

Movilidad cotidiana: efectos del entorno construido en la elección del modo de transporte en Montevideo.

Joselina Davyt¹

RESUMEN

La modelización de la elección modal es fundamental para generar políticas públicas que transformen la cotidianeidad urbana, mejoren la sustentabilidad del sistema de transporte, proporcionen mayor eficiencia, calidad y accesibilidad. El objetivo general del trabajo es encontrar elementos que permitan apoyar la integración de políticas de planificación en transporte y ordenamiento territorial respecto a la movilidad cotidiana de Montevideo. Se considera que la forma de la ciudad define el contexto de residencia de las personas, las zonas de destino y origen de los viajes y restringen las opciones de movilidad de los mismos. La principal conclusión es que la elección del modo de viaje no sólo se encuentra determinada por características sociodemográficas de los individuos y por atributos propios del viaje, sino también por la heterogeneidad a nivel de la zona de residencia. La heterogeneidad de densidad poblacional y cantidad de paradas de transporte público por zona afecta la probabilidad promedio de elegir un modo de transporte. Se planteó una metodología de análisis empírica, de carácter cuantitativo, mediante el uso de modelos multinivel, para identificar variables que afecten a la elección del modo de viaje. Asimismo se procura establecer la variabilidad que comprende al nivel de los individuos y la variabilidad a nivel de las localidades.

Palabras claves: Economía urbana, Economía del transporte, Elección modal, Modelos multinivel

1. Introducción

La ciudad constituye un territorio complejo definido como un espacio urbano, en el sentido de que cierta estructura y ciertas actividades se pueden encontrar en ellas y no otras. La movilidad cotidiana, a través del transporte, juega un rol importante en el desarrollo urbano, provee acceso a las personas a educación, empleo, recreación, salud y otros servicios claves para el bienestar individual y colectivo; las ciudades que tienen mayor nivel de calidad de vida generalmente tienen alta calidad de transporte urbano. En muchos de los países en desarrollo los sistemas de transporte urbano aún tienen largo camino por recorrer para generar servicios de transporte público accesible y asequible e infraestructura de calidad para el transporte no motorizado. Asimismo, el vehículo privado predomina y está en continuo crecimiento, como resultado el sector de transporte es responsable de importantes externalidades negativas. En Uruguay, dicha realidad no es ajena, se caracteriza por ser un país macroencefálico con alta concentración de la población en la capital predominantemente por un proceso de emigración interna y por condiciones históricas.

El sector transporte, por otro lado, es uno de los que demanda mayor consumo de energía en la actualidad y del cual también se espera un gran crecimiento. Debido a su estrecha relación con la actividad productiva y al crecimiento del ingreso, y al supuesto de que los países en desarrollo

¹ Grupo de Investigación en Dinámica Económica, Departamento de Métodos Matemático Cuantitativo, Facultad de Ciencias Económicas y de Administración, Udelar.

van a continuar creciendo. En Uruguay el consumo de energía del transporte ha representado alrededor del 30% del consumo final de energía de Uruguay, primando el uso de combustibles fósiles. Asimismo el parque automotor ha tenido un importante crecimiento en los últimos 20 años, destacándose el crecimiento de autos y camionetas y motos y ciclomotores. El transporte, y en particular a través del automóvil privado, causa diferentes efectos externos (externalidades), es decir, componentes que no forman parte del proceso de decisión del pasajero/viajero e imponen costos (beneficios) sobre la sociedad y el medio ambiente, como ser: accidentes, contaminación del aire, cambio climático, ruidos, congestión, efectos salud y efectos ecosistémicos (Van Wee y Meurs, 2003, Verhoef, 1994). Algunos autores identifican que la dispersión urbana de las ciudades ha acompañado los procesos de dependencia del automóvil y de demanda de energía de combustibles, al aumentar la distancia de los desplazamientos² (Camagni et al., 2002). La dispersión urbana intensifica el uso del automóvil privado ya que por la baja densidad la demanda de transporte no puede ser totalmente atendida por servicios e infraestructuras de transporte público.

La relación entre la forma urbana (o bien, entorno construido) y los patrones de movilidad es un campo de investigación crucial en el debate del desarrollo urbano sustentable. Es uno de los elementos centrales en las políticas de planificación dirigidas a reducir el viaje en automóvil y las emisiones GEI con perspectiva de largo plazo, principalmente por sus efectos sobre el consumo de recursos energéticos, la demanda de petróleo, externalidades sobre el medio ambiente, y la segregación y exclusión urbana, entre otros efectos externos (Boarnet y Crane, 2000). Asimismo las políticas de transporte urbano afectan considerablemente el entorno y forma urbana, y a las políticas públicas relacionadas, por lo que la integración de las políticas es un elemento clave para avanzar en el desarrollo y bienestar urbano. Dicha integración es escasa y confusa en la realidad montevideana, pues envuelve competencias administrativas y regulación del mercado inmobiliario.

Ahora bien, ¿que entendemos por forma urbana y patrones de movilidad? La forma urbana es a menudo representada por la densidad poblacional, la diversidad de uso del suelo y la accesibilidad al tránsito (Zahabi et al, 2013). También se plasma a través de los conceptos de entorno construido, características de los barrios, etc. Los patrones de movilidad urbana son representados por la distancia de viaje, el modo elegido (auto, ómnibus, bicicleta, etc), el tiempo de viaje, los cuales en ciertos aspectos son indicadores de la demanda de transporte de pasajeros. La consecuente justificación del análisis de la forma urbana y los patrones de movilidad es la eficiencia del uso de recursos en diferentes formas urbanas, la cual está sujeta a grandes variaciones con referencia a dos recursos escasos, fundamentalmente, la tierra (para usos residenciales) y los recursos energéticos (por movilidad); y que sugiere la necesidad de coordinación de políticas en dichos aspectos. El consumo de tierra depende directamente de la relativa compactibilidad de los asentamientos humanos y de la densidad residencial; el consumo de energía, por el otro lado, depende indirectamente de las mismas variables, a través de su relación con los patrones de movilidad (Camagni et al., 2002). En el mismo sentido, considerar la coordinación de las políticas de transporte urbano y de uso del suelo y ordenamiento territorial conlleva a potenciales beneficios económicos, sociales y medioambientales. Las características particulares de los procesos de desarrollo en Uruguay y particularmente en Montevideo suponen grandes desafíos académicos y políticos que llevan a la necesidad de preguntarse en primera instancia como es la relación entre el transporte urbano y la forma

²“Entendiendo por dispersión urbana un modelo de crecimiento espacial que se caracteriza por su baja densidad, un elevado porcentaje de vivienda unifamiliar y un intenso proceso de ocupación de suelo bajo un patrón fragmentario y discontinuo” (Sanchez, 2012).

urbano, y concretamente desde el enfoque a la demanda la relación entre los patrones de movilidad de personas y el entorno urbano de la ciudad de Montevideo, (Cervero, 2013).

