

SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRÁFICA Y NUEVOS DATOS EN EL ESTUDIO DE LA ACCESIBILIDAD EN ESPACIOS METROPOLITANOS¹

Dr. Juan Carlos García Palomares (**)
Profesor Titular (*)

Msc. Borja Moya-Gómez
Estudiante de Doctorado (*)

Dr. Javier Gutiérrez Puebla
Catedrático (*)

(*) Departamento de Geografía Humana.
Universidad Complutense de Madrid
tGIS-Grupo de Investigación "Transporte, infraestructuras y territorio"
(**) Contacto: Teléfono +34 91 394 5949, jcgarcia@ghis.ucm.es

RESUMEN

En esta comunicación tenemos como objetivo aproximarnos a la accesibilidad por carretera en espacios metropolitanos, introduciendo la variación temporal en las velocidades en la red a lo largo del día como consecuencia de la congestión. Para ello se usa un Sistema de Información Geográfica (GIS) y una red de carreteras con información de velocidades reales a lo largo del día, obtenidas a partir de navegadores GNSS y de smartphones (proviene de la empresa TomTom). Como área de estudio se ha utilizado el área metropolitana de Madrid. Los resultados muestran las variaciones de la accesibilidad a lo largo del día. Esto permite conocer el impacto de la congestión viaria, mostrando la intensidad en la pérdida de accesibilidad según horas y las diferencias espaciales.

1. Introducción

Una de las aplicaciones que tradicionalmente se ha dado a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es el estudio de los impactos territoriales que tienen las infraestructuras de transporte. Para ello se han usado indicadores de accesibilidad, que tratan de expresar la facilidad con que las actividades pueden ser alcanzadas desde una localización dada y utilizando un determinado sistema de transporte (Morris et al, 1979). La medida de la accesibilidad es utilizada para analizar el rendimiento de la interacción entre redes de transporte, ordenación territorial y sociedad, y para conocer los impactos que tienen, por ejemplo, las actuaciones sobre las redes de transporte, ya sea a través de la construcción de nuevas infraestructuras o implantación de medidas sobre ellas.

En las ciudades, la distribución desigual y cambiante de la accesibilidad sobre el espacio, ayuda a explicar las pautas del desarrollo urbano, la distribución de los usos del suelo y la localización de las distintas actividades. Las condiciones de accesibilidad determinan ventajas locacionales de un espacio en relación a otros. Los espacios con buenas condiciones de accesibilidad son más atractivos para la inversión que aquellos en las que los costes de interacción son elevados, tanto para empresas como para la población.

¹ Este trabajo está financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España mediante el proyecto SPILLTRANS (TRA2011-27095).

Las metodologías empleadas en SIG para el análisis de la accesibilidad se apoyan en la identificación de escenarios y el análisis de los cambios entre cada uno de ellos. Saber cómo cambia la accesibilidad en diferentes escenarios permite medir los impactos tanto de las diferentes políticas de transporte y/o territoriales. Es posible conocer los efectos que tienen cambios de las características de las redes de transporte, como la construcción de nuevas infraestructuras de transporte, nuevas políticas y regulaciones en el transporte, o la evolución de los flujos del tráfico y los niveles de servicio de la red. Pero a la vez, cambios en la localización de las actividades económicas (nuevas actividades, la relocalización de las existentes o el cambio de la atractividad de los destinos, entre otros) van a influir también en la accesibilidad. El procedimiento habitual para medir los impactos de esos cambios sobre la accesibilidad consiste en la comparación de los valores y su distribución espacial antes y después del cambio a estudiar. Por ejemplo, para valorar el impacto de la construcción de una autopista, se compara un escenario con y sin esa autopista, pero se mantiene constante el resto de componentes que no quieren ser estudiados (en este caso los cambios en la localización de las actividades). De este modo, se aísla el efecto del cambio en la red (Gutiérrez et al, 2011).

Esa misma metodología, apoyada en escenarios, ha sido usada para estudiar los efectos de la congestión en la accesibilidad diaria de los espacios urbanos. En este caso se comparan dos escenarios tipo: un escenario de tráfico en hora valle (con flujo libre) y otro de tráfico en hora punta (con congestión) (Vandenbulcke et al., 2009). Sin embargo, con esta metodología se capturan únicamente las dos situaciones extremas en el funcionamiento de la red, pero no considera el cambio temporal que se produce lo largo del día en el rendimiento de las infraestructuras. Para llevar correctamente el estudio de las variaciones de la accesibilidad diaria en espacios urbanos debe introducirse una aproximación dinámica, que incorpore la secuencia temporal de las velocidades en la red como consecuencia de los incrementos y disminuciones en el volumen de tráfico.

Hasta ahora, uno de los principales problemas para el uso de medidas de la accesibilidad dinámica es la dificultad para obtener la información necesaria sobre las velocidades. La falta de datos, el hecho de trabajar con velocidades estimadas o de poca fiabilidad, puede llevar a distorsionar los resultados y extraer conclusiones erróneas. Sin embargo, hoy las nuevas tecnologías permiten obtener información hasta hace muy poco no capturable, además de poder trabajar con bases de datos cada vez mayores. Gracias a los dispositivos con tecnología de localización (GPS), se puede tener información fiable sobre la variación de las velocidades observadas en el rendimiento de las infraestructuras (Quiroga, 2000). El uso de estas nuevas fuentes de información y la mayor capacidad de cálculo de los ordenadores permiten profundizar en el estudio de la accesibilidad dinámica en las grandes áreas metropolitanas.

