

# Modelado Matemático y Simulación: Considerando el factor humano en el estudio de la demanda del transporte

Rodrigo René Cura<sup>1,2</sup>, Romina Stickar<sup>1</sup>, and Carlos E. Buckle<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Puerto Madryn, Argentina,

<sup>2</sup> Centro Nacional Patagónico (CENPAT-CONICET), Puerto Madryn, Argentina  
renecura@cenpat-conicet.gob.ar, romistickar@gmail.com,  
cbuckle@unpata.edu.ar

**Abstract.** El objetivo del presente trabajo es el planteo inicial para el desarrollo de un modelo general para la predicción de la respuesta de la comunidad a la modificación de políticas aplicadas a la planificación del transporte urbano. La intención principal de la estrategia de modelado aquí construida es la de darle un peso significativo al factor humano involucrado en los procesos de toma de decisiones en cuanto a la apropiación de los distintos medios. La investigación se lleva a cabo dentro del programa “Universidad y Transporte” de la Secretaría de Políticas Universitarias del Ministerio de Educación de la Nación.

**Keywords:** Movilidad, Transporte, Simulación social basada en agentes, Modelado basado en ecuaciones, Planeamiento urbano, Políticas públicas

## 1 Introducción

La movilidad urbana es uno de los problemas principales para las personas que viven en las áreas más desconectadas de las grandes ciudades, en el acceso a las centralidades urbanas en general. El crecimiento acelerado de las mismas no se ve acompañado, en muchos casos, con la debida planificación urbana. Esto provoca que la expansión de la cobertura de transporte público no sea consistente con las reales necesidades de la población afectada.

A su vez, el trazado de las líneas de los distintos modos de transporte y los horarios establecidos terminan reproduciendo las desigualdades urbanas de forma tal que una persona que vive en un punto periférico de la ciudad deba hacer uso de múltiples medios y afrontar un gasto de más del doble que una persona que vive en el centro.

A lo largo de los años se han realizado estudios y diseños que en muchos casos no alcanzaron sus objetivos pues no han considerado debidamente el factor humano, pues predecir la conducta de los potenciales usuarios del sistema de transporte es una tarea compleja y afecta de forma directa a la toma de decisiones en la planificación y a la estimación de la demanda. Además, se debe considerar la capacidad de apropiación y voluntad de las personas, sus competencias individuales y el acceso físico al medio.

Una estrategia recomendada para llevar adelante la planificación de aspectos urbanos como el transporte es modelar, esto es, intentar volcar el complejo escenario del transporte público dentro de una representación del mismo en función de las variables relevantes a estudiar, que puedan reflejar la realidad actual, para luego aplicar cambios y analizar el impacto de dichos cambios a futuro.

El abordaje de este tipo de soluciones necesariamente debe ser encarado desde lo interdisciplinar. Por un lado, con el aporte de las ciencias sociales, diagnosticando y analizando el contexto, la población involucrada y la cartografía del transporte, y por otro lado, el aporte de las ciencias exactas y de computación para la materialización de un modelo que refleje, lo más aproximado posible, la realidad a estudiar. Como se puede ver en [1], hay dos abordajes típicos para el modelado social, uno es el Modelado Matemático y el otro es la Simulación Social.

El presente trabajo propone el desarrollo de un modelo para la predicción del comportamiento de la población respecto del uso del transporte urbano, en el cual se dará un peso significativo al factor humano. Para ello, en la siguiente sección se presentarán dos posibilidades de modelado. Luego en la sección 2 se describirá el estado del arte respecto del modelado de transporte público y se presentará la estrategia de modelado seleccionada. En la sección 3 se presentará el caso de estudio sobre la ciudad de Puerto Madryn - Chubut - Argentina. A partir de la sección 4 se presentará el modelo propuesto y en la sección 7 se presentan las conclusiones del trabajo.