Por otro lado, la influencia de la forma urbana en el transporte es difícil de establecer teórica y empíricamente, buscar respuestas a dicha relación requiere afirmar la complejidad del asunto y enfocarse en analizar las particularidades de diversas áreas urbanas. Cervero (2013) nos advierte de la necesidad de contextualizar las investigaciones en dicha relación, pues los desafíos de movilidad de los países en desarrollo son bien diferentes de los de los países más desarrollados. Paralelamente, los desarrollos teóricos y empíricos con foco en las realidades latinoamericanas son insuficientes.

El problema que se pretende abordar se introduce entre dos enfoques: 1) los que intentan explicar los desencadenantes de la movilidad de los individuos, 2) y los enfoques que intentan explicar las teorías de localización y de uso del suelo. Qué según el ciclo de retroalimentación de transporte y uso del suelo representarían a procesos con distintas velocidades de cambio (Wegener, 1999).

La movilidad en términos generales refiere a los desplazamientos que personas o mercancías realizan en un determinado ámbito socioeconómico, incluye el espacio y tiempo en que se realizan los desplazamientos, los motivos y el modo utilizado. Lo que se sugiere es que podemos pensar en dos unidades de análisis dentro de un mismo problema, el individuo por un lado, y su entorno espacial. Un entorno dinámico y lento, construido por fuerzas de aglomeración y dispersión, por la complejidad de decisiones individuales y gubernamentales en un proceso histórico y marcos institucionales.

El presente documento busca generar conocimiento acerca de los determinantes de la elección modal en la movilidad cotidiana, enfocándose en la ciudad de Montevideo. El principal objetivo es discriminar los factores del entorno construido, de los socioeconómicos y de los atributos del viaje, con respecto a cuatro alternativas: vehículo privado, transporte público, transporte no motorizado y otros. A fines de ello se utiliza, por un lado, la última encuesta de origen-destino disponible de Montevideo. Y por el otro, información geo-referenciada de la ciudad de Montevideo, proveniente de GIS de la Intendencia de Montevideo. El enfoque de análisis considera la heterogeneidad espacial a través de modelos multinivel que toman en cuenta la variabilidad del individuo y de la zona de residencia.

En la sección contigua se revisa la literatura previa. En la sección 3 se presenta el marco teórico de análisis, en la cuarta los datos, variables y fuentes de datos. En la sección quinta los resultados obtenidos. Y finalmente en la sección sexta las conclusiones arribadas a través de las distintas modelizaciones y variables consideradas.

2. Antecedentes

El propósito de este apartado es revisar y resumir la literatura considerada respecto a la conexión entre la forma urbana y los patrones de movilidad, y repasar las políticas de los gobiernos locales de Uruguay y del gobierno central. Es importante destacar que la literatura presentada se establece conforme a los objetivos de investigación, ciertamente existe una vasta literatura referente a las relaciones entre la movilidad y la forma urbana.

El Plan Nacional de Eficiencia Energética del Gobierno Central de Uruguay considera al sector transporte como un sector clave para disminuir la cantidad de energía necesaria en unidad por producto o servicio, manteniendo la misma calidad. En abril del año 2014 se conformó el Grupo Interinstitucional de Eficiencia Energética en el Transporte³. Las líneas de trabajo gubernamentales más destacadas han sido sobre: caracterización del parque vehicular y la penetración de tecnologías eficientes, realizar pruebas con distintas tecnologías, programa de etiquetado vehicular y cursos de técnicas de conducción eficiente. La Intendencia de Montevideo también mantiene objetivos –establecidos en el Plan de Movilidad Urbana- en materia de eficiencia energética: mejorar la eficiencia (en sentido general) del sistema de transporte y reducir el uso de vehículos particulares, promoviendo el estudio de una nueva matriz energética en transporte. El enfoque central de la eficiencia energética en transporte por los distintos planes gubernamentales está en el cambio tecnológico, a grandes rasgos referente a la modificación de las tecnologías de vehículos particulares y colectivos, en la optimización de la red vial y en la mejora del transporte público como incentivo para reducir el uso del vehículo privado.

Políticas concretas destinadas a reducir el uso del automóvil no han sido determinadas por el gobierno central ni por los gobiernos locales de Uruguay. Asimismo están tímidamente esbozados enfoques sobre la decisión de movilidad de las personas y cómo afecta la estructura urbana en dichas decisiones. Por otra parte, prácticamente no existen estudios que analicen cómo afecta la forma urbana a los patrones de movilidad de Montevideo, y que analicen las externalidades socioambientales. El estudio titulado “*Políticas de tiempo, movilidad y transporte público: rasgos básicos, equidad social y de género*” de **Hernández (2012)** con apoyo de la Intendencia de Montevideo y PNUD Uruguay, se enfoca en parámetros e indicadores sobre bienestar y equidad de la movilidad de Montevideo y realiza un análisis descriptivo de la situación respecto a quiénes viajan, cómo viajan y con qué propósito. La dimensión sobre sustentabilidad ambiental y uso eficiente de la energía no fue eje de dicho trabajo, pero sí reconoce la importancia del proceso de motorización en cuanto a parámetros de sustentabilidad ambiental, y el papel del transporte público como promesa para minimizar dicho proceso.

Sin embargo, si existen estudios teóricos y casos de estudios concretos para distintas ciudades y localidades a nivel internacional que toman en cuenta las características de los individuos, los hogares y la forma urbana, para explicar los patrones de movilidad urbana y/o consumo de energía en transporte. Es necesario tener en cuenta que los autores utilizan indistintamente los conceptos de forma urbana, entorno construido, estructura urbana y características de las zonas de residencia, por lo que es evidente considerarlos como conceptos equivalentes, puesto que las variables que utilizan para definirlo son a grandes rasgos similares.

Kim y Wang (2015) destacan la importancia de las características urbanas del lugar de residencia de las personas, que definen la forma o estructuras de asentamientos urbanos, como restricciones de las decisiones individuales de movilidad urbana. En otras palabras, la decisión individual en la elección de la forma de viaje urbano (o bien entendido como patrones de movilidad urbana) es a menudo influenciada por el contexto del barrio de residencia, debido a que los individuos encuentran ciertas restricciones para realizar sus decisiones de viajes. Su estudio empírico aplica métodos multinivel para analizar la elección modal, la cantidad de viajes realizados, la distancia de viaje, y el tiempo de viaje. La creciente dependencia del

³Integrado por representantes del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO); el Mvotma, a través de la Dirección Nacional de Medio Ambiente (Dinama); UTE; la Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland (Ancap); la Intendencia de Montevideo (IM); y el MIEM.

vehículo privado forma parte de uno de los debates principales de eficiencia energética y ciudades sustentables, **Kim y Wang (2015)** analizan los determinantes de la elección del automóvil privado como modo de transporte frente a los demás modos. Sus resultados indican que los patrones de movilidad son influenciados tanto por las características individuales como por las características de la zona de residencia. A modo ilustrativo, encuentran evidencia empírica respecto a que: indicadores sobre accesibilidad explican la variación de modos entre las zonas de residencia, la distancia de viaje varía ampliamente entre zonas de residencias; aunque no encuentran efecto del uso del suelo en los patrones de movilidad. Sus estudios apoyan la hipótesis de que las millas recorridas por vehículo, uno de los más importantes indicadores de polución ambiental y eficiencia energética, son influenciadas tanto por los comportamientos individuales como por los contextos residenciales.