2. Objetivo

En esta comunicación tenemos como objetivo aproximarnos a la accesibilidad por carretera en espacios urbanos introduciendo la variación temporal en las velocidades en la red a lo largo del día como consecuencia de la congestión. El objetivo es dar un salto desde una accesibilidad medida para escenarios estáticos a una accesibilidad dinámica. Para ello se propone introducir nuevas fuentes de datos (procedente de *big data*), incorporando redes de carreteras con información temporal del rendimiento de cada arco.

Se utiliza información procedente TomTom® Historical Speed Profiles y se incorpora en un entorno SIG con el fin de calcular cuál es la variación de la accesibilidad cada 15 minutos a lo largo de un día tipo entre semana (miércoles). Para testar la metodología propuesta se usa como área de estudio la Comunidad de Madrid (España). Los resultados muestran las diferencias tanto en la variación global (mediante su perfil de accesibilidad) como en la distribución territorial y temporal.

3. Método, datos y área de estudio

3.1 El área de estudio

El área de estudio es la Comunidad Autónoma de Madrid, que incluye el área metropolitana de la ciudad de Madrid. En total se trata de un espacio de 8.469 km², constituido por 178 municipios. En esta comunicación se ha trabajado con la distribución de la población en 2006, cuando la Comunidad de Madrid contaba con una población total de algo más de 6 millones de habitantes. El área metropolitana de Madrid presenta una fuerte concentración de la población en el municipio central, que representa el 53% de la población total, mientras su área apenas representa un 7% de la superficie de la Comunidad. Junto al municipio de Madrid, las zonas del sur y el este metropolitanos son los espacios más densamente poblados, frente al norte y sobre todo el oeste que presentan las menores densidades de población y las áreas residenciales más dispersas (Figura 1).

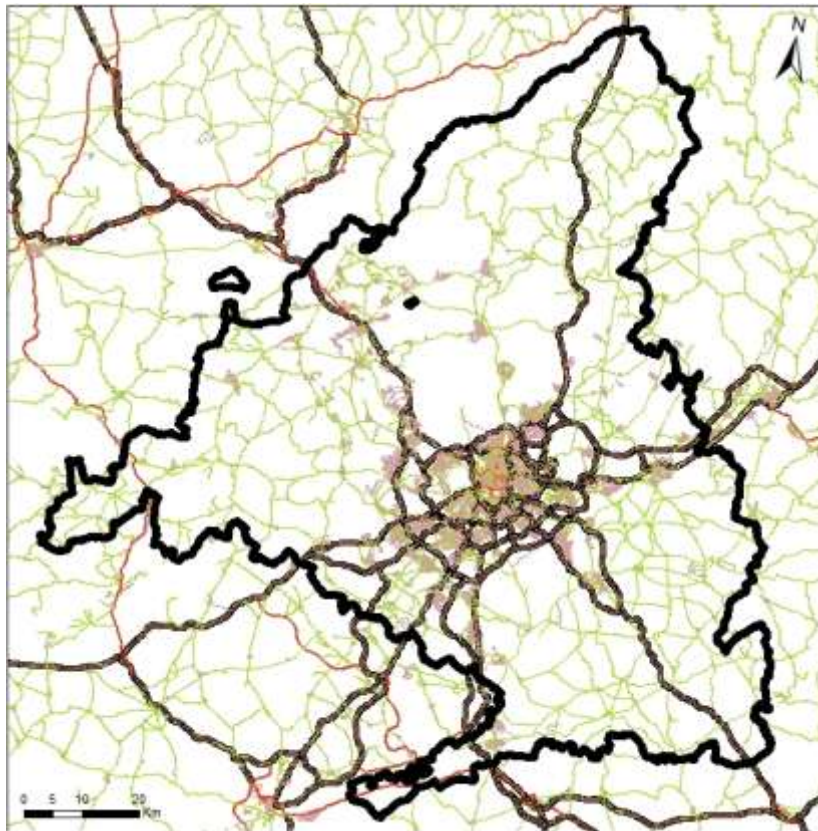


Figura 1: Comunidad de Madrid

3.2 Los datos

Como se ha señalado, la red viaria utilizada es la proporcionada por la empresa TomTom®, en su versión de Marzo 2013, junto con la información de los Historical Speed Profiles de los años 2011 y 2012. En esta base de datos la información de velocidades se ha obtenido como la media de tiempos de viajes reportados por usuarios mediante sus dispositivos de navegación (navegadores GNSS) y de mediciones a través de smartphones. Para cada arco con perfil de velocidad se han tomado al menos 1.000 mediciones para calcular los valores de velocidad medios². Dado que la red original es muy detallada (incluye accesos a

² <https://www.tomtom.com>

aparcamientos, calles peatonales, calles residenciales o caminos rurales, por ejemplo), se han omitido todos aquellos arcos que se presupone que soportan poco tráfico.

