

COMPARACIÓN DE MEDIDAS DE ACCESIBILIDAD EN TRANSPORTE PÚBLICO URBANO

Rodrigo Contreras, Ministerio de Desarrollo Social y Familia,
rcontrerasf@desarrollosocial.gob.cl
Nicolás Villalobos, Transapp, nvillalobos@transapp.cl

RESUMEN

La localización de las oportunidades en una ciudad, la ubicación de la población y la distancia entre estos motiva la aplicación de medidas de accesibilidad potencial, generando una herramienta de diagnóstico, además de un enfoque de evaluación complementario al de ahorros de tiempo. En este trabajo se formulan distintas medidas de accesibilidad potencial, asociadas a distintas funciones de decaimiento por distancia y una extensión para incorporar efectos de competencia entre los interesados en las oportunidades. Se muestra un ejemplo basado en simulaciones de la ciudad de Santiago para su uso en la elaboración de diagnósticos y en la caracterización de los impactos de proyectos.

Palabras clave: accesibilidad, transporte público.

ABSTRACT

The localization of opportunities within a city, distribution of population, and the distance between them motivate the implementation of accessibility measures, creating a diagnostic tool as well as a complementary evaluation approach to time savings. This work formulates different accessibility measures associated with various distance decay functions and an extension to incorporate competition effects among those interested in the opportunities. An example based on simulations of the city of Santiago is presented for use in diagnostics development and the characterization of project impacts.

Keywords: accessibility, public transport.

1. INTRODUCCIÓN

Una razón importante tras los fenómenos que dan origen a las ciudades es el satisfacer la necesidad de interacción social o económica, lo que se facilita (hasta cierto punto) con la aglomeración. Dentro de este contexto, el objetivo de los sistemas de transporte es precisamente maximizar la capacidad de cada habitante de poder participar de estos intercambios –lo que podría entenderse como accesibilidad–, más que de aumentar su movilidad, tradicionalmente asociada a tiempos o distancias de desplazamiento.

Esto contrasta con el enfoque actual de los análisis de sistemas de transporte, que está centrado en la movilidad. La movilidad es la materialización de las necesidades de interacción, resultado que está fuertemente condicionado por la oferta de transporte disponible, las características particulares de cada individuo, y la localización de las actividades en el territorio. Descriptores asociados a ella, tales como volúmenes de flujo, tiempos de viaje, niveles de congestión y emisiones de contaminantes son los principalmente estudiados en la práctica actual. En particular, en la evaluación social de los proyectos de transporte urbano, suele ser el ahorro de tiempo de viaje el beneficio que decide si una determinada inversión resulta o no recomendable.

Pueden idearse intervenciones a los sistemas de transporte con objetivos distintos al ahorro de tiempo de viaje. Por ejemplo, pueden vincularse las oportunidades (un polo de empleos, por ejemplo) con un sector de la ciudad que esté relativamente aislado. El resultado de una intervención de este tipo no necesariamente reducirá el tiempo total de viaje consumido, pues es posible suponer que se realizarán viajes adicionales, o que a los residentes de la zona aislada se les abren nuevos destinos posibles, quizá más alejados. El objetivo de este tipo de intervenciones, será entonces aumentar un potencial de interacción originalmente bajo, aumentando el grado de participación de las personas en las actividades que la ciudad ofrece, aumentando por consiguiente el bienestar social.

La motivación del presente documento es explorar la accesibilidad como dimensión relevante para los análisis de transporte. En él se presenta, en primer lugar, un contexto teórico sobre la definición del concepto de accesibilidad y la formulación de medidas asociadas. Luego de elegir dentro de este marco conceptual, una definición operacional, se especifican medidas consistentes con la información disponible a partir de un modelo de transporte de análisis estratégico. A continuación se presentan los resultados de la aplicación de las medidas propuestas en un ejemplo simulado en la ciudad de Santiago, y finalmente se discute sobre las posibilidades de uso de los indicadores construidos en las distintas etapas del proceso de planificación de transporte.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Enfoques Conceptuales

Hansen (1959) definió el concepto de accesibilidad como la “intensidad de la posibilidad de interacción”, proponiendo para cada punto una medida asociada a la distribución de las actividades, ajustadas por la facilidad y el atractivo de acceder a ellas. Operacionalmente, esto se traduce a una medida de accesibilidad directamente proporcional al “tamaño de la actividad” (por ejemplo, el número de empleos) e inversamente proporcional a alguna función no decreciente de la distancia que represente la pérdida de atractivo resultante de su lejanía.

Según Ingram (1971), accesibilidad significa la capacidad de ser alcanzado, implicando una medida de proximidad entre dos puntos. Vale la pena notar que en su definición no considera el tamaño o atractivo de la actividad. Distingue entre accesibilidad relativa y absoluta, siendo la primera el grado de conectividad entre dos puntos, y la segunda, para cada punto, es su grado de interconexión con todos los demás. La definición operacional de la accesibilidad relativa se considera decreciente con la distancia, y para representar este decaimiento se explora el uso de distintas formas funcionales.

La aproximación de Weibull (1976) es similar a Hansen, definiendo accesibilidad como “proximidad desde un punto de referencia a un conjunto de puntos, cada uno de los cuales tiene una cierta cantidad de una característica específica”. El autor luego plantea propiedades deseables para un indicador, expresadas en axiomas (por ejemplo, el indicador no puede crecer con la distancia, o no puede decrecer si aparecen nuevas actividades). El cumplimiento de los axiomas implica una forma funcional específica para los indicadores de accesibilidad.

Reconocida como concepto que admite muchas interpretaciones, también ha sido descrita como una medida de la libertad de un individuo para participar en las actividades de su entorno, como el rango de elección que enfrenta un habitante, como el potencial de intercambio entre distintas zonas, o como los beneficios económicos que el sistema de transporte proporciona en una determinada ubicación (Weibull, 1980, Koenig, 1980, Ben-Akiva y Lerman, 1979). En el contexto de este artículo, se pueden identificar al menos cuatro dimensiones involucradas en la accesibilidad: la medida en que las personas pueden alcanzar sus actividades o destinos está dada por una distribución de actividades en el espacio (empleos, equipamientos, hogares, etc.), las características individuales (ingreso, posesión de automóvil, etc.), un sistema de transporte (vías, rutas, frecuencias, etc.) y un instante determinado (que condiciona la oferta y define los niveles de servicio en las redes de transporte). Las aproximaciones en este siglo han ido convergiendo a definiciones relacionadas con estas dimensiones, por ejemplo, Geurs y van Wee (2004), Osth *et al.* (2016) o Guzmán *et al.* (2017).