Zahabi et al. (2012) analizan el impacto de la forma urbana, la oferta de transporte público y los precios de aparcamiento en la elección del modo de viaje de los pasajeros que viven cerca de líneas ferroviarias, en la región de Montreal (Canadá). Al igual que **Kim y Wang (2015)** consideran que el modo de transporte elegido por el pasajero se encuentra directamente influenciado por las características de la zona de residencia del individuo, también definida como forma urbana. Las variables que utilizan para definir la forma urbana son la densidad poblacional y la densidad de empleo. Por otro lado, consideran relevante las características de los hogares, como el número de vehículos por hogar, número de personas, número de niños, ingreso y número de trabajadores; nivel de agregación que **Kim y Wang (2015)** no utilizaron. Enfocados en dos modos de transporte: transporte privado (automóvil) y transporte público, **Zahabi et al. (2012)**, a diferencia de **Kim y Wang (2015)**, utilizaron metodologías estadísticas de ecuaciones simultáneas, ya que consideran relevante el efecto de auto-selección residencial, es decir, que la elección del lugar de residencia y la elección del modo de viaje pueden ser consideradas como decisiones endógenas. Encuentran evidencia de que el tipo de barrio (o zona de residencia) juega un rol importante en la elección modal, cada tipo de barrio definido como clúster es atribuido a distintos tipos de forma urbana. Asimismo encuentran que los atributos socioeconómicos de los individuos representan factores importantes en cuanto a la elección modal de los individuos. **Browstone y Golob (2009)** también subrayan la característica de endogeneidad entre patrones de movilidad urbana y decisiones de localización residencial, al igual que **Zahabi et al. (2012)** plantean un modelo de ecuaciones simultáneas. Su objetivo es determinar las relaciones entre las millas conducidas por vehículo (totales anuales por hogar), el uso de combustible y las viviendas por millas cuadradas, controlando por variables sociodemográficas a nivel del hogar (vehículos por hogar, ingreso del hogar, número de niños, etc.). Encuentran que la densidad influye directamente en el uso vehicular y que tanto el uso vehicular como la densidad influyen el consumo de combustible.

Holden y Norland (2005) analizan la influencia de distintas variables en el consumo anual de energía por hogar per capita (de la vivienda y por transporte), con las siguientes particularidades: toman en consideración características de la estructura urbana y de la estructura de la vivienda, definen diferentes tipos de hogares (según su composición) y consideran características socioeconómicas de los individuos. Realizan un análisis multivariado a través de datos que corresponden a un cuestionario que enviaron de forma aleatoria a 2500 individuos. El objetivo de dichos autores es plantear los desafíos de una ciudad compacta respecto al consumo de energía tanto en transporte por hogar como en el consumo de energía en vivienda. La literatura sobre las relaciones entre transporte, estructura urbana y consumo energético entrama relaciones complejas, **Boarnet y Crane (2001)** nos advierten que las proxies sobre estructura urbana generalmente usadas, como densidad de población, pueden resultar confusas. En el sentido de que no es tan evidente los efectos demográficos sobre la

forma urbana, y que pueden existir relaciones de endogeneidad entre un barrio denso y el nivel de ingreso. Las arduas críticas y discusiones sobre la pertinencia de la densidad de población como una de las variables que definen la estructura de la ciudad, de modo tal que se pueden definir ciudad compactas, monocéntricas, policéntricas, etc., se presentan entorno a los resultados del estudio de **Newman y Kenworthy (1989)**. Dichos autores analizan la relación entre la densidad de población y el consumo de gasolina de ciudades asiáticas, europeas y norteamericanas. A diferencia de los enfoques anteriores, el análisis Newman y Kenworthy es en términos agregados, es decir, comparan patrones entre distintas ciudades o regiones. Por el otro lado, los estudios de Kim y Wang (2015), E. Holden y I.T. Norland (2005), Zahabi et al. (2012) y Browstone, D. y Golob T. F. (2008) son análisis desagregados ya que incluyen micro-datos a nivel de las personas.

Los estudios antes mencionados apoyan el argumento de que el entorno construido juega un papel más que importante sobre los patrones de movilidad urbana.

3. Marco de análisis: teoría de la utilidad esperada, enfoque espacio-tiempo y análisis multinivel

La teoría de la utilidad aleatoria nos brinda un marco sólido para comprender el comportamiento a nivel individual y para considerar distintas fuentes de heterogeneidad. Asume que el individuo tiene perfecta capacidad de discriminación pero que sin embargo el analista no tiene información completa.

El enfoque de tiempo y espacio de Hagerstrand nos impone como problemática la necesidad de considerar las heterogeneidades tiempo-espacio al considerar un análisis urbano. En términos estadísticos la heterogeneidad espacial puede llevar a estimaciones insesgadas, lo cual recibe importante atención en el análisis urbano. Las características diferenciadas en cuanto al entorno construido de la zona de residencia del viajero es una forma de presentar la heterogeneidad espacial.

El análisis multinivel nos permite a nivel empírico manejar la heterogeneidad espacial, las características de las alternativas y el marco de forma de decisión individual desde la teoría de la utilidad esperada. Ha sido propuesto en investigaciones geográficas para modelar la heterogeneidad espacial (Páez y Scott, 2005; Jones, 1991; Duncan and Jones, 2000), puesto que permite definir en una primera jerarquía las observaciones a nivel individual, y en una segunda jerarquía a nivel de las zonas de residencia. Los modelos multinivel permiten capturar la variación no sistemática del análisis empírico por dos términos de error, uno de ellos específico a nivel de las zonas de residencia.

Desde un enfoque multinivel, la utilidad de una alternativa m (perteneciente al conjunto de alternativas C_m) para un individuo n del cluster j se asume que consiste en dos partes: una parte determinística $V_{nj}^{(m)}$ y un componente aleatorio $\varepsilon_{nj}^{(m)}$, como se resume en la siguiente ecuación:

$$U_{nj}^{(m)} = V_{nj}^{(m)} + \varepsilon_{nj}^{(m)}$$

Donde, $m = 1, 2, \dots, M$ representa el modo de transporte, $j = 1, 2, \dots, M$ denota el clúster (la zona de residencia) y $n = 1, 2, \dots, n_j$ denota el viajero de la j -ésima zona de residencia. La alternativa con el mayor nivel de utilidad será la seleccionada por el individuo.