Los perfiles de velocidad están definidos como el porcentaje respecto a la velocidad del arco en flujo libre para cada 5 minutos. La base de datos contiene hasta 98 perfiles predefinidos de las variaciones de la velocidad sobre la situación de flujo libre. A modo de ejemplo, en la Figura 1 se muestra un uno de los perfiles, que presenta una fuerte congestión en la primera hora de la mañana (reducciones de la velocidad en ese arco de hasta un 50% a las 8:15 de la mañana) y un pico muy suave en la tarde. En la Figura 2 se muestran los 98 perfiles considerados.

Los perfiles se almacenan en una tabla externa a la red, mientras en la red se va identificando cada arco con su perfil. Esta estructura de datos ahorra memoria y coste computacional, y está preparada para ser usada en el software SIG utilizado. Así, tanto un arco de una autopista como un arco de una calle de la ciudad pueden poseer el mismo perfil de velocidad, pero tener diferentes velocidades en un mismo instante, puesto que sus velocidades en flujo libre son diferentes.

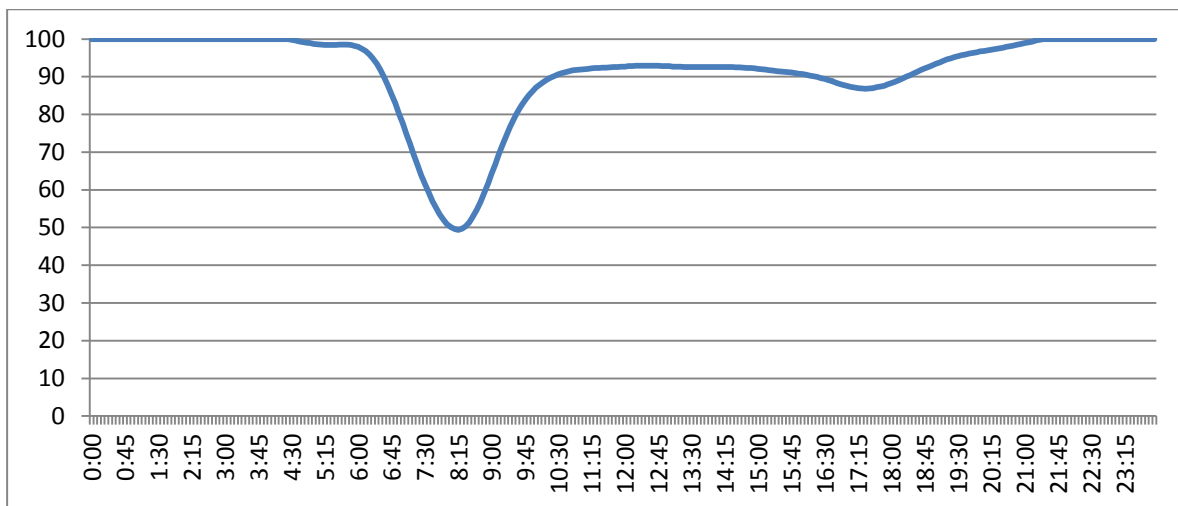


Figura 1: Ejemplo de un perfil de velocidades

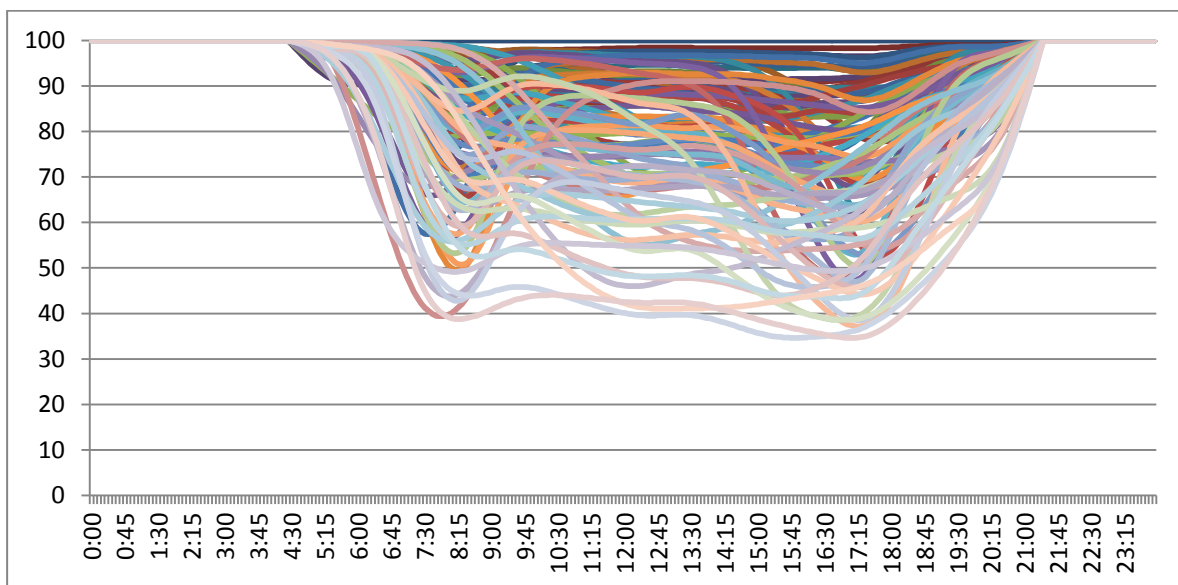


Figura 2: Los 98 perfiles de velocidades de TomTom

Para el cálculo de los indicadores de accesibilidad es necesario considerar unidades espaciales tanto de origen como de destino de los desplazamientos. Para ello se ha partido de una malla de referencia de la Agencia Europea de Medioambiente (EEA)³, que trabaja con celdas de 1 km². Sin embargo, estimar la accesibilidad para las celdas de esta malla supone una carga computacional excesiva. Por eso se ha decidido usar una agrupación intermedia, con celdas de 4km² obtenidas de la malla original. El uso de una malla regular permite superar el problema de la unidad espacial modificable (MAUP). Al final, se ha trabajado con 1.729 zonas de origen y destino dentro de la Comunidad (el total usado para eliminar efectos de borde asciende a 4.314 incluyendo las zonas fuera de la comunidad pero accesibles en menos de 15 minutos en flujo libre desde la Comunidad). Este número es resultado de la agrupación señalada y de eliminar aquellas celdas que no disponen de ningún arco de la red en su área (quedarían desconectadas). En cualquier caso, los orígenes y destinos considerados representan el 99.8 de la población del total del área de estudio.

3.3 El cálculo del indicador de accesibilidad

El indicador de accesibilidad utilizado es el indicador de potencial económico o de mercado. Desde los trabajos pioneros de Harris (1954) y Hansen (1959), este indicador ha sido ampliamente utilizado en diferentes contextos espaciales (ver, por ejemplo, Bruinsma y Rietveld, 1998; Muhammad et al., 2008). Este indicador relaciona la accesibilidad de una localización directamente con el número y tamaño de las oportunidades disponibles e inversamente con la distancia necesaria para alcanzar esas oportunidades. Su formulación es la siguiente:

$$P_i = \sum_{j \in N} D_j \cdot f(c_{ij}); \forall i \in N \quad (1)$$