### 1.1 Modelado matemático

Un modelo es una representación matemática simplificada de una realidad compleja. Modelar es la acción de construir un modelo, ajustado a la realidad, que implica una relación entre dos figuras, no necesariamente encarnadas por personas únicas sino por equipos. La primera de estas figuras es el modelador, encargado de la especificación y desarrollo del modelo. La segunda es el experto sobre la realidad, conocedor del sistema real y lo que es necesario resolver.

Es normal que el desarrollo de un modelo involucre a un equipo multidisciplinar compuesto por matemáticos, estadísticos, ingenieros, economistas, psicólogos, etc. que aportan diferentes perspectivas y conocimiento en la representación. Es también requerido que un modelo debe equilibrar la necesidad de contemplar todos los detalles con la factibilidad de encontrar técnicas de solución adecuadas y es, en definitiva, una herramienta de ayuda a la toma de decisiones, por esta razón, sus resultados deben ser inteligibles y útiles.

Desde la perspectiva matemática, debe contar con las siguientes cualidades:

- Coherencia, es decir, tiene que dar cuenta de todo lo observado y permitir prever el comportamiento futuro del fenómeno.
- Generalidad, dentro de ciertos límites previamente establecidos.
- Robustez, al tener la capacidad de responder a los cambios de valores en los parámetros sin errores.
- Flexibilidad, en el sentido de que pueda ser cambiado y adaptado a nuevas situaciones.

## 1.2 Simulación social

La simulación computacional es un intento de modelar situaciones de la vida real por medio de un programa de computadora, un método de carácter complementario y muchas veces alternativo a los modos convencionales de investigación, el experimental y el teórico, ha ejercido un fuerte impacto en prácticamente todos los campos de la ciencia. El objetivo de la simulación es resolver los modelos teóricos en su total complejidad, mediante la resolución numérica de las ecuaciones involucradas, haciendo uso intensivo, y extensivo, de computadoras.

Una técnica de simulación que ha tomado fuerza en los últimos años, en particular en los campos relacionados a las ciencias sociales y humanas, es el uso de sistemas multi-agente como herramienta experimental, donde los agentes son utilizados para simular el comportamiento de sociedades humanas [2–4]. Además, cada agente individual puede ser usado para representar personas individuales o, alternativamente, para representar organizaciones o entidades similares [5]. En general, la simulación es un enfoque apropiado para tratar con sistemas altamente complejos y caóticos, sobre todo cuando se trata con gran cantidad de variables desconocidas y se pretenden estudiar procesos emergentes, ya que acepta y ataca directamente el "desorden" [5]. En particular, en la simulación basada en agentes, en [6] se destacan los siguientes beneficios de la aplicación de esta tecnología a los procesos sociales:

- Permite la observación de propiedades que en principio pueden ser analíticamente derivables pero no han sido aún establecidas.
- Posibles alternativas a fenómenos observados pueden ser encontradas.
- Condiciones que son incómodas o imposibles de observar o reproducir pueden ser estudiadas a gusto en aislamiento, grabadas y luego "reproducidas" si es necesario.
- La "socialidad" puede ser modelada explícitamente.

En particular, relacionado a sistemas multi-agente en [4] se hace notar que para muchos sistemas el comportamiento no puede ser predicho por análisis estadísticos o cualitativos, entonces analizar o diseñar dichos sistemas requieren una aproximación diferente a métodos más tradicionales como la ingeniería de software.

## 2 Estado del arte

El proceso de generación de información sobre un sistema de transporte público urbano implica un gran desafío e involucra a un equipo de expertos de diferentes disciplinas. Un método tradicional que se utiliza para obtener información es el que se basa en las matrices Origen - Destino (OD). Estas matrices recopilan el origen y destino de numerosos viajes ocurridos en los distintos modos de transporte, aunque en ocasiones se concentran en un único modo e ignora la disponibilidad de una red de transporte multi-modo [7]. Este método pone énfasis en los viajes y la información recopilada cubre sólo una parte de la demanda real

del transporte, es decir, se refiere solo a los viajes efectivamente realizados. La falla del modelo en general se debe a que no considera la conducta irracional del ser humano [8].

