Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica
International Review of Geographical Information Science and Technology

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DE LAS REDES DE CARRETERAS MEDIANTE INDICADORES DE ACCESIBILIDAD Y SIG: INTENSIDAD Y POLARIZACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CIERRE DE TRAMOS EN LA RED DE MALLORCA

EDUARDO RODRÍGUEZ NÚÑEZ[1] y JAVIER GUTIÉRREZ PUEBLA[2]
Departamento de Geografía Humana. Universidad Complutense de Madrid
C/ Profesor Aranguren, s/n 28040 Madrid (España)
[1]eduardor@ghis.ucm.es [2]javiergutierrez@ghis.ucm.es

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es presentar y aplicar una metodología para medir el grado de vulnerabilidad de una red viaria a partir del cálculo de los cambios en la accesibilidad debidos al cierre de determinados tramos, en el ejemplo de la red de carreteras de Mallorca. Se utiliza un Sistema de Información Geográfica (SIG) para calcular cómo varían los tiempos de viaje entre municipios en distintos escenarios de interrupción del tráfico en determinados tramos de la red. Se compara cada uno de esos escenarios con la situación de normalidad en la red para cuantificar la intensidad de los efectos y su grado de polarización espacial.

Palabras clave: redes de carreteras, accesibilidad, vulnerabilidad, sistemas de información geográfica (SIG), Mallorca.

ASSESSMENT OF ROAD VULNERABILITY BY ACCESSIBILITY AND GIS-BASED ANALYSIS

ABSTRACT

The aim of this article is to present and apply a methodology in order to analyze the vulnerability of a road network calculating accessibility changes due to the disruption of certain links, using the Mallorca road network as a case of study. A Geographic Information System (GIS) has been used in order to calculate changes in travel times between municipalities in different evaluation scenarios of closure of network links. Each evaluation scenario is compared to the reference scenario (normal situation of the road network). Intensity and spatial polarization of the effects have been measured.

Keywords: road network, accessibility, vulnerability, geographic information systems (GIS), Mallorca.

Recibido: 27/8/2012
Aceptada versión definitiva: 10/12/2012

© Los autores

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

1. Introducción

El creciente empleo del automóvil privado durante las últimas décadas ha supuesto una creciente presión sobre las redes de carreteras, tanto en relación a su capacidad como a la calidad del servicio que prestan. Tanto en España como en otros muchos países desarrollados el transporte por carretera se ha convertido en el modo hegemónico, tanto para el desplazamiento de personas como de mercancías. De ahí que interrupciones del tráfico en determinados tramos de la red, debidas tanto a causas de tipo natural (condiciones meteorológicas extremas, inundaciones, desprendimientos de tierras, etc.) como de origen humano (accidentes, trabajos de mantenimiento, conflictos laborales, atentados, etc.), puedan tener graves consecuencias económicas y sociales. Además hay que considerar que en caso de catástrofe las redes de carreteras pueden sufrir alteraciones importantes en su funcionalidad, cuando son precisamente el medio utilizado para un rápido acceso a las áreas afectadas (Bono y Gutiérrez, 2011).

El concepto de vulnerabilidad tiene diferentes acepciones. En el contexto de las redes de transporte la vulnerabilidad se relaciona con su capacidad para seguir funcionando después de sufrir una alteración, es decir, con la susceptibilidad de una red a que determinados incidentes puedan causar reducciones en los niveles de servicio y las condiciones de accesibilidad (Berdica, 2002). Una incidencia en un tramo o en un nodo de la red producirá incrementos en los tiempos de viaje debido a la necesidad de utilizar rutas alternativas a la óptima. La derivación de los tráficos hacia otros tramos puede, así mismo, producir problemas de congestión y, por lo tanto, repercutir a su vez en los niveles de servicio y en los tiempos de viaje.

Pero esos efectos serán diferentes en función de que las redes sean más o menos vulnerables. Redes más vulnerables serán menos capaces de mantener unos niveles de servicio y accesibilidad próximos a los originales en situaciones críticas. La morfología y la densidad de la red son importantes factores a tener en cuenta, ya que una red densa facilitará los desplazamientos y proporcionará rutas alternativas, mientras que una red poco densa agrava los problemas en caso de alteraciones, no sólo por la incomunicación que genera, sino también por los graves problemas que surgen en el momento de evacuar y asistir por parte de los servicios de emergencia (Cova, 1999).

Los elementos críticos de una red son los que más afectan a su vulnerabilidad: cuanto más crítico es un componente, mayores son los efectos de su pérdida sobre el conjunto de la red (Jenelius *et al.*, 2006). El nivel de criticidad de un elemento depende del papel que juegue en la estructura de la red y de los flujos que circulen por ella. Así, por ejemplo, las redes muy centralizadas, del tipo de *hub and spoke*, son extremadamente vulnerables, ya que cuentan con elementos críticos: el no funcionamiento del *hub* puede suponer la pérdida de operatividad de toda la red. En cambio, las redes descentralizadas, malladas, con gran densidad de arcos, permiten una gran cantidad de rutas alternativas ante una incidencia en cualquiera de sus nodos o arcos. Conocer los puntos débiles de una red y las rutas alternativas es importante a la hora de mitigar la vulnerabilidad de la red (Chen *et al.*, 2007) y de dar prioridad tras una catástrofe a la reconstrucción de unos tramos sobre otros (Sohn, 2006).

