viaje como factor clave en la decisión de movilidad.

En la actualidad Bahía Blanca, no cuenta con una matriz OD específica para el transporte público, y habiendo ya expuesto las ventajas que genera contar con una, se plantea como principal objetivo de este trabajo, analizar posibles alternativas para la confección de una matriz OD para la ciudad.

3. REVISIÓN DE LA LITERATURA SOBRE LA CONFECCIÓN DE LA MATRIZ OD EN SISTEMAS DE SÓLO ENTRADA

La expansión del uso de tarjetas inteligentes para el transporte público en muchas ciudades no solo ha permitido agilizar muchas de las actividades de gestión de pagos, subsidios y personalización de los servicios de transporte público, sino que también ha provisto una enorme fuente de información que puede aprovecharse para estudiar la movilidad urbana. Entre los mayores productos que pueden generarse a partir de esta información se encuentra la confección de la matriz OD, el cual es un problema clásico del transporte público que pretende explicar los flujos de transporte de los ciudadanos en una ciudad y constituye un elemento central para el trazado de políticas públicas en el sector (Wang *et al.*, 2022). Si bien la disponibilidad de una gran cantidad de información a través del sistema de tarjetas inteligentes representa una oportunidad para obtener grandes cantidades de datos relevantes sobre el transporte en tiempo real, también ha planteado algunos desafíos para integrar dicha información de manera útil en los procesos de confección de las matrices OD. Estos desafíos se asocian a diversas cuestiones como, por ejemplo, la necesidad de mantener la privacidad de la información y el requerimiento de validar y analizar grandes cantidades de datos para integrarlos de manera eficiente en el proceso de toma de decisiones.

En este último aspecto, un problema recurrente en la mayoría de los sistemas de tarjetas inteligentes es que requieren que los pasajeros validen sus tarjetas al subir, pero no al bajar del transporte público. Por lo tanto, se puede determinar con precisión el origen de un viaje, pero se debe inferir el destino. Distintos autores de la literatura han propuesto distintas herramientas para realizar esta inferencia.

3.1. Estimación del lugar de comienzo de viaje

La mayoría de los estudios se han centrado en la inferencia de la ubicación del destino. Sin embargo, algunos de los sistemas también carecen de información sobre el lugar de comienzo del viaje (Hussain *et al.*, 2021). En un sistema de sólo entrada, la estimación de la parada de comienzo del viaje se puede dividir en tres casos. El primer

caso es cuando tanto la parada de comienzo como la hora están registradas en los datos; por lo tanto, se pueden utilizar directamente. El segundo caso es cuando la hora de comienzo del viaje está registrada, pero falta la información de la parada. En este caso, el campo requerido se puede inferir fusionando los datos de la tarjeta inteligente con otras fuentes de datos si están disponibles. Por lo general, es poco común encontrarse con el último caso de sistema de tarjetas inteligentes, donde ni la hora ni el lugar de comienzo del viaje están registrados. Sin embargo, existen algunos antecedentes de este tercer caso en la literatura (Hussain *et al.*, 2021). El caso de Bahía Blanca concuerda con la segunda tipología donde se registra la hora, pero no el lugar donde comienza el viaje. Por ende, es necesario cruzar la información con una segunda base de datos sobre la geolocalización de los autobuses.

3.2. Estimación del lugar de fin de viaje

En los sistemas de entrada no existe información sobre el fin del viaje. En general, la ubicación de desembarque se determina utilizando el método de encadenamiento de viajes, que se describe a continuación. En el método de encadenamiento de viajes, donde solo se conocen las ubicaciones de abordaje, las ubicaciones de desembarque se infieren a partir de la ubicación de abordaje del viaje sucesivo. Aquí, si encadenamos todos los abordajes del día del usuario de manera cíclica, entonces la ubicación de desembarque de un viaje debería estar espacialmente restringida a la ubicación de abordaje del viaje siguiente.