Debido a que la ingeniería de transporte centrada solo en el desplazamiento no es suficiente se empiezan a estudiar métodos que ponen al individuo como protagonista. Surge el concepto de "movilidad", que tiene que ver con la capacidad de las personas para moverse en el espacio geográfico y social [9]. Esta idea esta respaldada en [10] donde se plantea que en la ciudad moderna resulta difícil capturar o modelar los límites entre las actividades laborales y de recreación.

Es posible identificar cuatro tipos de modelos urbanos [11], los cuales dependen de la escala temporal de la tasa de cambio:

- **Cambio lento:** Modelos de la infraestructura de red de la ciudad, como el transporte, el uso de la energía y de la tierra.
- **Cambio medio:** Modelos de los edificios de la ciudad.
- **Cambio rápido:** Modelos en base a la vivienda y al empleo de la ciudad.
- **Cambio inmediato:** Modelos del transporte y las actividades de la población de la ciudad.

Cuando se orienta el modelado hacia la planificación es preciso trabajar en una escala a largo plazo (cambio lento) entonces es necesario un modelo predictivo del sistema. En [12] se establece el siguiente conjunto de requerimientos para un motor de predicción:

- Usabilidad
- Eficiencia computacional
- Precisión predictiva

## 2.1 Abordaje seleccionado y su justificación

Puede verse como una ventaja de la simulación social basada en agentes, sobre el modelado matemático, que esta pueda ser estudiada como una metáfora natural del sistema a modelar. En el contexto transdisciplinario del proyecto esto facilita la comunicación entre los especialistas de las diferentes áreas involucradas, permitiendo que los científicos sociales puedan realizar y observar el impacto de su aporte en el modelo, mientras que un modelo matemático puro requiere de un nivel de formación mínima en el área para la comprensión completa del mismo. En particular, la conformación del grupo de trabajo cuenta con un grupo de investigadores sociales que ya han tenido un primer contacto con los sistemas multi-agente.

Es por este motivo que el abordaje elegido para el modelado del sistema es la simulación social basada en agentes. Aún así, es preciso destacar que el modelo general conserva componentes en la que se deben representar variables en forma completamente matemática, los cuales serán abordadas con herramientas propias de las ciencias de la computación.

### 3 Caso de estudio

El caso de estudio elegido, es el del sistema de transporte público de la ciudad de Puerto Madryn, ubicada al noreste de la provincia de Chubut. La ciudad tiene una población de aproximadamente 94.000 habitantes. Es una de las ciudades de mayor crecimiento urbano y demográfico relativo del país, ya que en 1970 contaba con 6.000 habitantes. Este crecimiento explosivo y la falta de planificación generó una dispersión demasiado grande para una ciudad intermedia, además, este hecho repercutió a su vez en el "rediseño" del transporte público que no se adaptó de forma adecuada debido a una gestión aislada del desarrollo urbano.

El sistema de transporte público que opera en la actualidad, consta de 6 líneas operadas por una empresa privada. La frecuencia de colectivos es de 20 minutos. La mayoría de los usuarios de este medio de transporte son estudiantes y personas de edad avanzada, aunque en horarios pico hay una importante utilización del mismo por parte de personas que se trasladan hacia y desde sus lugares de trabajo.

El enfoque principal de este proyecto está orientado al diagnóstico del acceso de los estudiantes a las casas de estudio de nivel superior (ej. Universidades).

### 4 Modelo general

En general, los modelos de transporte tienen como objetivo capturar las relaciones entre la oferta y la demanda y asistir a la planificación en la búsqueda de un equilibrio entre las mismas al intentar satisfacer un nivel de demanda  $\mathbf{D}$ .