© Los autores
www.geo-focus.org

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

El concepto de vulnerabilidad se opone al de robustez. Una red robusta debe ser capaz de absorber los impactos de las perturbaciones en sus arcos o nodos, manteniendo unas condiciones de funcionamiento similares a las de una situación de normalidad. Por su parte, el concepto de fiabilidad de una red está más relacionado con la probabilidad de que ésta sufra algún fallo o alteración que afecte a los tiempos de viaje, es decir, con el grado de estabilidad, predictibilidad o certidumbre con que un usuario puede estimar su tiempo de viaje (Immers *et al.*, 2004).

El principal objetivo de este artículo es presentar y aplicar una metodología para el análisis de la vulnerabilidad de las redes de carreteras a través de las funcionalidades de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se trata de estudiar los efectos derivados de incidencias que supongan el cierre de ciertos tramos. Debido al efecto red, estos efectos se extienden sobre un territorio mucho mayor que el ocupado por el arco directamente afectado por la incidencia. Los efectos se miden en términos de aumento de tiempos de viaje, es decir, de pérdidas de accesibilidad. Se analiza tanto la intensidad de los efectos como su grado de polarización en el territorio[1].

El artículo se compone de cinco partes. Tras esta breve introducción, en el segundo apartado se revisa el estado de la cuestión; el tercero se dedica a describir los datos y la metodología utilizados; el cuarto muestra los principales resultados; y, finalmente, el quinto presenta las conclusiones del trabajo.

2. El análisis de vulnerabilidad de las redes de transporte

El análisis de la vulnerabilidad de las redes de transporte es un tema de investigación muy actual, principalmente desarrollado en la última década. Por lo tanto la bibliografía sobre éste ámbito es relativamente escasa y, en general, de muy reciente aparición. Como antecedentes más destacados cabe citar el trabajo pionero de Garrison (1960), quien analizó los incrementos de distancias topológicas debidos a la interrupción del tráfico en ciertos tramos de la red de carreteras interestatales de los Estados Unidos, y las aportaciones de Ratliff *et al.* (1975) y Ball *et al.* (1989), desde la investigación operativa, quienes propusieron algoritmos para determinar los arcos más "vitales" (críticos) de una red. Pero es sobre todo tras los terremotos de Los Ángeles de 1994 y Kobe de 1995 y los graves ataques terroristas de Nueva York, Madrid y Londres, cuando las investigaciones sobre vulnerabilidad de las redes y sobre infraestructuras críticas (Murray y Grubesic, 2007) alcanzan un mayor desarrollo. La disponibilidad de herramientas informáticas más potentes, entre otras los Sistemas de Información Geográfica, ha facilitado la realización de los cálculos necesarios, a menudo muy complejos[2].

Los estudios sobre vulnerabilidad de redes pueden ser divididos en grandes categorías, en función del enfoque que adoptan (Murray *et al.*, 2008): evaluación de escenarios específicos, identificación de los peores escenarios y evaluación de escenarios de estrategias de ataques coordinados.

La primera categoría incluye investigaciones en las que se contemplan uno o varios escenarios reales o hipotéticos para evaluar los efectos de la interrupción de uno o varios elementos

© Los autores
www.geo-focus.org

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

de la red. Este tipo de estudios responde a la clásica pregunta de "qué pasaría si…". Es el caso, por ejemplo, de la interrupción del tráfico en un puente. Al contemplar un número muy limitado de escenarios es posible hacer un análisis detallado de cada uno de ellos, tanto en lo que se refiere a impactos directos (funcionamiento de la red) como indirectos (impactos económicos). Sin embargo, el considerar sólo algunos escenarios puede llevar a tomar decisiones incorrectas en el proceso de planificación. Sohn (2006) aplicó indicadores de accesibilidad para evaluar la respuesta de la red de Maryland ante el riesgo de inundaciones. El terremoto de Kobe y su afección al funcionamiento de las líneas ferroviarias constituyó el foco de interés del trabajo de Chang (2003), quien estudió cómo iban mejorando las condiciones de accesibilidad a medida que el servicio de los distintos tramos de la red se iba restableciendo. Berdica y Mattsson (2007) evaluaron los impactos del cierre de distintos puentes en Estocolmo. Taylor *et al.* (2006) analizaron los efectos de la eliminación de diferentes tramos de la red de carreteras australiana en términos de aumento del coste generalizado de transporte y de pérdida de accesibilidad potencial. Los trabajos de Knoop *et al.* (2008) sobre la red viaria de Rotterdam y Erath *et al.* (2008) sobre la red de carreteras de Suiza también se sitúan en esta línea de simulación de impactos del cierre de tramos específicos.

Un segundo grupo de investigaciones se dedica a la identificación de los peores escenarios, en la línea del ya mencionado trabajo de Ratliff *et al.* (1975). Así, por ejemplo, Jenelius y Mattsson (2005) analizan sistemáticamente, uno por uno, los efectos de la pérdida de los arcos de una red (simulando, en consecuencia, tantos escenarios de pérdida de arcos como arcos tiene la red) para obtener un rango de variabilidad de dichos efectos. Murray *et al.* (2008), por su parte, identifican los más graves escenarios de combinaciones de pérdidas de varios arcos en la red de carreteras de Ohio.