En la cual: A_i es el valor del indicador de potencial de la zona i ; D_j es el potencial de la zona j ; $f(c_{ij})$ es una función de *distance-decay*, c_{ij} es la impedancia del viaje entre la zona i a la zona j ; y N es el conjunto de zonas de la área de estudio.

La importancia de los destinos (el potencial de la zona) se puede representar con distintas variables, como la población, el empleo o la producción, dependiendo del objetivo del estudio. En este caso hemos usado el total de población para 2006 según Eurostat⁴ en cada una de las celdas de la malla de 4 km².

La estimación de la componente del transporte es esencial en el estudio de la accesibilidad. Tradicionalmente, la impedancia ha sido medida como un valor único y constante para cualquier relación origen-destino y escenario de cálculo (que suele corresponder a la ruta de menor coste). El cálculo de la impedancia de forma tradicional (estática) es definido por la ecuación:

$$c_{ij} = \sum_{e \in E} \alpha_{eij} \cdot c_e; \forall ij \in G \quad (2)$$

³ European Environment Agency (2007) EEA reference grids. 9B755D9F-8B6B-4CE0-9270-0963E10B2FC8. Accessed 20 Jan 2014

⁴ Eurostat (2007)

http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/gisco_Geographical_information_maps/popups/references/population_distribution_demography

Donde c_{ij} es la impedancia del viaje entre la zona i y la zona j , cuyo valor es invariable a lo largo del tiempo; α_{eij} es la variable binaria que indica si el arco e es usado en el viaje entre la zona i y la zona j ; c_e es la impedancia del arco e , el cual esta predeterminado y es constante; G es el conjunto de viajes de todas las relaciones origen-destino; y E es el conjunto de arcos de la red de la área de estudio.

Sin embargo, en esta comunicación, en la ecuación 1 se han implementado impedancias que se obtienen por métodos dinámicos. El cálculo de las impedancias dinámicas se muestra en la siguiente ecuación:

$$c_{ij}^t = \sum_{m \in M} \sum_{e \in E} \alpha_{eij}^{tm} \cdot c_e^m ; \forall ij \in G, t \in T \quad (3)$$

En el cual: c_{ij}^t es la impedancia que se experimentará viajando de la zona i a la zona j , y empezando en el instante t ; α_{eij}^{tm} es la variable binaria que indica si el arco e , empezando su uso en el instante m , es usado por el viaje entre la zona i y la zona j que ha empezado en el instante t ; c_e^m es la impedancia esperada del arco e , al empezar su uso en el instante m ; T es el conjunto de instantes de inicio de viajes; G es el conjunto de viajes entre cualquier zona de la área de estudio; E es el conjunto de arcos de la red de la área de estudio; y M es el conjunto total de instantes posibles dentro del escenario.

Como función de distance-decay en el cálculo del indicador de potencial ($f(c_{ij})$) en la ecuación 1) se ha usado una función del tipo exponencial, cuyo parámetro es -0,065. Su calibración se ha realizado usando el algoritmo de Furness modificado (Furness, 1965) con los datos de viajes por empleo entre municipios obtenidos del Censo de Población y Vivienda de España 2001⁵.