La mayoría de los investigadores han utilizado el método de encadenamiento de viajes para estimar la ubicación y/o el tiempo de fin de un viaje realizado en un sistema de solo entrada. El método de encadenamiento de viajes fue propuesto inicialmente por Barry *et al.* (2002), quienes recomendaron dos suposiciones para vincular los viajes realizados por un pasajero utilizando una tarjeta particular: i) un alto porcentaje de pasajeros comienza su próximo viaje cerca del punto de finalización del último viaje; ii) la estación de inicio del primer viaje del día y la estación de fin del último viaje del día son las mismas.

El primer supuesto también es conocido como la suposición de continuidad. Implica que un pasajero no optaría por otro modo de transporte durante sus viajes diarios, es decir, no usaría otros modos que no sean el transporte público. En otras palabras, para un pasajero, la parada de destino del viaje anterior puede encontrarse a una distancia peatonal asequible de la próxima parada de abordaje. Los valores umbral de distancia peatonal asequible utilizados por diferentes investigadores varían en un rango de 500 a 1000 metros (Hussain *et al.*, 2021). La suposición de continuidad reduce el número de paradas candidatas para la estimación de la parada de fin de viaje. El número de paradas candidatas se filtra aún más seleccionando solo aquellas paradas que están incluidas en los recorridos de la línea de transporte público abordada, facilitando así la identificación de la parada anterior de desembarque.

El segundo supuesto también es conocido como la suposición de simetría de viaje diario. Se puede entender por el hecho de que la parada de comienzo del primer viaje y la parada de fin del último viaje de un día generalmente están cerca de la residencia del pasajero. Según el estudio realizado por Barry *et al.* (2002) para la estimación de la matriz OD del metro, esta suposición se cumplió en hasta un 90% de los casos cuando se validó a través de un estudio de campo. En estudios posteriores, esta suposición se flexibiliza al afirmar que "la parada de inicio del primer viaje del día y la parada de fin del último viaje del día están cerca entre sí (es decir, dentro de algún radio de valor umbral)". Este concepto fue introducido por Trépanier *et al.* (2007) y posteriormente fue utilizado por muchos otros investigadores que trabajaron en el problema de estimación de la matriz OD principalmente relacionado con el transporte en autobús.

El principal inconveniente del método de encadenamiento de viajes es que no se puede inferir el destino de todas las transacciones que realicen sólo un viaje por día utilizando datos de tarjetas inteligentes de un solo día. Trépanier *et al.* (2007) utilizaron datos longitudinales de tarjetas inteligentes (datos de un mes) para minimizar el impacto de esta limitación. Ellos buscaron un número de tarjeta de entrada único en el día de análisis en otros días del mes. El destino era inferible si una tarjeta tenía una transacción similar (registros con la misma ruta y una diferencia mínima de tiempo de abordaje) dentro de todo el mes. Trépanier *et al.* (2007) afirmaron una inferencia exitosa del destino adicional del 13% de los titulares de tarjetas inteligentes que tenían una sola transacción en un día. Otros autores trabajaron sobre diferentes metodologías basadas en el historial de la persona en un lapso mayor a un día encontrando tasas exitosas de alrededor del 80% (Kumar *et al.*, 2018).

Para el caso de Bahía Blanca se propone utilizar la misma metodología con datos de las tarjetas inteligentes del transporte público, cruzados con bases de georreferenciación de los autobuses utilizados por el sistema en la ciudad (Miguel *et al.*, 2022). Los datos a analizar comprenden un año de transacciones de movilidad pública desde junio de 2023 a mayo de 2024, a partir de datos provistos por la Municipalidad de Bahía Blanca, mediante convenio específico de colaboración académica.

4. CONCLUSIONES

La movilidad urbana en Bahía Blanca presenta desafíos similares a otras ciudades de tamaño medio, con una alta dependencia del transporte privado y una necesidad de mejorar la eficiencia del transporte público. La construcción de una matriz Origen-Destino (matriz OD) específica para la ciudad representa una oportunidad única para comprender mejor los patrones de movilidad de los ciudadanos y, en consecuencia, diseñar políticas públicas más efectivas.