Finalmente, otros trabajos (aunque no específicamente sobre redes de transporte) se orientan hacia la simulación de escenarios de estrategias de ataques coordinados a las redes. Los escenarios de interés son aquellos en los que se plantea una secuencia de pérdidas de elementos de la red, por ejemplo ante un ataque terrorista. En este caso se plantea la pregunta: "¿cómo de vulnerable es la red ante la pérdida coordinada de elementos?". Una primera aproximación es la de ordenar los arcos de la red por orden de importancia (criticidad) en base a un criterio topológico y, a continuación, ir eliminándolos por ese mismo orden, analizando los efectos en cada una de las fases (Albert *et al.*, 2000). En otros trabajos más recientes se recalcula la importancia de cada arco en cada fase o simplemente se eliminan arcos y nodos de forma aleatoria (Albert *et al.*, 2004; Holme *et al.*, 2002). Esta línea de investigación permite identificar los arcos o nodos que deben ser reforzados para neutralizar o mitigar los efectos de posibles ataques terroristas.

El trabajo que aquí se presenta se sitúa en la línea del primer tipo de investigaciones, las que analizan la vulnerabilidad de las redes en términos de pérdidas de accesibilidad, generando escenarios hipotéticos o reales de interrupción del tráfico en uno o varios tramos, para analizar comparativamente los impactos derivados, utilizando para ello herramientas SIG. Otras investigaciones se han centrado en analizar la intensidad de los efectos (con medidas de tendencia central). Sin embargo apenas se ha prestado atención a la polarización de los efectos, con la excepción de Jenelius (2010). En este trabajo se investigan ambas cuestiones (intensidad y

© Los autores
www.geo-focus.org

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

polarización de los efectos del cierre de tramos), tomando como caso de estudio la red de carreteras de Mallorca.

3. Datos y metodología

3.1. Datos

La red digital de carreteras de Mallorca utilizada en este trabajo (figura 1) consta de un total de 401 arcos. En cada uno de ellos se almacena información sobre su longitud, velocidad y tiempo de viaje en 2009. La velocidad se estima a partir del tipo de vía, teniendo en cuenta adicionalmente el efecto de la congestión en Palma y alrededores. Se consideran 57 zonas de transporte (los 5 distritos de Palma y los 52 municipios del resto de la isla), con sus correspondientes centroides. Los datos de población de las zonas de transporte (asignados a los centroides) proceden del Padrón Continuo del Instituto Nacional de Estadística y se refieren al 1 de enero de 2009.

La red tiene una estructura radial, de forma que la mayor parte de las carreteras –y particularmente vías de gran capacidad- convergen en Palma. Esta ciudad concentra casi la mitad de la población de la isla (401.000 habitantes sobre un total de 862.000). Por lo tanto las relaciones más importantes son las que se establecen con Palma[3].

3.2. Escenarios

Para estudiar la vulnerabilidad de la red de Mallorca al cierre de distintos tramos se realiza un análisis de accesibilidad comparando el escenario de referencia con cada uno de los escenarios de evaluación considerados. El escenario de referencia representa una situación de funcionamiento normal de la red; por su parte, los escenarios de referencia representan situaciones hipotéticas o reales de interrupción del tráfico en uno o varios arcos. Por lo tanto, la comparación de cada uno de los escenarios de evaluación con el escenario de referencia aporta información sobre la pérdida de accesibilidad experimentada en el conjunto de la isla por causa del cierre de ese tramo.

Diez de los escenarios de evaluación considerados en este trabajo representan situaciones hipotéticas del cierre de tramos, elegidos de forma que cubran una cierta variedad de tipologías viarias y de espacios de la isla. Se incluye también un escenario de evaluación real, que se corresponde al cierre de varios tramos de la red de carreteras de la isla debido a las fuertes lluvias registradas en mayo de 2010 (figura 2).

En realidad, esta metodología basada en la construcción de escenarios es similar a la utilizada en los estudios que evalúan el impacto de la construcción de nuevas infraestructuras (ver, por ejemplo, Gutiérrez, 2001), sólo que, en vez de añadir arcos para simular el efecto futuro de la nueva infraestructura, se procede de forma opuesta, eliminando arcos, para simular el efecto del cierre de determinados tramos (ya sea por causas naturales o antrópicas).

© Los autores
www.geo-focus.org

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

3.3. Cálculo de la accesibilidad potencial

Los impactos debidos a la interrupción del tráfico en ciertos tramos de la red se evalúan a partir de las pérdidas registradas en términos de accesibilidad. El concepto de accesibilidad generalmente es usado para encapsular las nociones de las oportunidades, disponibles para individuos y empresas, de alcanzar lugares donde realizar actividades que son importantes para ellos (Linneker y Spence, 1992). En este trabajo se utiliza el modelo de potencial económico, que pertenece a la familia de los modelos gravitatorios y es el indicador más utilizado en los estudios de accesibilidad (ver, por ejemplo, Hansen, 1959; Linneker y Spence, 1992; Dundon-Smith y Gibb, 1994; Bruinsma y Rietveld, 1998; Gutiérrez, 2001; López *et al.*, 2008; Gutiérrez *et al.*, 2010). El potencial económico es una medida de la proximidad o accesibilidad de un determinado punto o región a un volumen dado de actividad económica y puede ser interpretado como el volumen de actividad económica al que esa región tiene acceso, una vez que se ha considerado el coste o tiempo de cubrir la distancia a esa actividad (Dunbon-Smith y Gibb, 1994). Su expresión matemática clásica es la siguiente:

$$A_i = \sum \frac{M_j}{d_{ij}^a}$$

Donde:
A_i es la accesibilidad del origen i
M_j es una medida de la actividad económica del destino j
d_{ij} es una medida del coste de transporte (distancia) por el camino mínimo entre el origen i y el destino j, y
a es un parámetro que refleja el gradiente del efecto de fricción de la distancia.