Finalmente, para el cálculo del perfil de accesibilidad global en Madrid se ha usado una media ponderada de la accesibilidad en cada una de las celdas por su población, siguiendo la siguiente ecuación:

$$Glob. Rel. A^t = \frac{\frac{\sum_{i \in N} A_i^t \cdot pob_i}{\sum_{i \in N} pob_i}}{\max\left(\frac{\sum_{i \in N} A_i^t \cdot pob_i}{\sum_{i \in N} pob_i}\right)} ; \forall t \in T \quad (4)$$

Donde, A_i^t es la accesibilidad en la zona i en el tiempo de inicio del viaje t , pob_i es la población en la zona i , N es el número de zonas en el área de estudio, y T es el conjunto de tiempos de inicio de viaje. El numerador de esta ecuación 4 es el valor medio de accesibilidad global para el instante t ($Rel. A^t$), mientras el denominador sería el valor de accesibilidad sin los efectos de la congestión (en una situación con flujo libre).

Los procesos de trabajo han sido realizados en el software SIG de ESRI© ArcGIS10.1. En dicho entorno, se ha usado la herramienta gratuita para ArcGIS StreetDataProcessingTools para crear el Network Dataset, mientras que las herramientas del Network Analyst han sido usadas para obtener las diferentes matrices O/D de impedancias para cada uno de los intervalos de 15 minutos. Dichas matrices han sido calculadas teniendo en cuenta los giros prohibidos y los sentidos de los arcos mediante el análisis de ruta jerárquico.

⁵ http://www.ine.es/en/censo2001/index_en.html.

3.4 La presentación de los resultados: cartografía animada

La accesibilidad puede ser mapeada utilizando diferentes tipos de representaciones cartográficas. Los ejemplos más comunes son los mapas de coropletas, los mapas de contorno o las superficies ráster y las representaciones en 3D. En este caso, en el texto, para la presentación cartográfica de los resultados se han obtenido mapas de superficies rásters, creados con la técnica de interpolación IDW (especificaciones: potencia 2 de función de declive, con 12 puntos de referencia). Sin embargo, la mejor forma de mostrar los resultados es mediante cartografía animada, que muestre la secuencia de cambios en la accesibilidad a los largo del tiempo.

4. Resultados

Los resultados muestran las variaciones de la accesibilidad a lo largo del día. Esto permite conocer el impacto de la congestión viaria en el área metropolitana de Madrid, mostrando la intensidad en la pérdida de accesibilidad según horas y las diferencias espaciales en el impacto de la congestión.

4.1 El perfil de accesibilidad diaria en Madrid

La Figura 3 muestra el perfil de la accesibilidad diaria en la Comunidad de Madrid, con una pérdida abrupta de accesibilidad a primera hora de la mañana (una reducción máxima de la accesibilidad global del 13.4% pasadas las 08.00 - pico de la mañana). A continuación, y durante unas 7 horas, la accesibilidad se recupera hasta situarse en una pérdida global del 7.5% respecto a la situación en flujo libre, hasta las 17.00 cuando se produce un pequeño pico en la tarde, cuya pérdida máxima llega a un 10% un poco antes de las 18.00 horas. Tras este segundo pico, la accesibilidad máxima se vuelve a recuperar antes de las 21.30 a la situación con flujo libre.

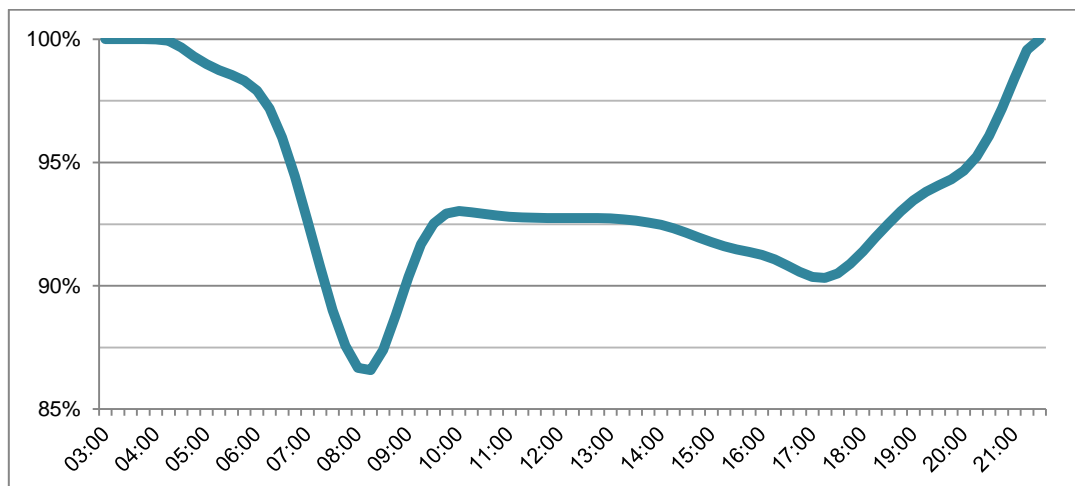
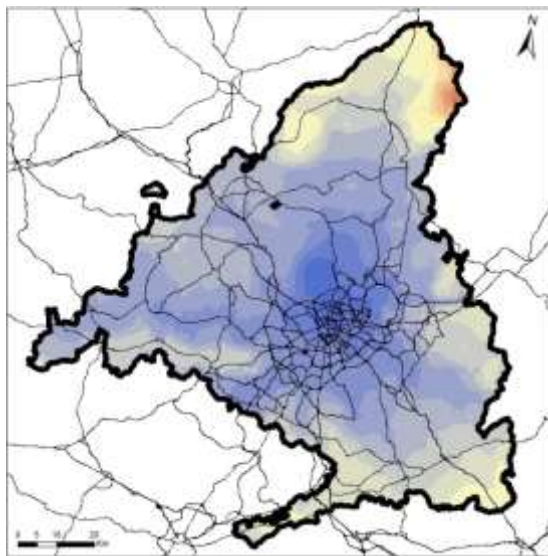