La parte determinística representa la parte fija de la utilidad y está linealmente relacionada a predictores lineales del modelo. En términos de ecuaciones:

$$V_{nj}^{(m)} = \alpha^{(m)} + \beta^{(m)}X_{nj} + \beta Z_{nj}^{(m)} + \xi_{nj}^{(m)} + \zeta_j^{(m)}$$

Donde $\alpha^{(m)}$ es in intercepto fijo propio de la alternativa de viaje, X_{nj} es un conjunto de covariables explicativas que varían entre los viajeros y $\beta^{(m)}$ es el conjunto de coeficientes asociados a ser estimados. También es posible modelar atributos que varían entre categorías de respuesta e individuos anidados en las j zonas de residencias, capturados por $Z_{nj}^{(m)}$. El término $\zeta_j^{(m)}$ agrega la versión multinivel del modelo, pues incluye términos aleatorios para capturar la heterogeneidad inobservada a nivel de la zona de residencia. Mientras que el término $\xi_{nj}^{(m)}$ captura la heterogeneidad inobservada a nivel del individuo.

Identificación. La utilidad es inobservable, pero tenemos información acerca del modo de viaje elegido. Puede demostrarse que la probabilidad de elegir una alternativa depende de características socioeconómicas (SE), características del viaje (T) y características del entorno construido (BE , el cual puede ser a nivel de la zona de residencia, de destino del viaje o de origen).

$$Pr(Y_{nj} = m_i) = f[SE_n, T_n, BE_{nj}] = Pr(Y_{nj} = m_i | X_{nj}, Z_{nj}^{(m)}, \zeta_j^{(m)}) = \frac{\exp[V_{nj}^{(m)}]}{1 + \sum_{l=2}^M \exp[V_{nj}^{(l)}]}$$

Modelización multinivel. Siendo Y_{nj} la cantidad de viajes por modo de transporte, la distribución de las alternativas tiene la siguiente forma:

$$Y_{nj} | m_{1nj}, m_{2nj}, m_{3nj}, m_{4nj} \sim \text{Multinomial}$$

Siendo m_{1nj} la probabilidad de elección de cada modo de transporte, y m_{4nj} la probabilidad de la alternativa base. La función enlace es la logit multinomial, tal que:

$$Pr(Y_{nj} = m_i | X_{nj}, Z_{nj}^{(m)}, \zeta_j^{(m)}) = \frac{\exp[V_{nj}^{(m)}]}{1 + \sum_{l=2}^M \exp[V_{nj}^{(l)}]} = \eta_{inj} = \log\left(\frac{m_{1nj}}{m_{4nj}}\right)$$

Donde $\sum_{i=1}^m \eta_{inj}^{(m)} = 1$. Una propiedad de estos modelos es que los odds para dos categorías m y l para el sujeto n de la zona j es que:

$$\frac{Pr(Y_{nj} = m | X_{nj}, Z_{nj}^{(m)}, \zeta_j^{(m)})}{Pr(Y_{nj} = l | X_{nj}, Z_{nj}^{(m)}, \zeta_j^{(m)})} = \exp(\eta_{mnj} - \eta_{lnj})$$

Depende solo de los predictores lineales de las categorías en comparación y no de otras categorías. Propiedad que es conocida como *independencia de alternativas irrelevantes*. Sin embargo, la introducción de términos aleatorios en los predictores lineales relaja parcialmente dicha propiedad.

De este modo el primer nivel de análisis es entonces:

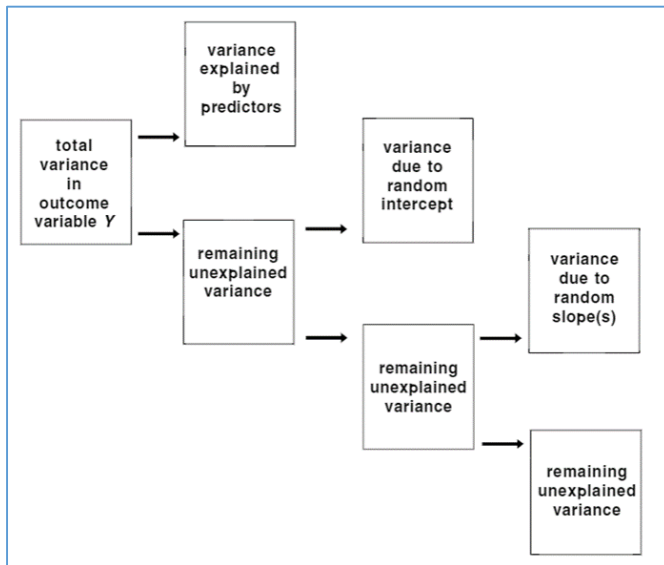
$$\eta_{inj} = \beta_{0j}^{(m)} + \sum_q^Q \beta_{qj}^{(m)} X_{qnj} + \varepsilon_{nj}^{(m)}$$

Donde X_{qnj} refiere a las características de los individuos, con $q=1,2,\dots,Q$. El segundo nivel de análisis:

$$\beta_{qj}^{(m)} = \gamma_{q0}^{(m)} + \sum_{s=1}^S \gamma_{qs}^{(m)} W_{sj} + \mu_{qj}^{(m)}$$

W_{sj} son el conjunto de características de las localidades.

Ilustración 1 Componentes de la varianza de la variable de respuesta



Fuente Twisk, (2013)

Estimación. La estimación de modelos multinivel para variables categóricas no tiene generalmente una forma cerrada. Se estima a través de aproximaciones mediante la cuasi-verosimilitud marginal y la cuasi-verosimilitud penalizada, o bien se estima la máxima verosimilitud con evaluación de integrales (ya que la verosimilitud es marginal con respecto a los efectos aleatorios). En éste último caso se puede realizar la integración numérica por medio de la cuadratura Gauss-Hermite o sino por la cuadratura adaptativa. En el software stata el programa *gllamm*⁴ permite la simulación y estimación de modelos generalizados latentes y mixtos (Rabe-Hesketh, Skrondal, y Pickles, 2004). La encuesta se encuentra ponderada, por lo tanto se aplicarán los ponderadores en las estimaciones de los modelos.

4. Datos y variables de análisis

Los datos provienen de la Encuesta Continua de Hogares de 2009 que llevó a cabo el Instituto Nacional de Estadísticas (INE), a la que se le agregó un módulo de preguntas adicionales referentes a movilidad, con un total de 8486 viajes registrados. El área de estudio es el Área Metropolitana de Montevideo (AMMON) que incluye: departamento de Montevideo (completo), y todas aquellas localidades que poseen al menos una zona censal

⁴ <http://www.gllamm.org/>

(aproximadamente una manzana) en un radio de 60 km. del kilómetro cero de Montevideo en la plaza Cagancha. El apartado de movilidad dentro de la encuesta recabó información sobre:

- Composición, Motorización y Disponibilidad de Espacio de Estacionamiento de los hogares.
- Patrones de movilidad de los individuos.
- Hábitos, opiniones y preferencias tanto de los usuarios como los no usuarios del sistema de transporte colectivo.
- Resultado de la campaña publicitaria de los primeros cambios que sufrió el sistema de transporte metropolitano.
- Hábitos y preferencias de los entrevistados respecto a las compras en sus viajes.