La relevancia de este tipo de indicador al estudiar los sistemas de transporte ha sido justificada (Morris *et al.*, 1979; Koenig, 1980) argumentando que analizar intervenciones basándose exclusivamente en reducciones del tiempo de viaje son ejercicios incompletos. Las mejoras en el sistema de transporte pueden incentivar viajes más largos, a destinos más atractivos y lejanos; por otra parte, también pueden incentivar la generación de viajes que anteriormente no se realizaban.

Si bien los intentos por encontrar empíricamente una relación entre las medidas de accesibilidad y la generación de viajes u otros indicadores de movilidad, motivados por precisar la relación entre el entorno y el comportamiento de viaje (Vickerman, 1974; Beckmann *et al.*, 1983; Hanson y Schwab, 1987) no han resultado todos concluyentes (por varias razones, entre ellas, las diferentes aproximaciones operacionales a la accesibilidad), sí es posible afirmar, siguiendo a Kenyon *et al.* (2002), que en un ambiente que asume un elevado grado de movilidad, son evidentes las barreras (económicas o de tiempo) que condicionan la accesibilidad a oportunidades a personas localizadas en sectores mal conectados, o que no pueden acceder al automóvil. Esto muestra la importante relación del desempeño de los sistemas de transporte con los fenómenos de exclusión social. Según Bocarejo y Oviedo (2012), la disponibilidad de oportunidades generadas por la interacción entre la oferta de transporte y los usos de suelo, puede ser usada como indicador de inclusión social y de potencial de desarrollo económico.

Vale la pena notar que no necesariamente basta con estudiar la cobertura de los sistemas de transporte. Lucas (2012) indica que los estudios sobre exclusión social no tienden a discutir sobre la provisión de más servicios de transporte (lo que podría llamarse un enfoque basado en la oferta), sino que estudian las consecuencias de la falta de oferta para acceder a oportunidades laborales, de salud o de interacción social (un enfoque más centrado en la demanda, en las necesidades). Morris *et al.* (1979), en un sentido similar, se planteaban la pregunta sobre si lo relevante es estudiar la accesibilidad al transporte o a las oportunidades. Considerando que el transporte es generalmente un medio para alcanzar un fin, concluye que las medidas de conectividad de las redes de transporte son útiles para poner en evidencia deficiencias puntuales, pero para aspectos más amplios, es necesario utilizar un enfoque basado en las oportunidades. De acuerdo con esta postura, las medidas de accesibilidad estudiadas en este trabajo se centran en el acceso a las oportunidades, a diferencia del enfoque presente en Wu y Hine (2003).

De esta forma, los análisis de accesibilidad pueden ser muy útiles en la planificación de intervenciones en los sistemas de transporte (Morris *et al.*, 1979, Knox, 1980, Handy y Niemeyer, 1997, Miller, 1999), ya sea resaltando las inequidades, ineficiencias o deficiencias de acceso resultantes de la configuración actual de los sistemas de usos de suelo y transporte, o bien para caracterizar (con mayor detalle que el conteo del consumo de recursos global) los impactos de los proyectos. Localizar los cambios en accesibilidad inducidos por la intervención muestra quiénes son los ganadores y perdedores. Además, este tipo de indicadores, al vincular los usos de suelo con el transporte, favorece el diseño de intervenciones coordinadas en ambos sistemas (Benenson *et al.*, 2010). Por otra parte, el disponer de un indicador localizado, en conjunto con las características socioeconómicas, permite la construcción de curvas de Lorenz e indicadores de equidad territorial (Grengs 2015; Guzmán *et al.*, 2017).

2.2. Tipología de indicadores

Dentro de los distintos enfoques sobre el concepto de accesibilidad, a grandes rasgos, podrían distinguirse las perspectivas centradas en la oferta de transporte (incluyendo infraestructura o topología de redes), tales como las distancias a paraderos de transporte público, la densidad de red, los tiempos promedio de viaje o los niveles de congestión; las basadas en los modelos de interacción espacial, herederas del enfoque de Hansen (1959) que evalúan una localización respecto de una distribución de las actividades; las basadas en restricciones (también llamadas basadas en la persona), derivadas de la geografía del tiempo de Hagerstrand (1970); y las económicas, motivadas por cuantificar los beneficios de localizarse en un determinado lugar (Ben-Akiva y Lerman, 1979, Beckmann *et al.*, 1983, Martínez, 1995). Por otra parte, en Morris *et al.* (1979) también se plantea la necesidad de distinguir entre medidas de accesibilidad real y de accesibilidad potencial, diferentes en cuanto a si basan sus cálculos en el patrón de viajes vigente, o si consideran a todos los destinos como posibles en lugar de limitarse a los observados.

Bajo esta nomenclatura, los indicadores de accesibilidad potencial asociados a modelos de interacción espacial (el enfoque elegido para este trabajo) pueden a su vez ser clasificados, siguiendo a Miller (2020), en cuatro categorías:

$$a) \text{ Distancia al más próximo: } A^{ip} = \min_{j \in L_p} (d_{ij}) \quad (1)$$

Se calcula la accesibilidad de la zona i como la distancia más cercana a una actividad del tipo p , siendo L^p el conjunto de ubicaciones de ese tipo.

Se observa que esta familia de medidas no considera el volumen de la actividad, y también omite el efecto acumulativo de tener múltiples alternativas accesibles. Por esta razón, debe analizarse con cuidado para qué clase de actividad es pertinente un indicador de este tipo.

$$b) \text{ Oportunidades Acumuladas: } A_i^p = \sum_{j \in L^p} \delta_{ij}^D X_j^p \quad (2)$$

Donde X_j^p es el volumen de la actividad p en la zona j , y δ_{ij}^D es una variable binaria que vale 1 si la distancia entre i y j es menor que cierto umbral D .

El cálculo del número de oportunidades alcanzables en una distancia (o tiempo) menor que un umbral es relativamente sencillo y de fácil interpretación. Sin embargo, presenta algunos inconvenientes: en primer lugar, asume que las personas son indiferentes a cualquier oportunidad dentro del umbral, y que todas las localizaciones fuera del umbral son irrelevantes; en segundo lugar, la definición de un umbral no es deducible teóricamente, siendo su elección a menudo un asunto discrecional. Adicionalmente, la jerarquización de lugares según su accesibilidad puede cambiar con la selección del umbral. Para intentar mitigar estas características no deseables, se ha propuesto el uso de una función $A_i^p(D)$, llamada perfil de accesibilidad (Morris *et al.*, 1979), que se construye contabilizando las oportunidades alcanzables para cada umbral. Utilizar una función en lugar de un único valor, sin embargo, pierde la ventaja de la facilidad de interpretación; además, si se pretende comparar alternativas o caracterizar efectos de intervenciones, no es directo inferir cuál de dos perfiles de accesibilidad es preferible.

$$c) \text{ Gravitacionales: } A_i^p = \sum_{j \in L^p} X_j^p f(d_{ij}) \quad (3)$$

En este caso, se permite que el conjunto de actividades relevantes L^p sea distinto para cada zona i .