En términos muy generales un sistema de transporte se puede definir como las siguientes interacciones:

Considérese un conjunto de volúmenes de tráfico sobre la red  $\mathbf{V}$ , una velocidad  $\mathbf{S}$ , el conjunto de capacidades de operación  $\mathbf{Q}$  y un sistema de gestión  $\mathbf{M}$ , entonces se obtiene:

$$S = f(Q, V, M) \quad (1)$$

En este caso, la velocidad  $\mathbf{S}$  es considerada como una primera aproximación al nivel de servicio  $\mathbf{LOS}$ , dado por la suma de tiempo de viaje, tiempos de espera, tiempo/distancia de caminata y precio.

Por otra parte, la capacidad  $\mathbf{Q}$  depende del sistema de gestión  $\mathbf{M}$  y los niveles de inversión  $\mathbf{I}$  a lo largo del tiempo:

$$Q = f(I, M) \quad (2)$$

Finalmente, en un entorno urbano se tiene una distribución espacial de las actividades  $\mathbf{A}$ , que permite estimar la demanda de la siguiente forma:

$$D = f(S, A) \quad (3)$$

Combinando 1 y 3 es posible obtener un conjunto de puntos de equilibrio entre la oferta y la demanda para un sistema de actividades fijo, pero al variar el

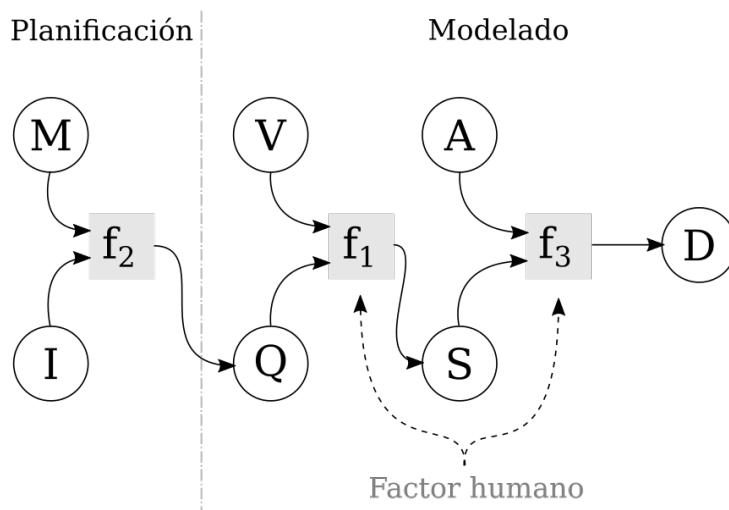
nivel de servicio el conjunto de actividades probablemente cambiará, definiendo otros puntos de equilibrio a corto y largo plazo.

El objetivo de la *planificación* es prever y gestionar la evolución de estos cambios en los puntos de equilibrio y es objetivo de la *modelización* de estos puntos de equilibrio ayudar a la comprensión de esta variación para que la planificación optimice las estrategias de gestión **M** y los programas de inversión **I** [13].

Si bien este tipo de aproximación es ampliamente utilizada, tiene la necesidad de un alto nivel de análisis y estimación de las variables, además de un gran esfuerzo en la construcción de las funciones que las procesan. En este punto de abstracción es donde los modelos pierden la noción del factor humano, en particular a nivel individual, el cual pierde peso significativo en la representación final [13].

## 5 Simulación aplicada al modelo general

El desarrollo de nuestro proyecto se enfoca en el modelado del sistema de transporte para proveer a la planificación de una plataforma experimental con el fin de asistir a la creación o modificación de políticas. El siguiente gráfico muestra las dos etapas Planificación y Modelado. La primera estará a cargo de las partes interesadas, que facilitarán la información necesaria para alimentar el modelo. A su vez las variables relevantes al modelado (**V** y **A**) serán estudiadas en el marco del proyecto por los investigadores de las ciencias sociales. La simulación estará centrada en las ecuaciones 1 y 3 teniendo en cuenta que la variable **S** estará contenida en el proceso.