Siendo el objetivo general determinar los factores que afectan la elección del modo de viaje, la variable respuesta son los modos de transporte definidos como: no motorizado, incluye viajes a pie y en bicicleta; transporte público, incluye ómnibus y taxi; vehículo privado, incluye motos y autos; y por último otros tipos de modos, en el cual se incluye animal, bus o camión de la empresa de trabajo, bus escolar y ferrocarril. El modo de viaje que mayor cantidad de viajes tiene en la encuesta es el no motorizado, mientras que el transporte público y el vehículo privado mantienen casi la misma cantidad de viajes.

Tabla 1 Viajes por modo

Modof	Freq.	Percent	Cum.
NoMotorizado	3,187	37.46	37.46
Otros	97	1.14	38.60
TransportePublico	2,510	29.50	68.10
VehiculoPrivado	2,714	31.90	100.00
Total	8,508	100.00	

Las variables explicativas se clasifican en tres dimensiones:

- Dimensión individuo
 - Tiene vehículo: si/no
 - Sexo: 1 (hombre), 0 (mujer)
 - Ingreso familiar
- Dimensión viaje
 - Tiempo de viaje (en minutos)
- Dimensión zona
 - Densidad
 - Cantidad de Paradas
 - Longitud línea transporte público x zona/área x zona
 - Índice diversidad de servicios y equipamientos: índice Shannon y Weaver.

Si bien se incluyen varias variables de carácter sociodemográfico se podrían incluir otras más como años de educación, edad, tamaño del hogar, etc. Es decir, que se considera fundamental para un análisis exhaustivo pero no es el objetivo central en este primer acercamiento.

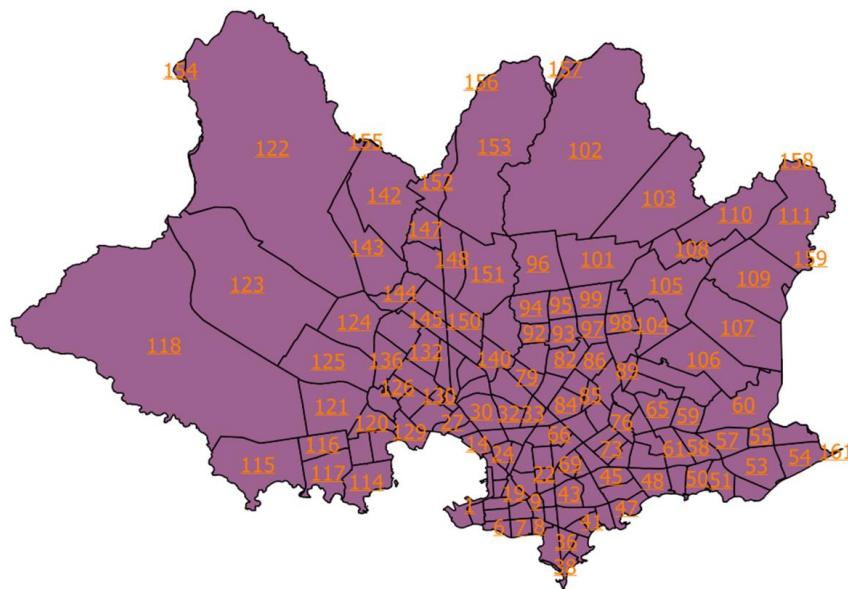
El índice de diversidad de servicios y equipamientos se calcula a través del índice Shannon y Weaver, el mismo permite resumir en un indicar la diversidad de servicios y equipamientos de

una zona de residencia. Los equipamientos urbanos definidos son: i) educación (primaria, inicial, secundaria, terciaria), ii) comercio, iii) industria, iv) hotel, v) financiero, y vi) salud. Para calcular el índice se calcula la probabilidad bayesiana de cada uno de los equipamientos y luego se calcula el índice como ilustra la siguiente ecuación:

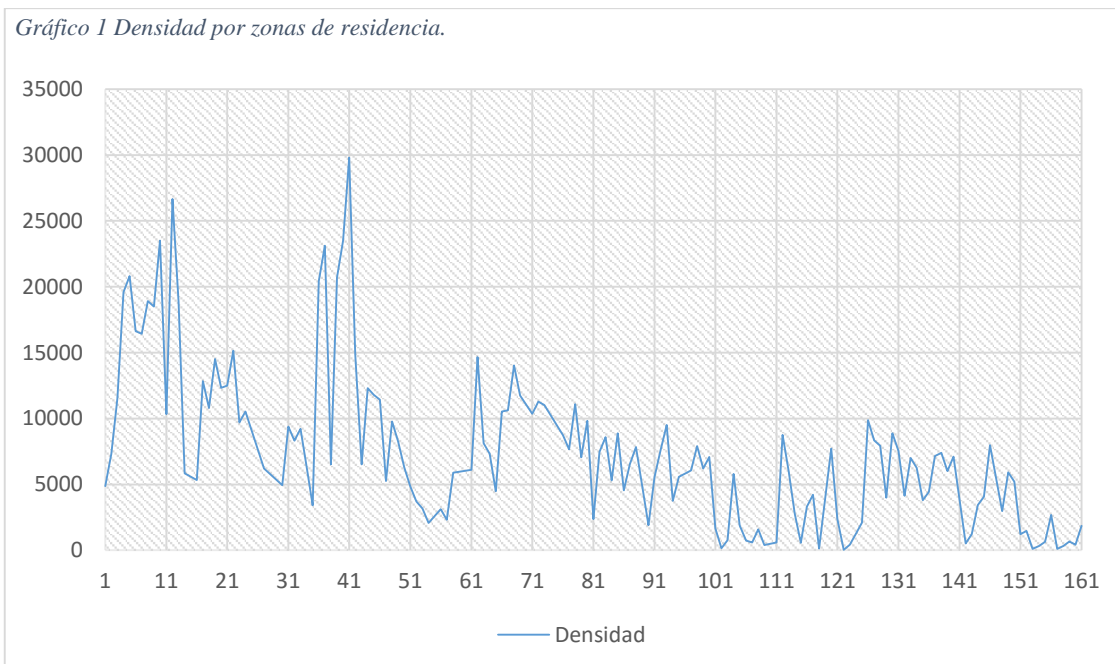
$$H = - \sum_{i=1}^k P_i * \ln(P_i) = \sum_{i=1}^k \ln(P_i^{P_i})$$

El índice de Shannon y Weaver tiene como objetivo capturar el *mix use*. Una de las proposiciones es que el incremento del *mix use* reduce el uso de automóviles, sin embargo, Crane (2001) demuestra que modificaciones en la forma urbana (*mix use*, por ejemplo) pueden aumentar el número de viajes en automóviles. Pues, incrementos en la densidad y en el balance entre uso residencial y comercial del suelo, reducen simultáneamente el tiempo de viaje de todos los modos de transporte, y el resultado dependiendo de los incrementos relativos de viajes entre los modos de transporte (Greenwald & McNally, 2008). Dicha variabilidad puede ser captada a través de un enfoque del comportamiento.