En este caso, el atractivo de cada oportunidad es ponderado por una función f , llamada a menudo de impedancia, que representa el decaimiento de su deseabilidad con la distancia. Se han postulado varias formas para la función f , algunos ejemplos para ella son: d_{ij}^{-n} (de potencia), $e^{-\beta d_{ij}}$ (exponenciales), y $e^{\frac{-d_{ij}^2}{\gamma}}$ (gaussianas). Algunas veces se considera que la variable binaria δ_{ij}^D definida anteriormente es también una función (no continua) de decaimiento por distancia, lo que establece una semejanza entre las medidas gravitacionales y las de oportunidades acumuladas.

Las medidas gravitacionales establecen relevancias distintas para las localizaciones alternativas según su distancia, salvando una desventaja de las medidas de oportunidades acumuladas, pero sacrificando la simpleza de la interpretación de resultados. Estos modelos están directamente relacionados con los modelos de distribución acotados en orígenes, lo que se muestra, por ejemplo, en Vickerman (1974) o Williams (1976).

$$d) \text{ Utilidad Aleatoria: } A_i^p = \ln \left(\sum_{j \in L^p} e^{\beta Z_j} \right) \quad (4)$$

Esta formulación es proveniente de los modelos de elección discreta. El agente elige entre los posibles destinos j caracterizados por un vector Z_j de atributos, que, en conjunto con el vector de parámetros β , conforman la componente observable de la utilidad. La expresión para la accesibilidad corresponde a la utilidad esperada, que en el caso logit (en el que se supone una distribución Gumbel para la componente de error en la utilidad), es el llamado *logsum*. En los modelos tipo logit, el valor esperado de la máxima utilidad aleatoria es el denominador de la probabilidad de elección.

2.3. Extensiones

Dentro del contexto de las medidas del tipo gravitacional o de oportunidades acumuladas, el número de oportunidades alcanzables es en algunos casos modificado para representar algunos fenómenos de interacción entre agentes. Por ejemplo, Baradaran y Ramjerdi (2001) postulan una corrección por aglomeración a través de promedios espaciales, siendo el número de oportunidades en una zona influido por las oportunidades en las zonas cercanas.

Por otro lado, también existen modificaciones que intentan capturar el hecho de que las oportunidades disponibles en una determinada localización no alcancen para satisfacer a todos los interesados. Por ejemplo, la aproximación inicial de Weibull (1976), que estudia la accesibilidad a empleos, utiliza como “tamaño de la actividad” el cociente entre las plazas disponibles y los trabajadores potenciales de cada zona. En Knox (1980), se propone una corrección que da cuenta de las oportunidades per cápita, la que requiere determinar los “usuarios potenciales” de cada actividad.

Así, las medidas de accesibilidad pueden incorporar el efecto de la competencia existente por las oportunidades. El argumento es que el atractivo de cada oportunidad disminuye conforme aumenta el número de personas que puede alcanzarla, pues la probabilidad de satisfacer la necesidad baja. Es sencillo imaginar esta dinámica en el fenómeno laboral, donde, mientras mayor sea el número de candidatos para un empleo, es menor la probabilidad de ser seleccionado.

En este sentido, se ha considerado (Shen, 1998; Cheng y Bertolini, 2013) para el cálculo de accesibilidad, contar las “oportunidades reales” dividiendo en cada zona el volumen total por la “demanda potencial”, correspondiente, por ejemplo, en el contexto laboral, a los trabajadores que pueden alcanzar la actividad. De esta forma, la medida de accesibilidad toma la forma siguiente:

$$A_i = \sum_j \frac{X_j f(d_{ij})}{D_j}, \quad D_j = \sum_k P_k f(d_{kj}) \quad (5)$$

En la que la demanda potencial se calcula de forma análoga al potencial de oportunidades.

3. ESPECIFICACIÓN DE MEDIDAS

Dentro de la tipología presentada en la sección anterior, este artículo se referirá a medidas de accesibilidad potencial, tanto del tipo de oportunidades acumuladas como gravitacionales. Se establecerá una comparación de la aplicación de las funciones de decaimiento por distancia y se estudiará el efecto de introducir la corrección por competencia.

Se examinará el uso del modelo de análisis estratégico comúnmente usado en la planificación de sistemas de transporte (ESTRAUS, de Cea *et al.*, 2003), por lo que la zonificación de la ciudad de Santiago y la topología de las redes de transporte son las vigentes al momento de escribir este artículo. Los ejemplos simulados corresponden a un escenario referencial proyectado para el año 2030.

Dado que las medidas de accesibilidad deben precisar las dimensiones temporal, de oportunidades y de tipo de usuario, nos centraremos específicamente en la accesibilidad a fuentes de empleo en transporte público en horario punta mañana, lo que permite representar la experiencia de los usuarios que no disponen de vehículo privado. Para caracterizar la accesibilidad a fuentes de empleo, lo ideal es conocer la cantidad de empleos por zona. Si no se dispone de registros administrativos con el nivel de detalle suficiente para conocer directamente la localización de empleos, es posible, por ejemplo, suponer que las oportunidades están bien descritas por la superficie observada o proyectada correspondiente a un determinado uso de suelo (comercial, de servicios, residencial, industrial o una combinación de estas). En este caso, de forma similar a Bocarejo y Oviedo (2012), se obtendrá de la simulación el total de viajes laborales atraídos por zona. Esto significa que se entiende el destino de cada viaje como una oportunidad laboral en esa zona.

También es necesario definir la noción de distancia que se utilizará en los ejemplos. Esta variable puede ser representada tanto por la distancia geográfica (medida en línea recta o sobre la red), como por el tiempo destinado al desplazamiento, o también, como la composición de tiempos y costos en un costo generalizado de transporte. Para los ejemplos siguientes se utilizó como medida de distancia el tiempo total de viaje en transporte público en horario punta mañana, proveniente de la simulación. Este total se considera compuesto de tiempo de viaje en vehículo, de acceso (caminata) y de espera en los modos utilizados (bus, metro, taxi colectivo y sus combinaciones). Para cada par, la distancia será el tiempo total mínimo entre los modos de transporte público disponibles y el tiempo de viaje a pie.