Figura 3: Perfil de accesibilidad en la Comunidad de Madrid

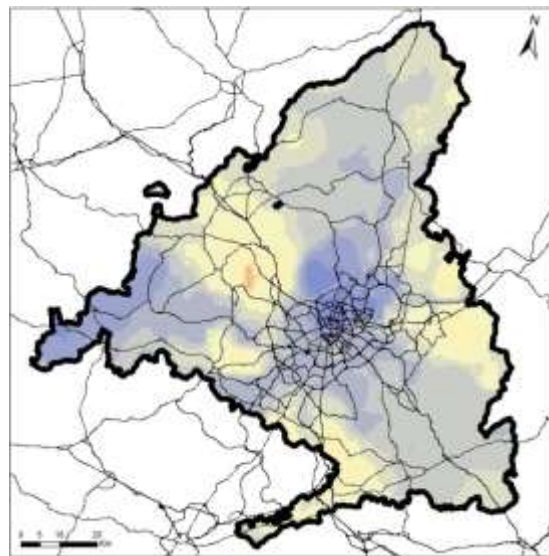
4.2. Distribución espacial de la accesibilidad diaria

Los cambios en los rendimientos de las vías, debidos a la congestión del tráfico, no tienen un impacto uniforme en el área de estudio (Figura 4). Con flujo libre, la distribución de la accesibilidad en Madrid tiende a mostrar una forma concéntrica, con los máximos de accesibilidad en el centro y una extensión de la mejor accesibilidad a la periferia a partir de los ejes radiales. Con los incrementos de la congestión, y la reducción de la velocidad en la red, es en las zonas más periféricas donde se empieza a reducir antes la accesibilidad (ver mapa de las 07.00 de la mañana). Estas áreas periféricas sufren antes la congestión

porque, por su posición respecto a las áreas con mayor población, los viajes que se inician a estas horas llegan a los arcos más congestionados en los momentos de mayor congestión (una hora después de su salida). Del mismo modo, los momentos de menor accesibilidad global, no se corresponden con el mínimo de estas zonas más lejanas, ya que éstas lo sufren minutos antes. A medida que avanzamos en el día, las reducciones de la accesibilidad se van incrementando en los espacios del área metropolitana más cercana al centro de la ciudad. A media mañana (12.00) la accesibilidad se recupera en el conjunto del área metropolitana, con una pequeña reducción del centro de la ciudad, que se mantiene ligeramente congestionado durante las horas centrales del día. Finalmente, durante el pico de tarde (17.00), las pérdidas de accesibilidad se extienden desde las áreas centrales a la periferia, como consecuencia del flujo de salida desde la ciudad central, en una situación contraria a la de la mañana.

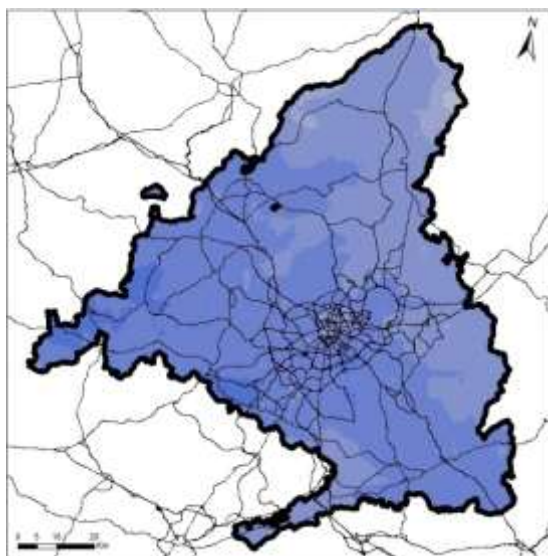


07:00

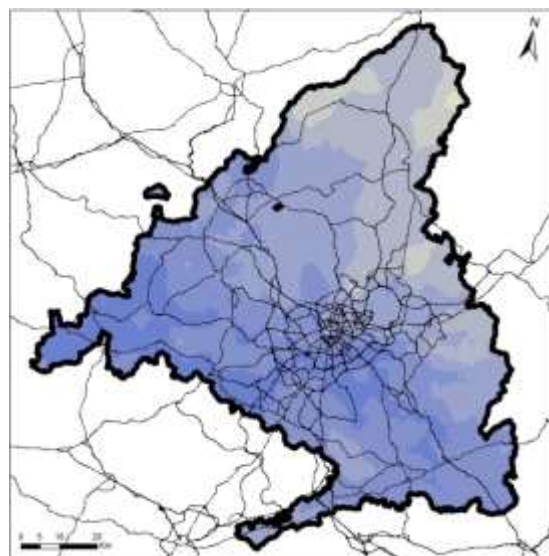


08:00

Pico de la mañana (Peor situación)