En nuestro caso, los orígenes i son los nodos de la red y los destinos j los centroides de las zonas de transporte; la importancia de la actividad económica de los destinos M_j se mide en términos de población residente y el coste de transporte entre i y j se calcula en minutos (tiempo de viaje). Por lo tanto, se calculan 3.249 caminos mínimos (57 x 57 centroides) en cada uno de los escenarios considerados.

Cuando se hacen simulaciones con redes digitales el tiempo de viaje suele estar subestimado, ya que tanto el origen como el destino se modelizan como puntos, cuando en realidad son espacios con una red viaria local de extensión y complejidad variables. Para mitigar este efecto se han considerado unos tiempos en origen y en destino (tiempos de acceso y dispersión) equivalentes a la mitad del tiempo de viaje interno de cada municipio, de forma proporcional a la población que alberga (tabla 1). Así, el tiempo de viaje total entre el origen i y el destino j será el tiempo a través de la red entre ambos puntos más la suma de los tiempos de acceso y dispersión (la mitad del tiempo interno del municipio de origen y la mitad del tiempo interno del municipio de destino, respectivamente).

© Los autores
www.geo-focus.org

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

El valor del exponente de la distancia *a* debe ser obtenido a partir de la calibración de datos de movilidad entre las zonas del área de estudio. Al no disponer de esta información, se ha optado por utilizar el valor de 1,36, que se obtuvo en un estudio sobre la red de carreteras de la España peninsular (Condeço-Melhorado *et al.*, en prensa).

El SIG utilizado para el cálculo de los caminos de mínimo tiempo, la implementación de los indicadores de accesibilidad y la elaboración de la cartografía de los resultados ha sido *ArcGIS 9.3*. Más concretamente se han calculado los tiempos de viaje mediante la funcionalidad *OD Matrix Cost*, los valores del indicador mediante operaciones de gestión de bases de datos y se ha utilizado el procedimiento de interpolación IDW para generar la cartografía.

4. Resultados

Los efectos del cierre de tramos de carretera en la isla de Mallorca en términos de pérdidas de accesibilidad se muestran en la figura 3 y siguientes para cada uno de los escenarios considerados. Del análisis de estos mapas se deducen, entre otras, las siguientes regularidades:

- Los efectos de la interrupción del tráfico en ciertos tramos lógicamente tienden a disminuir con la distancia con respecto al tramo cortado, ya que a medida que aumenta la distancia es más fácil encontrar rutas alternativas que impliquen un menor rodeo en términos relativos.

- La interrupción del tráfico en las vías radiales (con origen en Palma), en general, produce efectos mayores que en el resto de las vías. Dado que la mayor parte de la población de la isla se concentra en la capital, el cierre de una carretera radial produce una importante pérdida de accesibilidad en las localidades situadas más allá del tramo cortado (tomando a Palma como referencia). Por lo tanto, los efectos del corte del tráfico en este tipo de vías son claramente asimétricos, como se puede apreciar, por ejemplo, en los cortes simulados en las carreteras radiales a Sóller, Alcudia y Manacor.

- El tipo de carretera cortada juega un papel importante. Lógicamente los efectos son mayores en autovías que en carreteras secundarias. Las primeras canalizan una gran parte de los flujos, mientras que las segundas tienen una utilización mucho menor, casi siempre orientada a tráficos locales. Así, por ejemplo, el corte de las autovías del aeropuerto o de Manacor produce efectos mucho mayores que el de las carreteras secundarias entre Algaida y Pina o entre Inca y Sencelles. Sólo cuando la carretera secundaria cortada es radial y la red es poco densa los efectos son mayores, como sucede con el cierre del tramo de la Ma-19 entre Llucmajor y Campos.

- La densidad de la red es efectivamente otro importante factor a considerar, ya que los efectos de la interrupción del tráfico se mitigan en áreas donde la red es más densa y, por lo tanto, existe la posibilidad de encontrar rutas alternativas con escaso rodeo. Esto ocurre, por ejemplo, en el cierre del tramo de la autovía de Palma a Inca, que produce

© Los autores
www.geo-focus.org

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

menores efectos que los de las autovías del aeropuerto y Manacor precisamente debido a la mayor densidad de red en el primer caso.

- La interrupción del tráfico en las carreteras radiales que conectan Palma con localidades costeras produce lógicamente efectos de menor extensión cuando el tramo cortado se localiza más cerca de la localidad costera. Es el caso del doble corte del tramo Bunyola-Sóller (túnel y carretera de montaña), muy próximo al litoral, con efectos muy polarizados en Sóller, por la proximidad del mar, mientras que los cortes en las autovías del aeropuerto y Manacor afectan a áreas mucho extensas.