Respecto de las funciones de decaimiento por distancia, se compararán los resultados de una medida de oportunidades acumuladas, una gravitacional del tipo de potencia y una log-logística (Páez *et al.*, 2012). Las medidas de accesibilidad quedan expresadas de la siguiente manera:

$$a) \text{ Oportunidades acumuladas (OA): } Acc_i = \sum_j Ops_j \cdot \delta_{ij}^D \quad (6)$$

$$b) \text{ Gravitacional, de potencia (GP): } Acc_i = \sum_j Ops_j \cdot t_{ij}^{-n} \quad (7)$$

$$c) \text{ Gravitacional, "log-logística" (GL): } Acc_i = \sum_j Ops_j \left(1 + \left(\frac{t_{ij}}{t_m} \right)^\beta \right)^{-1} \quad (8)$$

Donde Ops_i son las oportunidades laborales en la zona i , y D , n , t_m y β son parámetros. Las medidas de accesibilidad que incluyen competencia, para cada función f , serán expresadas como en la Ecuación 5. Así, las medidas corregidas toman la forma:

a) Oportunidades acumuladas, corregido (OAC):

$$Acc_i = \sum_j \frac{Ops_j}{Atr_j} \cdot \delta_{ij}^D, \quad Atr_j = \sum_i Tra_i \cdot \delta_{ij} \quad (9)$$

b) Gravitacional, de potencia, corregido (GPC):

$$Acc_i = \sum_j \frac{Ops_j}{Atr_j} \cdot t_{ij}^{-n}, \quad Atr_j = \sum_i Tra_i \cdot t_{ij}^{-n} \quad (10)$$

c) Gravitacional, “log-logístico”, corregido (GLC):

$$Acc_i = \sum_j \frac{Ops_j}{Atr_j} \left(1 + \left(\frac{t_{ij}}{t_m}\right)^\beta\right)^{-1}, \quad Atr_j = \sum_i Tra_i \left(1 + \left(\frac{t_{ij}}{t_m}\right)^\beta\right)^{-1} \quad (11)$$

Si bien la calibración de los parámetros específicos de las funciones de decaimiento por distancia excede el alcance de este trabajo, se establecieron valores referenciales para cada uno de ellos. Respecto del umbral requerido para la medida OA, se eligió usar 60 minutos, aproximadamente la mediana de los tiempos de viaje reportados en la Encuesta Origen Destino Santiago 2012. Este mismo valor fue elegido para t_m , lo que impone que una actividad localizada a 60 minutos de una determinada zona tiene la mitad de atractivo que una que se puede alcanzar instantáneamente¹. La definición de los exponentes β y n es, en este caso, referencial. Una estimación para n podría, por ejemplo, realizarse a través de la calibración de un modelo de distribución acotado en orígenes. Históricamente se ha considerado razonable, para las especificaciones de potencia, valores entre 0.5 y 3.0 (Hansen, 1959), notando que la accesibilidad al trabajo presenta los exponentes menores, asociados a un decaimiento más lento del atractivo respecto de otros propósitos de viaje, indicando una mayor disponibilidad a realizar viajes largos. Sobre la influencia de β en las especificaciones log-logísticas, valores altos asemejan la función f resultante a la de oportunidades acumuladas, mientras que valores bajos representan una relativa insensibilidad del atractivo respecto del tiempo de viaje. Las elecciones para los ejemplos siguientes ($n = 1$, $\beta = 4$), implican funciones f que se ven en la Figura 1. Discusiones recientes sobre la selección de parámetros para las funciones de decaimiento por distancia pueden encontrarse en Giannotti et al. (2022) y Kapatsila et al. (2023).

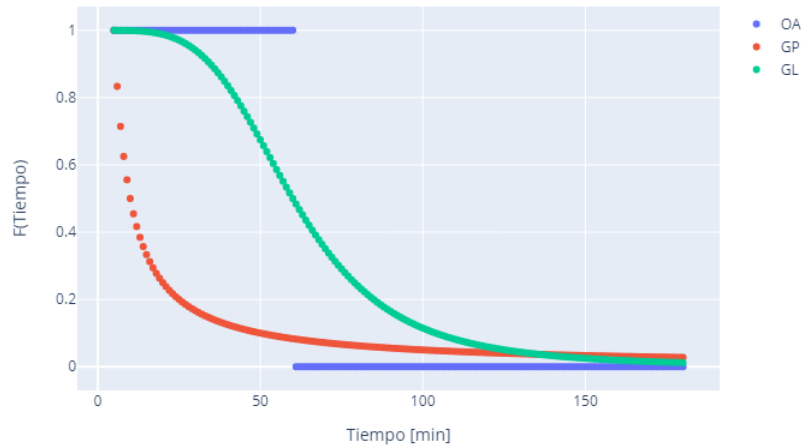


Figura 1 Comparación de funciones de decaimiento por distancia

¹ Esta misma consideración motiva las funciones de decaimiento llamadas de “vida media” (Osth et al., 2016). En este artículo se prefirió utilizar la forma log-logística, por su decaimiento más suave para distancias cortas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se mostrarán los resultados de la aplicación de las formulaciones anteriormente señaladas en un escenario simulado para el año 2030. La localización de trabajadores y empleos supuesta se presenta en la Figura 2.

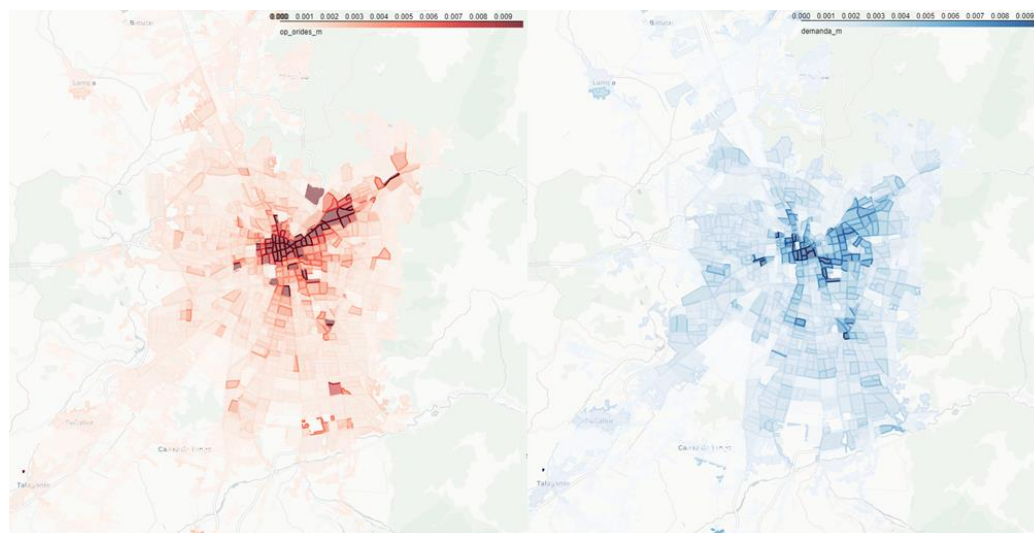


Figura 2 Densidades de empleos (izquierda) y trabajadores (derecha) según zona de análisis.