Ilustración 2 Zonas de análisis de transporte



Las zonas de residencia se definieron de acuerdo a las zonas de análisis de transporte determinadas en la encuesta de origen-destino. En total corresponden a 161 zonas de Montevideo, cada una de las cuales tiene distintas características, como población, área, servicios, etc.



Las zonas de residencia presentan gran variabilidad con respecto a la densidad, existen zonas con densidades por encima de los 15 mil habitantes por km², mientras que otras no superan los 5 mil habitantes por km².

Tabla 2 Viajes por género

sexo2		Freq.	Percent	Cum.
Mujer	0	4,452	52.33	52.33
Hombre	1	4,056	47.67	100.00
Total		8,508	100.00	

Como podemos observar en la tabla 2 las mujeres realizan más viajes que los hombres.

Tabla 3 Estadísticos descriptivos

Variable	Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
ingresofam~r	8508	35895.01	34881.83	0	594910
tiempo_mins	8372	20.95162	66.62007	-1430	270
densidad	7740	8832.324	7469.118	40.48	29795.9
paradas	7740	212.9012	176.7321	0	1300
longlineat~a	7740	.056509	.0718902	0	.47512

Luego del análisis estadístico de los datos se encuentran varios valores faltantes, por lo que la cantidad de viajes finales es de 7740.

5. Resultados

En esta sección se presentan los resultados empíricos obtenidos al aplicar modelos multinivel multinomial para la elección del modo de viaje. Se estimaron mediante máxima verosimilitud e integración numérica de cuadratura adaptativa. Los puntos de cuadratura considerados fueron 20, de forma que el modelo convergiera, no sé estimaron modelo con mayores puntos de cuadratura.

Se estimaron cuatro modelos con especificaciones diferentes: i) modelo nulo, ii) modelo condicional con efecto aleatorio en la constante y sin covariable, iii) modelo condicional con efecto aleatorio en la constante y una covariable, densidad, iv) modelo condicional con efecto aleatorio en la constante y dos covariables, densidad y paradas.

Ilustración 3 Modelo nulo

```
. gllamm MB, i(zathogar) l(mlogit) f(binom) weight(wt) nrf(1) eqs(cons) nip(20) adapt iterate(20)
Condition Number = 12.489453

gllamm model

log likelihood = -4484361.3
```

	MB	Coef.	Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]
c2	_cons	-3.401638	.0075097	-452.96	0.000	-3.416357 -3.386919
c3	_cons	-.308395	.0062612	-49.25	0.000	-.3206667 -.2961232
c4	_cons	-.2252013	.006256	-36.00	0.000	-.2374629 -.2129398

```

Variances and covariances of random effects
-----

***level 2 (zathogar)

var(1): .8069848 (.00558334)
-----
```

El modelo nulo sólo incluye intercepto y el correspondiente término de variación, por lo tanto, es útil para observar si la variable dependiente (el modo de viaje) varía significativamente a nivel de la zona de residencia. Como puede observarse en la *ilustración 4* la elección del modo de viaje varía significativamente a nivel de la zona de residencia. Por otro lado, la probabilidad promedio de elegir transporte público en vez de un modo no motorizado (a pie o en bicicleta) es de 42.35% aproximadamente, de elegir vehículo privado es 44.39%, y de elegir cualquier otro (animal, transporte laboral-empresa, bus escolar, etc) es 3.2%.

Ilustración 4 Modelo condicional con efecto aleatorio en la constante y sin covariable.

```
. gllamm MB tiempo_min sexo2 ingreso_familiar tienevehiculo, i(zathogar) l(mlogit)
> ) f(binom) weight(wt) nlp(20) adapt iterate(45)
```

MB	Coef.	Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]	

c2						
tiempo_mins	.0440036	.0001574	279.55	0.000	.0436951 .0443121	
sexo2	.6375399	.0094125	67.73	0.000	.6190919 .655988	***level 2 (zathogar)
ingreso_fami~r	.0000129	1.46e-07	88.43	0.000	.0000126 .0000132	var(1): .8355779 (.00634172)
tienevehiculo	.4832074	.009784	49.39	0.000	.4640311 .5023838	-----
_cons	-5.369208	.0128411	-418.13	0.000	-5.394377 -5.34404	

c3						
tiempo_mins	.0456492	.0000694	657.95	0.000	.0455132 .0457851	
sexo2	-.2079698	.0028671	-72.54	0.000	-.2135892 -.2023504	
ingreso_fami~r	7.47e-06	7.24e-08	103.23	0.000	7.33e-06 7.62e-06	
tienevehiculo	-.1081424	.0033853	-31.94	0.000	-.1147775 -.1015073	
_cons	-1.340631	.0071381	-187.81	0.000	-1.354622 -1.326641	

c4						
tiempo_mins	.0004455	.0000228	19.57	0.000	.0004009 .0004901	
sexo2	.6647013	.0029799	223.06	0.000	.6588609 .6705418	
ingreso_fami~r	.000014	6.86e-08	204.45	0.000	.0000139 .0000142	
tienevehiculo	2.767439	.004382	631.55	0.000	2.75885 2.776027	
_cons	-2.931354	.0077866	-376.46	0.000	-2.946616 -2.916093	

El segundo modelo estimado es un condicional con efecto aleatorio a nivel de la constante. La probabilidad de elegir transporte público, vehículo privado u cualquier otro modo está significativamente relacionada al tiempo de viaje, al género, al ingreso familiar y a la tenencia de vehículos (motos y/o autos). Controlando por otras variables, es posible afirmar que los hombres tienen mayor probabilidad que su contraparte femenina de viajar en vehículo privado (66.03% ceteribus paribus). Por el contrario, los hombres tienen menor probabilidad que las mujeres de viajar en transporte público (44.81%). La posibilidad de elegir transporte público, vehículo privado o cualquier otro modo de transporte excepto el no motorizado se incrementa ante el aumento del ingreso familiar. Y de la misma manera se incrementan ante aumento del tiempo de viaje, ello puede estar relacionado al aumento de la distancia de viaje. La posibilidad de elegir un vehículo privado es mayor (94%) si el hogar posee algún vehículo, mientras que la posibilidad de elegir transporte público en vez de no motorizado es menor si el hogar posee vehículo (47.29%).