En este estudio se propone abordar la construcción de dicha matriz a partir de los datos de las tarjetas inteligentes del transporte público, cruzados con bases de georreferenciación de los autobuses utilizados por el sistema en la ciudad. Sin embargo, la ausencia de datos sobre el lugar de descenso del viaje plantea un desafío que se buscará superar mediante la aplicación de técnicas de inferencia, como el método de encadenamiento de viajes. Los resultados de este trabajo permitirán no solo contar con una herramienta fundamental para la planificación del transporte público, sino también sentar las bases para futuros estudios sobre movilidad urbana en la ciudad.

Actualmente, el equipo de investigación está enfocado en la fase de análisis y organización de los datos. Este trabajo preliminar es crucial para garantizar la calidad y la precisión de la información que se utilizará en el desarrollo de la matriz OD. La correcta configuración de las bases de datos es esencial para el éxito del estudio y para la posterior aplicación efectiva de las técnicas de inferencia.

REFERENCIAS

- BARRY J., NEWHOUSER R., RAHBEE A., SAYEDA S. (2002): "Origin and destination estimation in New York City with automated fare system data". *Transportation Research Record*, vol. 1817(1), pp. 183-187.
- CEDER A. (2020): "Urban mobility and public transport: future perspectives and review". *International Journal of Urban Sciences*, vol. 25(4), pp. 455-479.
- FERRELLI F., BUSTOS M., PICCOLO M. (2016): "La expansión urbana y sus impactos sobre el clima y la sociedad de la ciudad de Bahía Blanca, Argentina". *Estudios Geográficos*, vol. 77(281), pp. 469-489.

- GRASSI Y., BRIGNOLE N., DÍAZ M. (2021): "Vehicular fleet characterisation and assessment of the on-road mobile source emission inventory of a Latin American intermediate city". *Science of the Total Environment*, vol. 792, 148255.
- GRASSI Y., DÍAZ M. (2024): "Urban air pollution evaluation in downtown streets of a medium-sized Latin American city using AERMOD dispersion model". *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 196, 521.
- HUSSAIN E., BHASKAR A., CHUNG E. (2021): "Transit OD matrix estimation using smartcard data: Recent developments and future research challenges". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 125, 103044.
- KUMAR P., KHANI A., HE Q. (2018): "A robust method for estimating transit passenger trajectories using automated data". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 95, pp. 731-747.
- MAVLUTOVA I., ATSTAJA D., GRASIS J., KUZMINA J., UVAROVA I., ROGA D. (2023): "Urban transportation concept and sustainable urban mobility in smart cities: a review". *Energies*, vol. 16, 3585.
- MIGUEL F., ROSSIT D., FRUTOS M., CAVALLIN A. (2022): "An application of data mining to build the OD matrix in developing countries: An Argentinean case study". En: XXI Latin Ibero-American Conference on Operations Research CLAIO 2022. Buenos Aires.
- MOHAMMED M., OKE J. (2023): "Origin-destination inference in public transportation systems: A comprehensive review". *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 12, pp. 315-328.
- PESCE G., PEDRONI F., CHIACCHIARINI H., RIVERO M. (2024): "Urban mobility decisions: comparison of a university campus versus city results". En: 12th Annual International Conference on Sustainable Development (ICSD). Nueva York, EEUU.
- PESCE G., SABORIDO T., RIVERO M., PEDRONI F. (2023): "Public bus transportation analysis: a case study of sustainable mobility in Argentina". En: 11th Annual International Conference on Sustainable Development (ICSD). Nueva York, EEUU.
- STJERNBORG V., MATTISSON O. (2016): "The role of public transport in society: A case study of general policy documents in Sweden". *Sustainability*, vol. 8(11), 1120.
- TRÉPANIER M., TRANCHANT N., CHAPLEAU R. (2007): "Individual trip destination estimation in a transit smart card automated fare collection system". *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 11(1), pp. 1-14.
- WANG R., ZHANG X., LI N. (2022): "Zooming into mobility to understand cities: A review of mobility-driven urban studies". *Cities*, vol. 130, 103939.