El análisis se centrará en las 34 comunas de la ciudad que están cubiertas por el sistema de transporte público integrado, excluyéndose a comunas periféricas, cuya interacción laboral con el núcleo urbano es de una relevancia menor, pudiendo acceder a oportunidades fuera del área de estudio (Knox, 1980). En esta área céntrica, la distribución de empleos muestra claramente el cono centro-oriental de la ciudad, y algunos subcentros de menor dimensión. La localización de trabajadores es consistente con el escenario de proyección de hogares por comuna, con una densidad elevada, aunque menos marcada en el oriente.

En el contexto de un diagnóstico de accesibilidad, en la Figura 3 se muestran los tres indicadores sin corrección descritos anteriormente, a través de un mapa en la columna izquierda, y del histograma de los valores de accesibilidad, normalizados por la accesibilidad máxima observada (a la que se le asigna un valor de 1) en la columna derecha. En la Figura 4 se muestran, de manera análoga, los resultados de la aplicación de los indicadores con corrección por competencia.

Al comparar entre sí, en primer lugar, los resultados de las distintas medidas de accesibilidad originales, se distinguen claramente las consecuencias del decaimiento relativamente acelerado de la función de potencia respecto de las otras dos. Según el indicador con impedancia inversamente proporcional a la distancia, las zonas con accesibilidad alta son sólo las más próximas al cono centro-oriental de Santiago. Por otro lado, el rol estructurante del transporte público mayor se distingue tanto usando las medidas de oportunidades acumuladas y log-logística, cuyo resultado es similar.

Por otra parte, el ajuste por competencia parece cambiar más drásticamente los resultados del indicador de oportunidades acumuladas, desplazándose el “centro” (entendido éste como el lugar

de mayor accesibilidad) hacia el norte. Esto tiene sentido, por cuanto el mayor volumen de trabajadores está en el sur de la ciudad, lo que indica que el norte es entonces, un lugar de menor “competencia”.

Adicionalmente a estas figuras, puede obtenerse la matriz de correlación entre las medidas zonales (correspondientes a las zonas del modelo de simulación estratégica utilizado), presentada en la Tabla 1. Es posible observar que las medidas son bastante coherentes entre sí ($\rho_{i,j} > 0.74$), y que existe una marcada semejanza entre las medidas de oportunidades acumuladas y la gravitacional con decaimiento “log-logístico” ($\rho_{OA,GL} = 0.98$). También puede notarse que la corrección de las medidas no altera en gran medida los resultados de su aplicación ($\rho_{OA,OAC} = 0.98$, $\rho_{GP,GPC} = 1.00$, $\rho_{GL,GLC} = 1.00$).

Las distribuciones de los valores resultantes de accesibilidad, para cada una de las seis medidas presentadas, son en cierto grado unimodales, a excepción de la medida de oportunidades acumuladas con corrección por competencia, que presenta una meseta con dos puntas. Esta corrección, en general, no altera de forma significativa la distribución de las medidas. Notar que, consistentemente con su decaimiento acelerado, las medidas con función de decaimiento de potencia muestran muy pocas zonas con valores cercanos al máximo.

Otra forma de comparar el desempeño de estas medidas es mediante la comparación de los resultados comunales. En la Figura 5 se muestran los ordenamientos comunales según las seis medidas de accesibilidad para las 34 comunas de Santiago consideradas en el análisis. Es posible apreciar que en su mayor parte los resultados son coherentes entre sí. Notar que existen comunas del norte de la ciudad (Conchalí, Renca) cuya posición relativa mejora al corregir el indicador de oportunidades acumuladas. Esto es consistente con lo observado anteriormente, por cuanto para los empleos en ese sector de la ciudad existe un menor grado de competencia. También es posible notar que la corrección por demanda para el indicador gravitacional inversamente proporcional mejora la posición relativa de las comunas de Las Condes y Vitacura. Esto puede deberse a la gran concentración de oportunidades en zonas de esas comunas.

Como se mencionó anteriormente, estos indicadores también pueden ser utilizados para comparar una situación base con una en la que exista un proyecto. La comparación en cada localización de las accesibilidades potenciales en las situaciones base y con proyecto es una manera de evaluar los efectos de la intervención complementaria a la mera agregación de los ahorros de tiempo. Nótese la diferencia de esta medida con la variación de los tiempos promedio de viaje: este último proceso requiere conocer el patrón de viajes $\{V_{ij}\}$ observado, mientras que las medidas acá propuestas no utilizan esta cantidad.