Para cuantificar la intensidad de los efectos del cierre de tramos (criticidad) se han calculado las medias aritmética y ponderada de los valores de accesibilidad en cada escenario y se han calculado las diferencias entre los valores de cada uno de los escenarios de evaluación y el escenario de referencia (tabla 2). Para el cálculo de la media ponderada se ha usado como factor de ponderación la población del municipio de origen. Los cambios sin ponderar están en función de la cuantía de las pérdidas de accesibilidad de cada municipio. Cuando se pondera por la población de origen se considera otro elemento adicional, que es cuánta población se ve afectada por esas pérdidas de accesibilidad.

Centrando la atención en las pérdidas de accesibilidad ponderadas, se puede comprobar cómo los valores más bajos corresponden a los cortes de los tramos de las carreteras Ma-3130 entre Algaida y Pina (0,005% de pérdida de accesibilidad) y Ma-3120 entre Inca y Sencelles (0,052%). Se trata de vías secundarias no radiales y, además, las localidades afectadas tienen poca población. Las mayores pérdidas de accesibilidad se dan en el corte 7 sobre la circunvalación de Palma (4,4%), una vía de gran capacidad muy próxima a Palma cuyos efectos se extienden por áreas muy extensas y en buena parte muy pobladas. El segundo valor más elevado, con una pérdida de casi un 2 %, se da en el corte de la entrada a Manacor, afectando de manera notable a casi todo el litoral oriental de la isla. Por su parte, la situación real referida al 3 de mayo de 2010 muestra una variación de accesibilidad de un 8%, valor bastante moderado, teniendo en cuenta que se trata de ocho tramos repartidos por toda la red, siendo seis de ellos carreteras secundarias en áreas poco pobladas.

Por otro lado, los contrastes entre municipios en cuanto a pérdidas de accesibilidad (grado de polarización de los efectos) se verifican mediante el coeficiente de variación ponderado de los cambios producidos por cada corte de carreteras (tabla 3). Esta medida de dispersión permite corroborar lo apuntado anteriormente mediante la observación de los mapas: los efectos son concentrados (coeficiente de determinación más elevado) en los tramos cortados en carreteras radiales próximos a las localidades costeras (carretera de Palma a Sóller) y también en algunos tramos de carreteras secundarias donde el número de localidades afectadas es muy reducido (tramo de la Ma-3130 entre Algaida y Pina). En cambio el corte del tramo de la entrada a Manacor (autovía Ma-15 Palma a Manacor) produce efectos mucho más dispersos, debido no sólo a que los municipios del este de la isla tienen ahora un peor acceso a Palma, sino también a que los situados al oeste de Manacor acceden con mayores dificultades a esta capital comarcal. Pero es el corte de un tramo de la circunvalación de Palma el que produce efectos más dispersos, debido a que la relación

© Los autores
www.geo-focus.org

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

con la capital es vital para todos los municipios y que la circunvalación juega un papel clave en el acceso a distintos barrios de Palma.

5. Conclusiones

Se ha presentado una metodología que permite determinar el impacto de la interrupción del tráfico en ciertos tramos de una red de carreteras. Esta metodología se basa en la generación de escenarios (hipotéticos o reales) de evaluación y el cálculo de un indicador de accesibilidad mediante las rutinas de análisis de redes disponibles en un Sistema de Información Geográfica (*ArcGIS*). Las diferencias observadas (pérdidas de accesibilidad) entre cada uno de los escenarios de evaluación y el escenario de referencia (que contempla el normal funcionamiento en todos los tramos de la red) permiten analizar la vulnerabilidad de la red y determinar la criticidad de cada uno de los tramos analizados. La media ponderada de las pérdidas de accesibilidad permite conocer la intensidad de los efectos del cierre de los diferentes tramos; por su parte, el coeficiente de variación ponderado muestra hasta qué punto dichos efectos se concentran en una parte del territorio o, por el contrario, presentan una mayor dispersión.

Esta metodología ha sido testada en el caso de la red de carreteras de Mallorca, seleccionando tramos con características distintas (tipo de vía, distancia a Palma, distancia a la costa, densidad de red, etc.) para poder realizar comparaciones. Lógicamente las zonas más inmediatas a los tramos cortados son las que muestran variaciones de accesibilidad más acusadas, que tienden a hacerse menores con la distancia. El impacto del cierre de tramos (criticidad) es mayor en las vías radiales (por la conexión con Palma), en las de gran capacidad (por canalizar gran parte de los flujos) y en áreas con menor densidad de red (por la imposibilidad de elegir rutas alternativas con escaso rodeo). En el caso de las vías radiales los efectos son marcadamente asimétricos, mucho mayores en las localidades situadas más allá del tramo cortado (tomando Palma como referencia). Por otro lado, si en este tipo de vías el tramo cortado se sitúa muy cerca de la costa, los efectos afectan lógicamente a un menor número de localidades, lo cual implica un mayor grado de polarización espacial. Los cortes de carreteras secundarias no radiales producen en general efectos débiles y muy polarizados (afectan a muy pocas localidades).