Ilustración 5 Modelo condicional con efecto aleatorio en la constante y una covariable, densidad.

```
. gllamm MB tiempo_min sexo2 ingreso_familiar tienevehiculo, i(zathogar) l(mlogit) f(binom) nrf(1) eqs(cons) geqs(f1) weight(wt)
> ) nlp(20) adapt iterate(20)
```

MB	Coef.	Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]	

c2						
tiempo_mins	.0440866	.0001805	244.19	0.000	.0437327 .0444404	
sexo2	.4463415	.0100767	44.29	0.000	.4265916 .4660915	
ingreso_familiar	.0000141	1.35e-07	104.22	0.000	.0000139 .0000144	Variaciones and covariances of random effects
tienevehiculo	.712164	.0106533	66.85	0.000	.691284 .733044	-----
_cons	-5.493438	.0150938	-363.95	0.000	-5.523022 -5.463855	***level 2 (zathogar)

c3						
tiempo_mins	.0472766	.0000747	633.08	0.000	.0471303 .047423	var(1): 1.0654213 (.01153239)
sexo2	-.2646846	.0029859	-88.65	0.000	-.2705368 -.2588324	Regressions of latent variables on covariates
ingreso_familiar	5.75e-06	7.53e-08	76.28	0.000	5.60e-06 5.89e-06	-----
tienevehiculo	-.0254562	.003559	-7.15	0.000	-.0324318 -.0184807	
_cons	-1.565427	.0081636	-191.76	0.000	-1.581427 -1.549426	

c4						
tiempo_mins	.0001244	.0000249	4.99	0.000	.0000756 .0001733	random effect 1 has 1 covariates:
sexo2	.6573052	.0031977	205.55	0.000	.6510378 .6635726	densidad: -.00003385 (7.415e-07)
ingreso_familiar	.0000131	7.15e-08	182.98	0.000	.0000129 .0000132	-----
tienevehiculo	2.849408	.0046658	610.70	0.000	2.840263 2.858553	
_cons	-3.246906	.0087987	-369.02	0.000	-3.264151 -3.229661	

Al agregar la covariable *densidad* en la segunda jerarquía de análisis las variables a nivel del individuo continúan siendo significativas, como podemos observar en la *ilustración 6*. Dicha variable es agregada para explicar la variación de los interceptos entre diferentes zonas de residencia. Es decir que, la probabilidad promedio de elegir un modo de transporte resulta afectada por la heterogeneidad de la densidad de las zonas de residencia.

En el último modelo no sólo se agrega como covariable la densidad sino también la cantidad de paradas por zona de residencia. Resultando que las variables sociodemográficas siguen siendo significativas. Y que tanto la densidad de la zona de residencia como la cantidad de paradas explica la variación de los interceptos, la probabilidad promedio de elegir un modo de transporte (*ceteribus paribus*), entre las zonas de residencia.

Ilustración 6 Modelo condicional con efecto aleatorio en la constante y dos covariables, densidad y paradas.

```
. gllamm MB tiempo_min sexo2 ingreso_familiar tienevehiculo, i(zathogar) l(mlogit) f(binom) nrf(1) eqs(cons) geqs(fl) weight(wt)
> ) nlp(20) adapt iterate(45)
```

MB	Coef.	Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]	
						Variances and covariances of random effects

c2						
tiempo_min	.0430239	.0001791	240.20	0.000	.0426729 .043375	***level 2 (zathogar)
sexo2	.4385364	.0100909	43.46	0.000	.4187586 .4583141	
ingreso_familiar	.0000136	1.42e-07	96.31	0.000	.0000134 .0000139	var(1): 1.0682286 (.01154685)
tienevehiculo	.7074513	.0107511	65.80	0.000	.6863796 .728523	
_cons	-4.866452	.0154178	-315.64	0.000	-4.89667 -4.836233	Regressions of latent variables on covariates

c3						
tiempo_min	.0473538	.0000747	633.63	0.000	.0472073 .0475002	random effect 1 has 2 covariates:
sexo2	-.2652814	.0029866	-88.82	0.000	-.271135 -.2594278	densidad: -.00001504 (7.343e-07)
ingreso_familiar	5.76e-06	7.53e-08	76.45	0.000	5.61e-06 5.91e-06	paradas: -.00351222 (.00004132)
tienevehiculo	-.0256709	.0035607	-7.21	0.000	-.0326496 -.0186921	
_cons	-1.45133	.0081498	-178.08	0.000	-1.467303 -1.435357	

c4						
tiempo_min	.0001228	.0000249	4.93	0.000	.000074 .0001716	
sexo2	.6582174	.0031983	205.80	0.000	.6519488 .6644859	
ingreso_familiar	.0000131	7.16e-08	182.91	0.000	.0000129 .0000132	
tienevehiculo	2.851646	.004668	610.90	0.000	2.842497 2.860795	
_cons	-3.132595	.0087859	-356.55	0.000	-3.149815 -3.115375	

El índice de diversidad de servicios y equipamientos y la longitud de línea de transporte público no pudieron incluirse en las modelizaciones dado que al incluirla los modelos no convergían.

6. Conclusiones

La principal conclusión de la modelización es que la elección de modo de transporte presenta heterogeneidad por zona de residencia. Lo cual abre un abanico de posibilidades en cuanto a las políticas de transporte. La densidad de la zona de residencia afecta la probabilidad de seleccionar un modo de transporte u otro. Asimismo la elección del modo de transporte se encuentra determinada por la cantidad de paradas de la zona de residencia del viajero.

Por otro lado, las variables sociodemográficas resultaron todas significativas. El crecimiento del tiempo de viaje aumenta la probabilidad de elegir cualquier modo de viaje frente al modo no motorizado, o sea, a pie o en bicicleta. El tiempo de viaje es una variable que también delata características de la forma urbana, corredores, ciclo vías o veredas en buen estado podrían estar afectando el la duración del viaje.

El problema planteado sugiere que pueden existir más puntas desde donde establecer otras variables a nivel de la zona de residencia que afecten la elección del modo de viaje. Puede deberse a la necesidad de controlar por otras variables sociodemográficas, a ajustes necesarios en la estimación por máxima verosimilitud o bien a especificaciones distintas de las variables explicativas del segundo nivel (como el índice de diversidad de servicios y equipamientos, y la longitud de línea de transporte público).

Bibliografía

Bhat, C. R., & Koppelman, F. S. (1999). Activity - based modeling of travel demand. In *Handbook of transportation Science* (pp. 35-61). Springer US.

Boarnet, Marlon y Crane, Randall, 2001. The influence of land use on travel behavior: specification and estimation strategies. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 35(9), 823-845.

Brownstone, D., & Golob, T. F. (2009). The impact of residential density on vehicle usage and energy consumption. *Journal of Urban Economics*, 65(1), 91-98.

Brownstone, David y Golob, Thomas, 2008. The Impact of Residential Density on Vehicle Usage and Energy Consumption. Institute of Transportation Studies, and University of California Irvine.

Brownstone, David. Methodological developments in activity-travel behavior analysis. En R. M. Pendayala, C. R. Bhat (Eds) *Travel Behavior Research in an Evolving World* (pp. 249-260). International Association for Travel Behavior Research. ISBN 978-1-105-47378.