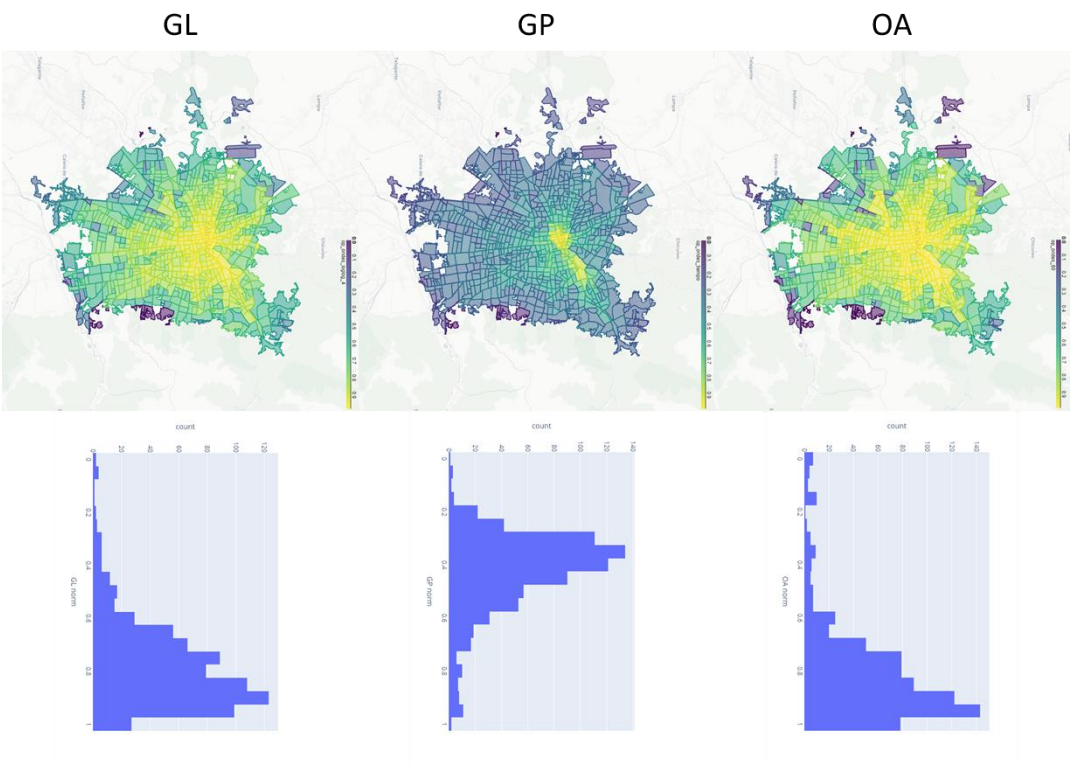


Figura 3 Diagnóstico de accesibilidad potencial al empleo a nivel de zona mediante indicadores OA, GI y GL.

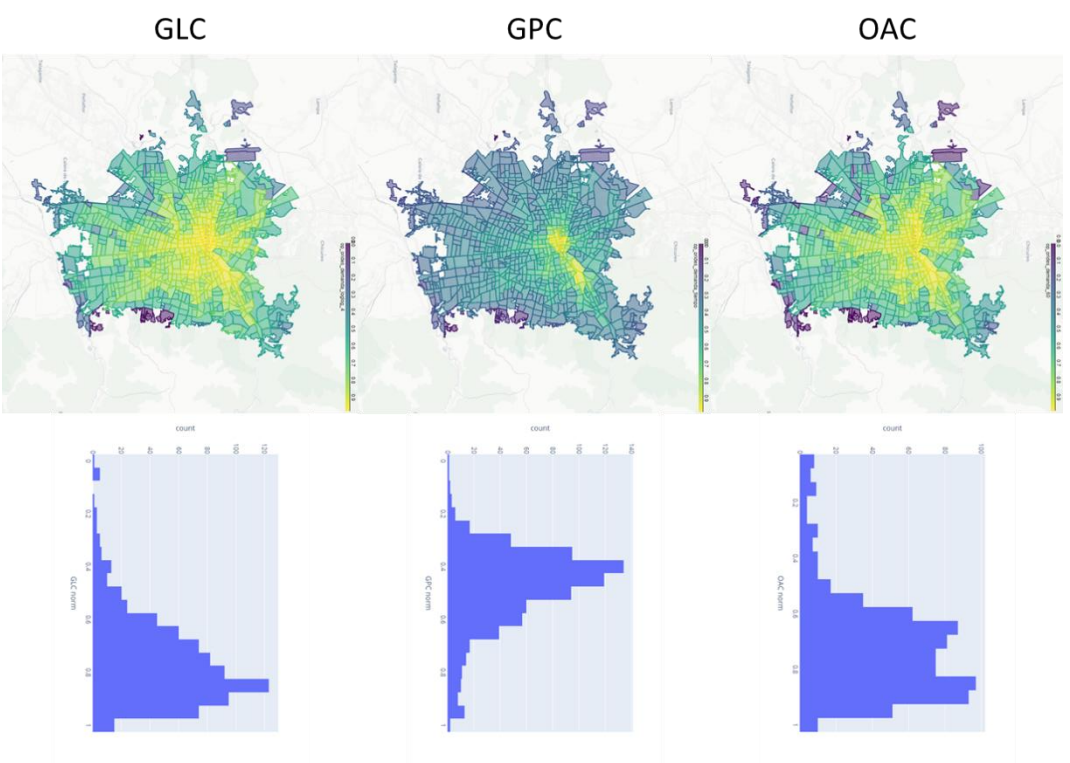


Figura 4 Diagnóstico de accesibilidad potencial al empleo a nivel de zona mediante indicadores OAC, GPC y GLC.

Tabla 1 Matriz de correlación entre medidas

	OA	GP	GL	OAC	GPC	GLC
OA	1.00					
GP	0.74	1.00				
GL	0.98	0.82	1.00			
OAC	0.98	0.81	0.98	1.00		
GPC	0.76	1.00	0.84	0.84	1.00	
GLC	0.97	0.84	1.00	0.98	0.86	1.00

Para evaluar el desempeño de estos indicadores como complemento a la evaluación de proyectos, se supuso la implementación de una cartera centrada en transporte público, operativa en el año 2030, consistente en aumentos de capacidad y nuevos servicios, en los ejes ilustrados en la Figura 6. La comparación a nivel comunal de la accesibilidad potencial entre las situaciones base y proyecto se presenta en la Figura 7, específicamente para las medidas que utilizan una función de decaimiento log-logística (GL a la izquierda y GLC a la derecha). Los cambios en las medidas que se aprecian en los mapas son consistentes con el énfasis de los proyectos elegidos en el sector poniente de la ciudad y la entrada en operación de una línea de metro hacia el sector nororiente. En la versión sin incorporación de competencia se aprecia que las ganancias son mucho mayores a las pequeñas pérdidas (cercanas a cero) de accesibilidad, generadas únicamente por un empeoramiento de los tiempos de viaje por congestión, mientras que la versión que incorpora la corrección por competencia permite apreciar pérdidas de accesibilidad potencial de mayor magnitud debido a que las oportunidades a las que estas comunas podían acceder antes de la implementación de los proyectos eran alcanzables por menos personas y por tanto eran más atractivas.