Desde el punto de vista de las políticas de transporte la metodología propuesta permite identificar tramos especialmente críticos a los que la administración debe prestar una particular atención, previendo recorridos alternativos. Sin duda, las vías de gran capacidad son elementos críticos de la red debido a la gran cantidad de tráfico que canalizan. Pero también hay que resaltar la importancia de ciertos tramos que, aun con poco tráfico, son críticos para algunas localidades, especialmente cuando no hay apenas vías alternativas por tratarse de espacios con muy baja densidad de red, lo cual es frecuente en áreas de montaña. De lo anterior se desprende que los análisis de vulnerabilidad de las redes aportan información de interés, tanto en tareas de gestión como de planificación del transporte.

© Los autores
www.geo-focus.org

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con financiación del MICINN (beca FPU de Eduardo Rodríguez Núñez y proyecto TRA2011-27095 SPILLTRANS).

Referencias bibliográficas

Albert, R.; Hawoong, J. y A.-L. Barabasi (2000): "Error and attack tolerance of complex networks".*Nature* 406: 378–382.

Albert, R.; Albert, I. y Nakarado, G.L. (2004): "Structural vulnerability of the North American power grid". *Physical Review E* 69(025103): 1–4.

Ball, M. O.; Golden, B. L. y Vohra, R. V. (1989): "Finding the most vital arcs in a network". *Operations Research Letters* 8, 73–76.

Berdica, K. (2002): "An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done". *Transport Policy*, 9, 117-127.

Berdica, K. y Mattsson, L.G. (2007): "Vulnerability: A Model-Based Case Study of the Road Network in Stockholm", en Murray. A. and Grubesic, T. (Eds.): C*ritical Infrastructure. Reliability and Vulnerability*. Berlin, Springer, 81-106.

Binimelis Sebastián, J. (1989): "Evolución de la red viaria de la isla de Mallorca. Aplicación metodológica de la teoría de grafos". Madrid, Actas del XI Congreso Nacional de Geografía, 118-130.

Bono, F. y Gutiérrez, E. (2011): "A network-based analysis of the impact of structural damage on urban accessibility following a disaster: the case of the seismically damaged Port Au Prince and Carrefour urban road networks". *Journal of Transport Geography*, 19, 1443-1455.

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

Brunet Estarelles, P.J. (1979): "La red viaria de Mallorca. Estudio de la densidad de carreteras y aplicación de la teoría de los grafos". *Mayurqa*, 19, 1, 11-29.

Brunet Estarelles, P.J. (1989): "El tema de la movilitat espacial dins dún projecte interdisplinar d'investigacio per a B.U.P. el transport col-lectiu interurba per carretera a Mallorca". *Treballs de Geografia*, 4, 1, 73-79.

Chang, S.E. (2003): "Transportation planning for disasters: an accessibility approach". *Environment and Planning A*, 35, 1051-1072.

Chen, A.; Yang, C.; Lee, M. y Kongsomsaksakul, S. (2007): "Network-based Accessibility Measures for Vulnerability Analysis of Degradable Transportation Networks". *Networks & Spatial Economics*, 7, 241–256.

© Los autores
www.geo-focus.org

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

Condeço-Melhorado, A.M.; Gutiérrez, J. y García, J. C. (en prensa): "Influence of distance decay on the measurement of spillover effects of transport infrastructure: a sensitivity analysis". GeoFocus.

Cova, T.J. (1999): "GIS in emergency management". *Geographical Information Systems*, 2, 845-858.

Díaz Pineda, J. (2000): "Introducción al problema de la vulnerabilidad de las infraestructuras de carreteras, en Carreteras". *Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera*, 106, 7-29.

Dundon-Smith, D.M. y Gibb, R.A. (1994): "The Channel Tunnel and regional economic development". *Journal of Transport Geography 2* (3), 178–189.

Erath, A.; Birdsall, J.; Axhausen, K.W. y Hajdin R. (2008): *Vulnerability assessment of the Swiss road network. Research Report*. Eidgenössische Technische Hochschule, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (ETH-IVT), Zurich.

Garrison, W. L. (1960): Connectivity of the Interstate Highway System. *Papers in Regional Science* 6, 121–137.

Gutiérrez, J. (2001): "Location, economic potential and daily accessibility: an analysis of the accessibility impact of the high-speed line Madrid-Barcelona-french border". *Journal of Transport Geography*, 9, 229-242.

Gutiérrez, J.; Condeço, A. y Martín, J.C. (2010): "Using accessibility indicators and GIS to assess and monetarize spatial spillovers of transport infrastructure". *Journal of Transport Geography*, 18, 141-152.

Hansen, W.G. (1959). "How Accesibility Shapes Land-Use". *Journal of the American Institute of Planners*, 5, 76-106

Holme, P.; Kim, B.J.; Yoon, C.N. y Hee, S.K. (2002): "Attack vulnerability of complex networks". *Physical Review E* 65(056109): 1–14.

Immers, L.H.; Stada, J.E.; Yperman, I. y Bleukx, A. (2004): "Robustness and resilience of transportation networks". *Proceedings of the 9th International Scientific Conference MOBILITA*, Bratislava, Slovenia, May 6–7.

Jenelius, E. (2010): "User inequity implications of road network vulnerability". *Journal of Transport and Land Use* 2 (3/4), 57–73.