**Fig. 1.** Diagrama de modelo general donde se indica la inclusión del factor humano.

Al utilizar simulación basada en agentes en estos componentes del sistema permite reflejar a nivel individual el comportamiento de los usuarios, lo cual incorporará directamente el factor humano al modelo. Sin embargo, según [1] el modelado basado en ecuaciones y el basado en agentes se enfocan a nivel macro y micro respectivamente, cada uno con sus fortalezas y debilidades. Particularmente, el modelado basado en agentes presenta problemas de escalabilidad. En [12] se sugiere un nivel intermedio en el que se utilice una solución híbrida entre agentes y ecuaciones para mejorar la respuesta del modelo ante este problema. Esto último valida el camino elegido para la modelización.

## 6 Líneas de investigación y desarrollo

Esta línea de investigación está orientada a generar una plataforma de simulación social basada en agentes con el fin de analizar variables sociales, demográficas, económicas y laborales de la ciudad, primando su impacto en las decisiones de las personas. También se propone vincular este factor humano con un modelo del transporte más tradicional que posibilite estudiar en forma experimental nuevas propuestas de planificación y prever los resultados de la implementación de las mismas.

## 7 Conclusiones y futuros trabajos

La propuesta de modelado presentada ha sido formulada a partir de un trabajo interdisciplinario entre investigadores de ciencias de la computación y de ciencias sociales. Se han evaluado plataformas prototipo que han demostrado la viabilidad del proyecto. Es posible desarrollar una simulación social que permita dar apoyo a las decisiones de política pública inherentes al transporte. En lo que sigue, los investigadores de las ciencias sociales realizarán una caracterización residencial de la desigualdad local. Este antecedente y la cartografía del transporte local servirán como contexto para diagnosticar sobre el caso de estudio, referido a las formas de acceso de los estudiantes a las instituciones de educación superior. Paralelamente se avanzará con la generación de una plataforma para la simulación social basada en agentes, que permita modelar la realidad de la población y el transporte. Finalmente, se dotará al modelo con los factores humanos para avanzar sobre una intensa batería de pruebas que permitan ajustar el modelo. Alcanzado este objetivo, será posible plantear propuestas de políticas públicas inclusivas a partir de los resultados de la simulación.

## References

1. H Van Dyke Parunak, Robert Savit, and Rick L Riolo. Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling: A Case Study and Users' Guide. pages 10–25, 1998.
2. Nigel Gilbert. Simulation: an emergent perspective. *conference on New Technologies in the Social Sciences*, pages 27–29, 1995.

3. Nigel Gilbert and Jim Doran. *Simulating societies*. UCL Press, 1995.
4. Emma Norling, Liz Sonenberg, and Ralph Rönquist. Enhancing multi-agent based simulation with human-like decision making strategies. In *Multi-Agent-Based Simulation*, pages 214–228. Springer, 2001.
5. Michael Wooldridge. *An Introduction to MultiAgent Systems*. Wiley, 2009.
6. Nigel Gilbert and Rosaria Conte. *Artificial Societies: the computer simulation of social life*. 1995.
7. Torgil Abrahamsson and Others. Estimation of origin-destination matrices using traffic counts—a literature survey. *IIASA Interim Report IR-98-021/May*, 27:76, 1998.
8. Diego Hernández and Regina Witter. Entre la ingeniería y la antropología: hacia un sistema de indicadores integrado sobre transporte público y movilidad. *Revista transporte y territorio*, (4):29–46, 2011.
9. Michael Flamm and Vincent Kaufmann. Operationalising the Concept of Motility: A Qualitative Study. *Mobilities*, 1(2):167–189, 2006.
10. Anthony M. Townsend. Life in the Real-Time City: Mobile Telephones and Urban Metabolism. *Journal of Urban Technology*, 7(2):85–104, 2000.
11. Michael Wegener. Operational urban models state of the art. *Journal of the American Planning Association*, 60(1):17–29, 1994.
12. Paul Davidsson, Marie Gustafsson Friberger, Niklas Lavesson, and Jan A Persson. Towards a Prediction Model for People Movements in Urban Areas. 2013.
13. J De Dios Ortúzar and Lg Willumsen. *Modelos de transporte*. Vasa, 2008.