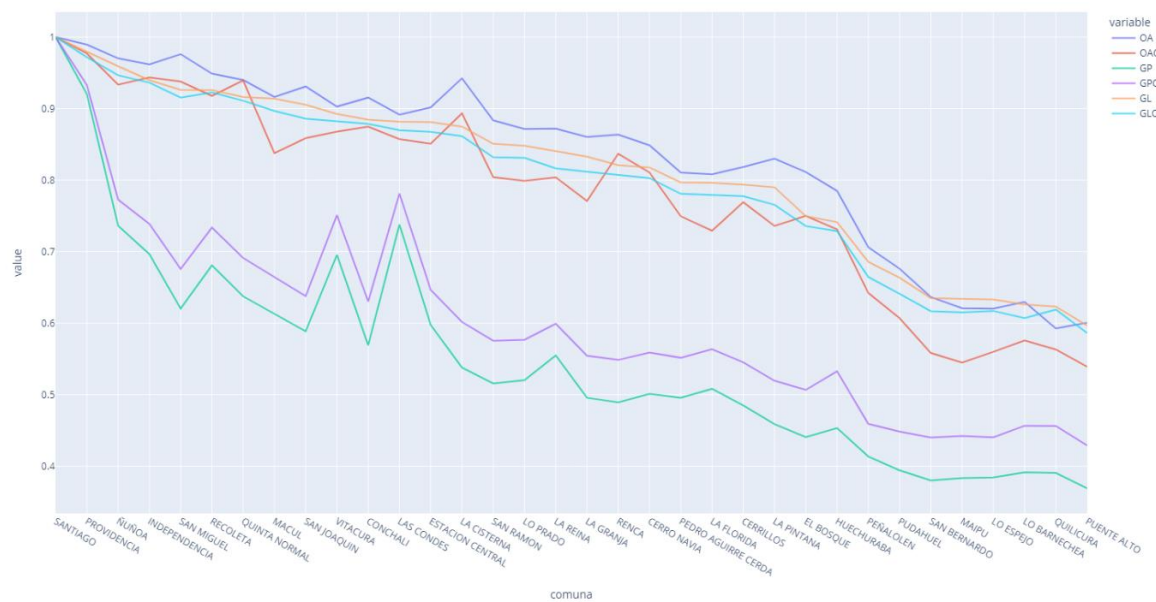


Figura 5 Accesibilidades comunales según las seis medidas

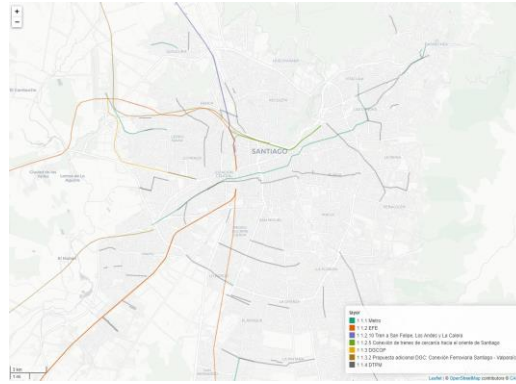


Figura 6 Cartera de proyectos simulada en operación el 2030

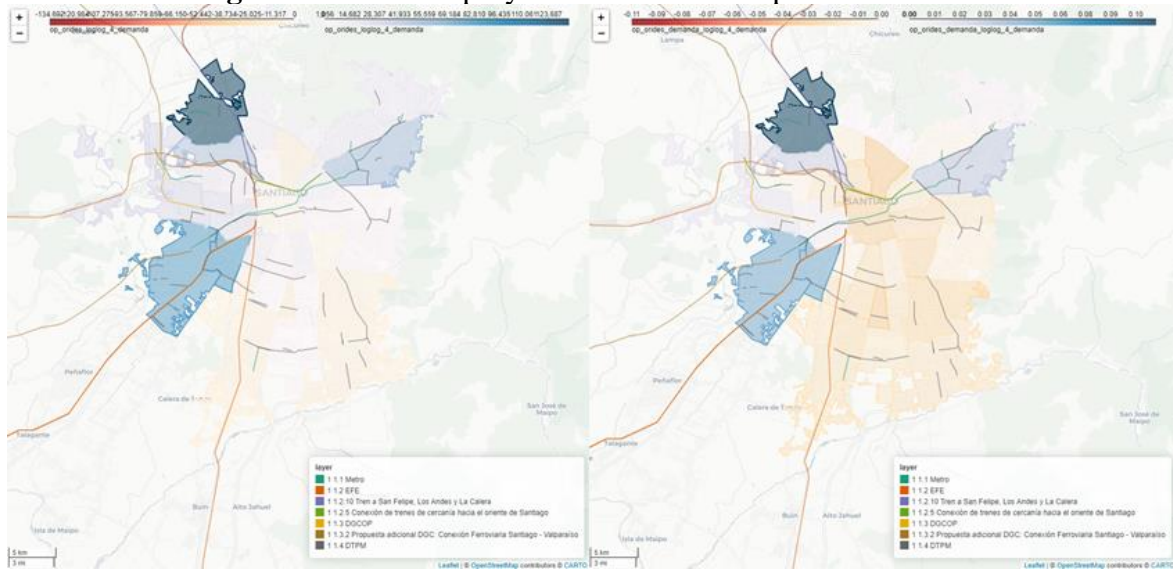


Figura 7 Diferencias de accesibilidad a nivel comunal al aplicar proyectos de transporte enfocados en la zona poniente, medida GL (izquierda) y medida GLC (derecha).

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado un enfoque metodológico para incorporar la dimensión de accesibilidad a los análisis del sistema urbano de transporte, ilustrado con un ejemplo para la ciudad de Santiago. El ejemplo estudia específicamente la accesibilidad a fuentes de trabajo mediante el transporte público. Se escogieron tres funciones distintas de decaimiento por distancia y se formularon medidas que alternativamente incorporan u omiten no una forma de corrección por competencia en el mercado laboral.

Los indicadores de accesibilidad pueden ser utilizados dentro del contexto del diagnóstico, instancia en la que pueden orientar la formulación de intervenciones (por ejemplo, evidenciando la existencia de brechas), así como también pueden proveer un análisis adicional sobre la localización de los beneficiados por un proyecto determinado.

Al comparar estas seis medidas, se observa que los resultados son coherentes entre sí. Se puede afirmar que los dos aspectos más distintivos que guían la selección de una medida son la facilidad de comprensión (la medida de oportunidades acumuladas OA es de explicación sencilla) y lo

pronunciado del decaimiento del potencial (en que la medida gravitacional GI es la que decae más rápidamente).

Para la corrección por competencia, es necesario construir una medida análoga a accesibilidad, pero basada en la interacción entre un destino determinado y los distintos orígenes: el volumen potencial de trabajadores atraídos. Este indicador de atractividad representa la facilidad de las oportunidades de ser alcanzadas. Vista de forma aislada, esta atractividad podría utilizarse, por ejemplo, para evaluar localizaciones alternativas de polos de servicios o empleos.

Los modelos de simulación de transporte comúnmente utilizados permiten distinguir entre usuarios de distintas categorías de ingreso. En particular, dentro de los indicadores de atractividad, es posible identificar separadamente los volúmenes potencialmente atraídos según el ingreso de los trabajadores. El análisis específico de los usuarios de bajos ingresos permitiría detectar brechas en el acceso a fuentes de empleo y visibiliza las consecuencias de la elección de distintos patrones de desarrollo urbano. Para refinar este análisis se requiere además, definir cuáles son las oportunidades reales de empleo a las que estos habitantes pueden acceder.