Jenelius, E. y Mattsson, L.G. (2005): "Developing a methodology for road network vulnerability analysis". *Nectar Cluster 1 Seminar*, 12th – 13th May 2006, Molde University College, Molde (Norway).

Jenelius, E.; Petersen, T. y Mattsson, L.-G. (2006): "Importance and exposure in road network vulnerability analysis". *Transportation Research Part A* 40, 537–560.

Knoop, V.; Zuylen, H. van y Hoogendoorn, S. (2008): "The influence of spillback modelling when assessing consequences of blockings in a road network". *European Journal of Transportation and Infrastructure Research* 8, 287–300.

© Los autores
www.geo-focus.org

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

Linneker, B. y Spence, N.A. (1992): "Accesibility measures compared in an analysis of the impact of the M25 London Orbital Motorway on Britain". *Environment and Planning A*, 24, 1137-1154.

López, E.; Gutiérrez, J. y Gómez, G. (2008): Measuring regional cohesion effects of large-scale transport infrastructure investments: an accessibility approach. *European Planning Studies*, 16 (2), 277-301.

Murray, A. y Grubesic, T. (2007): C*ritical infrastructure. Reliability and vulnerability*. Berlin, Springer.

Murray, A. T.; Matisziw, T. C. y Grubesic, T. H. (2008): "A methodological overview of network vulnerability analysis". *Growth and Change* 39, 573–592.

Ratliff, H. D.; Sicilia, G. T. y Lubore, S. H. (1975) "Finding the n most vital links in flow networks". *Management Science* 21, 531–539.

Rodríguez Núñez, E. (2011): Estimación de la vulnerabilidad de la red de carreteras de un territorio insular a partir de la variación de la accesibilidad; análisis mediante SIG de la isla de Mallorca. En: Hernández Luis, J.A. (ed): Servicios, globalización y territorio, V Congreso Geografía de los Servicios, 623-640.

Seguí Pons, J. M.; Ruiz Pérez, M.; Guaita Mas, F.; Escalas, F. y Bauxà, A. (2003): "La planificación de rutas de transporte escolar a través de un SIG: El proyecto SIGTEBAL", *GeoFocus*, 3, 58-76.

Sohn, J. (2006): "Evaluating the significance of highway network links under the flood damage: An accessibility approach". *Transportation Research Part A*, 40, 491-506.

Taylor, M. A. P.; Sekhar, S. V. C. y D'Este, G. M. (2006): "Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of Strategic Road Networks". *Networks & Spatial Economics*, 6, 267–291.

TABLAS

Tabla 1. Tiempo interno de entrada/salida desde los municipios de origen y destino

Tamaño de los municipios	Tiempo interno (tiempo de salida + tiempo de llegada)
Mayor de 50. 000 habitantes	11 minutos (5,5 de salida y 5,5 de llegada)
Entre 25.000 y 50.000 habs.	9 minutos (4,5 de salida y 4,5 de llegada)
Entre 10.000 y 25.000 habs.	7 minutos (3,5 de salida y 3,5 de llegada)
Menor de 10.000 habitantes	5 minutos (2,5 de salida y 2,5 de llegada)

Fuente: Elaboración propia

© Los autores
www.geo-focus.org

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

Tabla 2. Accesibilidad media en los distintos escenarios considerados y cambios con respecto al escenario de referencia

Escenario	Media aritmética	Media ponderada por la población del municipio de origen	% de pérdida (media aritmética)	% de pérdida (media ponderada)
Accesibilidad BASE	9546,70	12.419,52	---	---
Accesibilidad Corte 1 (Tramo Ma-11 Bunyola a Sóller)	9467,97	12.359,85	0,825	0,480
Accesibilidad Corte 2 (Tramo Ma-19 Aeropuerto a Palma)	9485,79	12.306,09	0,638	0,913
Accesibilidad Corte 3 (Tramo Ma-19 Aeropuerto a Llucmajor)	9485,79	12.306,09	0,638	0,913
Accesibilidad Corte 4 (Tramo Ma-13 Inca a Alcudia)	9405,43	12.314,42	1,480	0,846
Accesibilidad Corte 5 (Tramo Ma-15 Palma a Manacor)	9323,07	12.189,09	2,342	1,855
Accesibilidad Corte 6 (Tramo Ma-1 Palma a Calvià)	9496,84	12.316,85	0,522	0,827
Accesibilidad Corte 7 (Tramo Ma-20 Circunvalación de Palma)	9176,18	11.866,61	3,881	4,452
Accesibilidad Corte 8 (Tramo Ma-19 entre Llucmajor y Campos)	9482,83	12.354,66	0,669	0,522
Accesibilidad Corte 9 (Tramo Ma-3130 entre Algaida y Pina)	9543,82	12.418,93	0,030	0,005
Accesibilidad Corte 10 (Tramo Ma-3120 entre Inca y Sencelles)	9532,66	12.413,09	0,147	0,052
Accesibilidad Cortes Reales por las intensas lluvias del 3 de Mayo de 2010	8909,11	11.421,48	6,679	8,036

Fuente: Elaboración propia

© Los autores
www.geo-focus.org

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

Tabla 3. Coeficiente de variación de los valores de cambio de la accesibilidad entre cada escenario de evaluación y el escenario de referencia