Bryk, Anthony y Raudenbush, Stephen, 2002. Hierarchical linear models: Applications and data analyses methods. Second edition. Sage Publications. Thousand Oaks. CA.

Camagni, R., Gibelli, M.C y Rigamonti, P, 2002. Urban mobility and urban form: the social and environmental costs of different patterns of urban expansion. *Ecological Economics* 40/2, 2002, 199-216.

Cervero, R. B. (2013). Linking urban transport and land use in developing countries. *Journal of Transport and Land Use*, 6(1), 7-24.

Coq. Huelva, Daniel. Marzo (2003). Territorio del individualismo al holismo. *Revista de estudios regionales* n°69, pp 115 a 136. Universidad de Sevilla.

Crane, Randall, 1996. On Form Versus Function: Will the "New Urbanism" Reduce Traffic or Increase It? Working Paper UCTC No. 266. Centro de Transporte, Universidad de California, EEUU.

De Abreu e Silva, J., y Goulias, K. (2009). Structural Equations Model of Land Use Patterns, Location Choice, and Travel Behavior: Seattle, Washington, Compared with Lisbon, Portugal. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2135), 106-113.

González, P., Baños, J. F., Mayor, M., & Suárez, P. (2013). Determinants of ground transport modal choice in long-distance trips in Spain (No. 2013/07). University of Oviedo, Department of Economics, Oviedo Efficiency Group (OEG).

- Greenwald, M. J., & McNally, M. G. (2008). Land Uses Influences on Trip Chaining in Portland, Oregon.
- Frank, Lawrence, 1994. An analysis of relationships between urban form (density, mix, and jobs: housing balance) and travel behavior (mode choice, trip generation, trip length and travel time). Washington State Department of Transportation
- Hernández, Diego. (2012). Políticas de tiempo movilidad y transporte público. Rasgos básicos, equidad social y de género. (Montevideo: PNUD Uruguay/Intendencia de Montevideo). Recuperado de: http://www.uy.undp.org/content/uruguay/es/home/library/poverty/publication_1.html.
- Holden, E., & Norland, I. T. (2005). Three challenges for the compact city as a sustainable urban form: household consumption of energy and transport in eight residential areas in the greater Oslo region. *Urbanstudies*, 42(12), 2145-2166.
- Intendencia de Montevideo. (2010). Plan de movilidad urbana: hacia un sistema de movilidad accesible, democrático y eficiente. 2010-2020. Recuperado de: http://www.montevideo.gub.uy/sites/default/files/plan_de_movilidad.pdf
- Kenworthy, Jeffrey, 2009. Urban Planning and Transport Paradigm Shifts for Surviving the Post-Petroleum Age in Cities. *International transport forum*.
- Kim, C., & Wang, S. (2015). Empirical examination of neighborhood context of individual travel behaviors. *Applied Geography*, 60, 230-239.
- Maat, K., Van Wee, B., & Stead, D. (2005). Land use and travel behavior: expected effects from the perspective of utility theory and activity-based theories. *Environmental and Planning B: Planning and Design* 2005 , 32, 33-46.
- Merchand Rojas, Marco A., 2009. Reflexiones en torno a la Nueva Geografía Económica en la perspectiva de Paul Krugman y la localización de la actividad económica. *Revista Breves contribuciones del Instituto de Estudios Geográficos N°21 - Año 2009-2010*, pp. 206-223. Universidad Nacional de Tucumán
- Meurs, Henk y Van Wee, Bert, 2003. Land Use and Mobility: a Synthesis of Findings and Policy Implications. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 3, no. 2, pp. 219-233.
- Ministerio de Industria, Minería y Energía. (2014). Plan Nacional de eficiencia energética 2015-2024.
- Mohammed, S.O. y Venter, C.J., 2013. Estimating car ownership and transport energy consumption: a disaggregate study in Nelson Mandela Bay. Technical paper, *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, Vol. 55 n° 1, pp.2-10.
- Newman, P. W. G. y Kenworthy, J. R, 1989. *Cities and Automobile Dependence: An International Sourcebook*. Aldershot, UK: Gower.
- Páez, A., & Scott, D. M. (2005). Spatial statistics for urban analysis: a review of techniques with examples. *GeoJournal*, 61(1), 53-67.
- Posada, Luis Javier (1978): «Fundamentos económicos-espaciales de la teoría de Centros de Desarrollo», *Agricultura y Sociedad*, n.º 6, Ministerio de Agricultura y Comercio.
- Rabe-Hesketh, S., Skrondal, A., & Pickles, A. (2004). *GLLAMM manual*.

Rickwood, P., Glazebrook, G., & Searle, G. (2008). Urban structure and energy—a review. *Urban policy and research*, 26(1), 57-81.

Rodríguez Miranda, Adrián, 2006. Desarrollo económico territorial endógeno: teoría y aplicación al caso uruguayo. Serie Documentos de Trabajo DT 02/06. Instituto de Economía, FCEyA, Universidad de la República.

Sánchez, Vania, 2012. Impacto de los subcentros de empleo sobre la densidad de población en la zona metropolitana del valle de México. *Tesis Máster en Economía Aplicada*. Departamento de Economía Aplicada, Universidad Autónoma de Barcelona.

Twisk, J. W. (2013). *Applied longitudinal data analysis for epidemiology: a practical guide*. Cambridge University Press.

Van Wee, B., & Meurs, H. (2003). Land-use and mobility: a synthesis of findings and policy implications. *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 3 (2) pp. 219-233.

Verhoef, E. (1994). External effects and social costs of road transport. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 28(4), 273-287.

Wegener M, 1995, “Current and future land use models,” In *Travel model improvement program land use modeling conference proceedings* (Washington, DC, Travel Model Improvement Program) pp 15-40.

Wegener, Michael, 2004. Overview of land-use transport models. En David A. Hensher and Kenneth Button (Eds.): *Transport Geography and Spatial Systems. Handbook 5 of the Handbook in Transport*. Pergamon/Elsevier Science, Kidlington, UK, 2004, 127-146

Wegener, Michael, 1999. Land-Use Transport Interaction: State of the Art. Deliverable 2a of the project TRANSLAN (Integration of Transport and Land Use Planning) of the 4th RTD Framework Programme of the European Commission. Institut für Raumplanung, Universität Dortmund - Fakultät Raumplanung.

Zahabi, S. A. H., Miranda-Moreno, L. F., Patterson, Z., & Barla, P. (2012). Evaluating the effects of land use and strategies for parking and transit supply on mode choice of downtown commuters. *Journal of Transport and Land Use*, 5(2).

Zahabi, S. A. H., Miranda-Moreno, L., Patterson, Z. y Barla, P. (2013). Spatio-temporal analysis of car distance, greenhouse gases and the effect of built environment: A latent class regression analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 77, 1-13.

Frank, Lawrence, 1994. An analysis of relationships between urban form (density, mix, and jobs: housing balance) and travel behavior (mode choice, trip generation, trip length and travel time). Washington State Department of Transportation.