El disponer de la accesibilidad potencial medida para los habitantes de distintos lugares de la ciudad sugiere también como trabajo futuro estudiar la equidad en el acceso a los bienes públicos. En este sentido, vale la pena reflexionar sobre el uso de indicadores utilizados para estudiar la distribución de ingreso.

La comparación entre distintas formas funcionales presentada en este trabajo puede refinarse estudiando, para cada una de ellas, su dependencia de los parámetros específicos. Además, puede argumentarse que la variable de separación relevante no se base ni en las mediciones de distancia ni de tiempo, sino que en las percepciones de ambas dimensiones.

Se propone incorporar al proceso de planificación un punto de vista que estudia los cambios en bienestar desde una perspectiva distinta y complementaria a la movilidad. El enfoque presentado permite enriquecer los diagnósticos, siendo un antecedente valioso para la formulación de proyectos, y puede también apoyar la evaluación de los mismos. El análisis de accesibilidad habilita la proposición y el estudio de los efectos de intervenciones cuyos objetivos principales sean distintos al ahorro de tiempo, acciones que desde el punto de vista del análisis tradicional (cambio en el consumo de recursos) no necesariamente evidencian sus ventajas.

REFERENCIAS

Baradaran, S., Ramjerdi, F. (2001) Performance of Accessibility Measures in Europe. En Journal of Transportation and Statistics, 4, U.S. Department of Transportation 31-48.

Beckmann, M., Golob, T., Zahavi, Y. (1983) Travel probability fields and urban spatial structure: 1. Theory, Environment and Planning A, 15, 593-606.

Ben-Akiva, M., Lerman, S. (1979) Disaggregate travel and mobility choice models and measures of accessibility. En Hensher, D., Stopher, P. (Eds.), Behavioural Travel Modelling. Croom Helm, Andover, Hants, 654-679.

Benenson, I., Martens, K., Rofé, Y., Kwartier, A. (2010) Public transport versus private car GIS-based estimation of accessibility applied to the Tel Aviv metropolitan area, *Annals of Regional Science*, 47, 499-515.

Bocarejo, J., Oviedo, D. (2012) Transport accessibility and social inequities: a tool for identification of mobility needs and evaluation of transport investments, *Journal of Transport Geography*, 24, 142-154.

Cheng, J., Bertolini, L. (2013) Measuring urban job accessibility with distance decay, competition and diversity. *Journal of Transport Geography* 30, 100–109.

De Cea, J., Fernández, E., Dekock, V., Soto, A. y Friez, T. (2003). ESTRAUS: a computer package for solving supply-demand equilibrium problems on multimodal urban transportation networks with multiple user classes. *Proceedings of the Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington, DC.

Geurs, K., van Wee, B. (2004) Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions, *Journal of Transport Geography* 12, 127-140.

Giannotti, M., Tomasiello, D., Bittencourt, T. (2022) The bias in estimating accessibility inequalities using gravity-based metrics. *Journal of Transport Geography* 101 103337

Grengs, J. (2015) Nonwork accessibility as a social equity indicator. *International Journal of Sustainable Transport* 9(1), 1–14.

Guzmán, L., Oviedo, D., Rivera, C. (2017) Assessing equity in transport accessibility to work and study: The Bogotá region, *Journal of Transport Geography* 58, 236-246.

Hagerstrand, T. (1970) What about people in regional science? *Papers of the Regional Science Association*, 24, 7-21.

Handy, S., Niemeyer, D. (1997) Measuring accessibility: an exploration of issues and alternatives, *Environment and Planning A*, 29, 1175-1194.

Hansen, W. (1959) How Accessibility Shapes Land Use, *Journal of the American Institute of Planners*, 25:2, 73-76.

Hanson, S., Schwab, M. (1987) Accessibility and intraurban travel, *Environment and Planning A*, 19, 735-748.

Ingram, D. (1971) The concept of accessibility: A search for an operational form, *Regional Studies*, 5:2, 101-107.

Kapatsila, B., Santana, M., Gris , E., El-Geneidy, A. (2023) Resolving the accessibility dilemma: Comparing Cumulative and Gravity-based Measures of Accessibility in Eight Canadian Cities. *Journal of Transport Geography* 107, 103530.

- Kenyon, S., Lyons, G., Rafferty, J. (2002) Transport and social exclusion: investigating the possibility of promoting inclusion through virtual mobility. *Journal of Transport Geography* 10, 207–219.
- Knox, P. (1980) Measures of accessibility as social indicators: a note, *Social Indicators Research*, 7, 367-377.
- Koenig, J. (1980) Indicators of urban accessibility: theory and application. *Transportation*, 9, 145-172.
- Lucas, K. (2012) Transport and social exclusión: Where are we now?, *Transport Policy*, 20, 105-113.
- Martínez, F. (1995) Access: the transport-land use economic link, *Transportation Research B*, 29, 457-470.
- Miller, E. (2020) Measuring Accessibility: Method and Issues, *International Transport Forum Discussion Papers*, No. 2020/25, OECD Publishing, Paris.
- Miller, J. (1999) Measuring space-time accessibility benefits within transportation networks: basic theory and computational procedures, *Geographical Analysis*, 31, 1-26.
- Morris, J., Dumble, P., Wigan, M. (1979) Accessibility indicators for transport planning, *Transportation Research A*, 13A, 91-109.
- Osth, J., Lyhagen, J., Reggiani, A. (2016) A new way of determining distance decay parameters in spatial interaction models with application to job accessibility analysis in Sweden, *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 16, 344-363.
- Páez, A., Scott, D., Morency, C. (2012) Measuring accessibility: positive and normative implementations of various accessibility indicators. *Journal of Transport Geography* 25, 141–153.
- Shen, Q. (1998) Location characteristics of inner-city neighbourhoods and employment accessibility of low-wage workers. *Environment and Planning B* 25 (3), 345–365.
- Vickerman, R. (1974) Accessibility, attraction and potential: a review of some concepts and their use in determining mobility, *Environment and Planning A*, 6, 675-691.
- Weibull, J. (1976) An axiomatic approach to the measurement of accessibility, *Regional Science and Urban Economics*, 6, 357-379.
- Weibull, J. (1980) On the numerical measurement of accessibility. *Environment and Planning A*, 12, 53–67.
- Williams, H. (1976) Travel demand models, duality relations and user benefit analysis, *Journal of Regional Science* 16, 147-166.
- Wu, B., Hine, J. (2003) A PTAL approach to measuring changes in bus service accessibility, *Transport Policy*, 10, 301– 320.