12:00



17:00

Pico de la tarde

Leyenda: $(Rel.Acc) I = max. acc.$

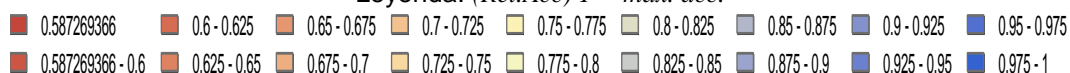


Figura 4: Distribución de la accesibilidad relativa

La Figura 5 muestra los perfiles de accesibilidad de tres espacios diferenciados. Por un lado, se presenta el perfil de una de las grandes ciudades suburbanas del área metropolitana sur de Madrid (Fuenlabrada). Se trata de un espacio residencial con una fuerte relación de dependencia con la ciudad central. Este espacio tiene un perfil similar al conjunto metropolitano (línea azul discontinua), con una fuerte pérdida de accesibilidad en la primera hora de la mañana (pérdida del 15%), como consecuencia de la congestión de las vías radiales que la comunican con la ciudad central, mientras se recupera en las horas centrales del día y vuelve a caer pero de forma muy ligera en la tarde.

Muy diferente es el perfil de accesibilidad del centro de la ciudad de Madrid (Figura 5, línea roja), donde también se produce una pérdida de accesibilidad en la primera hora de la mañana, pero no tan pronunciada como en el área suburbana o el conjunto de la región (aquí apenas un 10%). Lo destacable en el centro es que, a pesar de producirse una pequeña recuperación después del pico de mañana, vuelve a producirse una pérdida de accesibilidad a partir de las 10.00, que se mantiene e incluso se incrementa a las 12.00, para darse la peor situación en el pico de la tarde. De esta forma, aunque el impacto de la congestión no tiene un pico tan intenso en el centro, sin embargo se mantiene durante la mayor parte del día.

Finalmente se muestra la situación de la localización del Aeropuerto de Madrid (Figura 5, línea verde), que se encuentra ubicado en el centro-este de la ciudad. En este caso, la pérdida de accesibilidad es menor que en los dos casos anteriores, en parte por la existencia de varias alternativas de viaje (alguna de peaje). Sin embargo, su perfil es diferente, con dos picos marcados de mayor pérdida de accesibilidad, pero siendo el más fuerte el pico que aparece en la tarde.

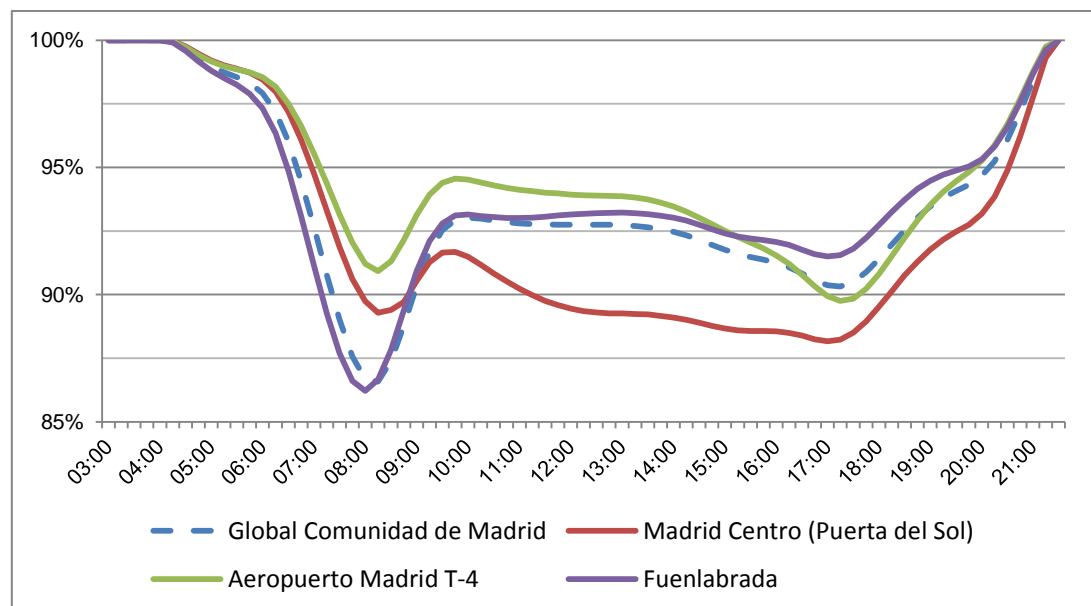


Figura 5: Ejemplo de perfiles de accesibilidad en tres espacios del área metropolitana de Madrid

4.3. La población afectada

Otra de las posibilidades del análisis de los cambios en la accesibilidad diaria en los espacios metropolitanos a partir de un SIG es la de conocer la cantidad de población afectada por las pérdidas de accesibilidad. Cruzando la información en el SIG, pueden elaborarse gráficos como el que se presenta en la Figura 6, donde se muestra el porcentaje

de población (en el eje Y) según el nivel de accesibilidad (a partir de los colores y siendo 1 la accesibilidad en una situación en flujo libre).

Como es lógico, el mayor porcentaje de población afectada se da durante el pico de mañana, no solo por la mayor caída de accesibilidad durante estas horas, sino también porque afecta a espacios del área metropolitana de marcado carácter residencial. Así, entre las 7.00 y 9.00 de la mañana casi un 10% de la población madrileña sufre pérdidas de en su accesibilidad de entre un 25-30% y hasta un 30% de la población reduce su accesibilidad entre un 15-20%. A lo largo del día, sin embargo, la población afectada es mucho menor, no llega al 5% la población que tiene pérdidas de accesibilidad superiores al 10%. En la tarde, la población afectada vuelve a incrementarse, con un 40% de la población sufriendo una caída de la accesibilidad entre el 10 y el 15%.

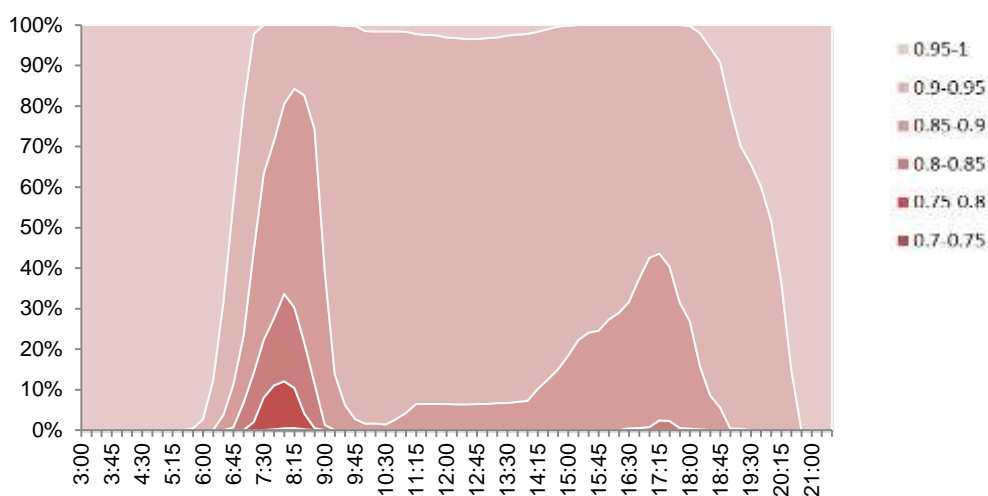


Figura 6: Distribución de la accesibilidad relativa

5. Conclusiones

El uso de SIG y nueva información proveniente de sensores como navegadores GNSS o de smartphones ayuda a mejorar los análisis tradicionales de la accesibilidad, introduciendo una perspectiva dinámica. Este tipo de análisis permite conocer el funcionamiento real de la ciudad, el impacto sobre la misma de la congestión, siendo de gran interés en su ordenación territorial.

Este trabajo se ha apoyado en la información de la red de carreteras de empresa TomTom, con información de los rendimientos de las infraestructuras viarias de los años 2011 y 2012, obtenida a partir de las observaciones reportadas por miles de usuarios de navegadores GPS. Estos datos permiten introducir impedancias dinámicas en las medidas tradicionales de accesibilidad, usando un ordenador personal corriente. Pese a que el trabajo tiene unos costes computacionales para un único escenario no demasiado elevados, lo cierto es que trabajar con intervalos temporales demasiado desagregados puede presentar problemas. De esta manera, en esta comunicación se ha optado por trabajar con intervalos de 15 minutos, en lugar de cada 5 minutos como estaba inicialmente previsto. De todos modos, este cambio no ha supuesto una pérdida reseñable en la calidad de los resultados esperados.

Para finalizar, comentar que trabajar con efectos dinámicos conlleva importantes dificultades para explicar sus consecuencias en mapas estáticos, debido a la incorporación de la componente temporal. Pese a que la realización de animaciones o vídeos parece ser la mejor forma de representarlo, es interesante reinventar algunos mapas estáticos que

puedan capturar también esa información, garantizando la claridad en la presentación de los resultados de los indicadores de accesibilidad.

6. Bibliografía

Bruinsma, F. y Rietveld, P. (1998). The accessibility of European cities: theoretical framework and comparison of approaches. *Environment and Planning, A*, 30, 499-521.

Furness, K.P. (1965). Time function iteration. *Traffic, Engineering and Control*, 7, 458-460.

Gutiérrez, J., Condeço-Melhorado, A., López, E., Monzón, A. (2011). Evaluating the European added value of TEN-T projects: A methodological proposal based on spatial spillovers, accessibility and GIS. *Journal of Transport Geography*, 19, 840-850.

Hansen, W. G. (1959). How accessibility shapes land-use. *Journal of American Institute of Planners*, 25, 73-76.

Harris, C. D. (1954). The market as a factor in the localization of industry in the United States. *Annals of the Association of American Geographers*, 44, 315-348.

Morris, J. M., P. L. Dumble, y M. R. Wigan (1979). Accessibility indicators for transport planning. *Transportation Research Part A*, 13, 91-109.

Muhammad, S., de Jong, T. y Otten, H. F. L. (2008). Job accessibility under the influence of information and communication technologies, in the Netherlands. *Journal of Transport Geography*, 16, 203-216.

Ortúzar, J.D., Willumsen, L.G. (2011). *Modelling transport*, 4th ed. 1-608.

Quiroga, C.A. (2000). Performance measures and data requirements for congestion management systems. *Transportation Research Part C*, 8, 287-306.

Vandenbulcke, G., Steenberghen, T., Thomas, I. (2009) Mapping accessibility in Belgium: A tool for land-use and transport planning? *Journal of Transport Geography*, 17, 39-53.