Escenarios	Coeficiente de variación
Corte 1 (Tramo Ma-11 Bunyola a Sóller)	410,55
Corte 2 (Tramo Ma-19 Aeropuerto a Palma)	276,69
Corte 3 (Tramo Ma-19 Aeropuerto a Llucmajor)	276,69
Corte 4 (Tramo Ma-13 Inca a Alcudia)	256,89
Corte 5 (Tramo Ma-15 Palma a Manacor)	155,06
Corte 6 (Tramo Ma-1 Palma a Calvià)	252,60
Corte 7 (Tramo Ma-20 Circunvalación de Palma)	73,99
Corte 8 (Tramo Ma-19 entre Llucmajor y Campos)	367,30
Corte 9 (Tramo Ma-3130 entre Algaida y Pina)	581,45
Corte 10 (Tramo Ma-3120 entre Inca y Sencelles)	355,00
Cortes Reales por las intensas lluvias del 3 de Mayo de 2010	223,00

Fuente: Elaboración propia

© Los autores
www.geo-focus.org

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

FIGURAS

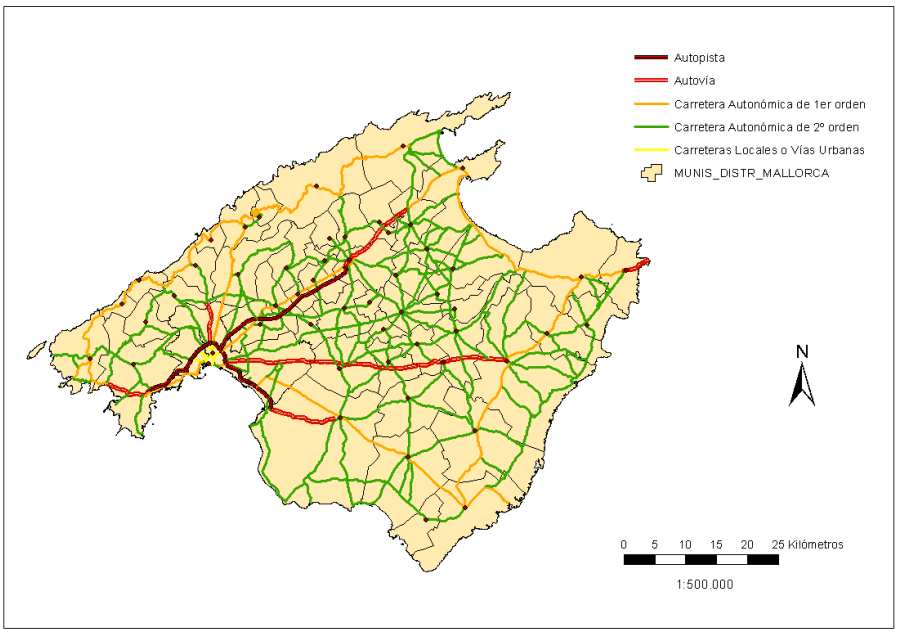

Figura 1. Red de carreteras de Mallorca
Fuente: Mapa de carreteras 2009 del Ministerio de Fomento, Servei de SIG i Teledetecció de la UIB y elaboración propia

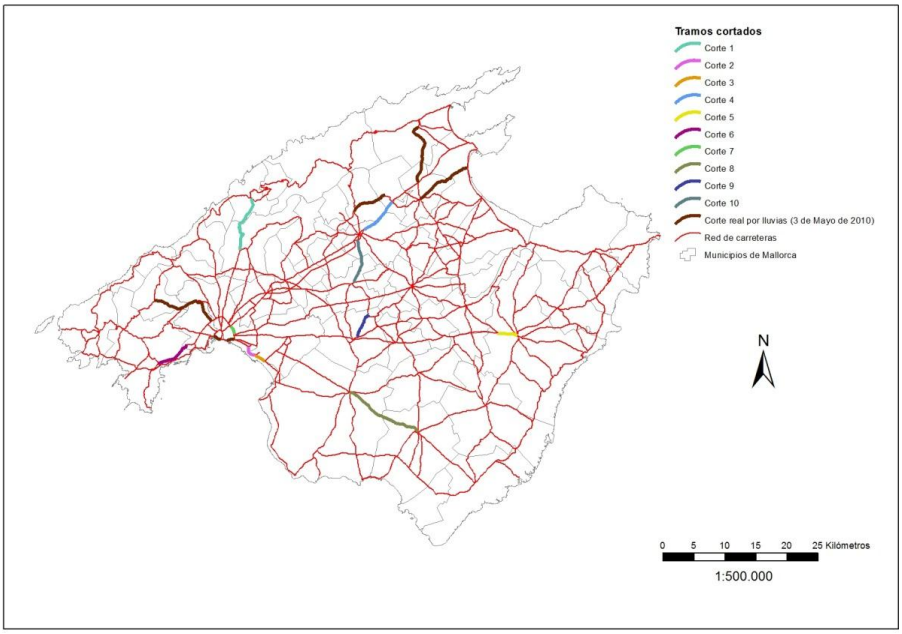

Figura 2. Tramos cortados de la red de carreteras de Mallorca para efectuar el análisis de variación de la accesibilidad y de valoración de la vulnerabilidad de la red.
Fuente: Elaboración propia

© Los autores
www.geo-focus.org

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

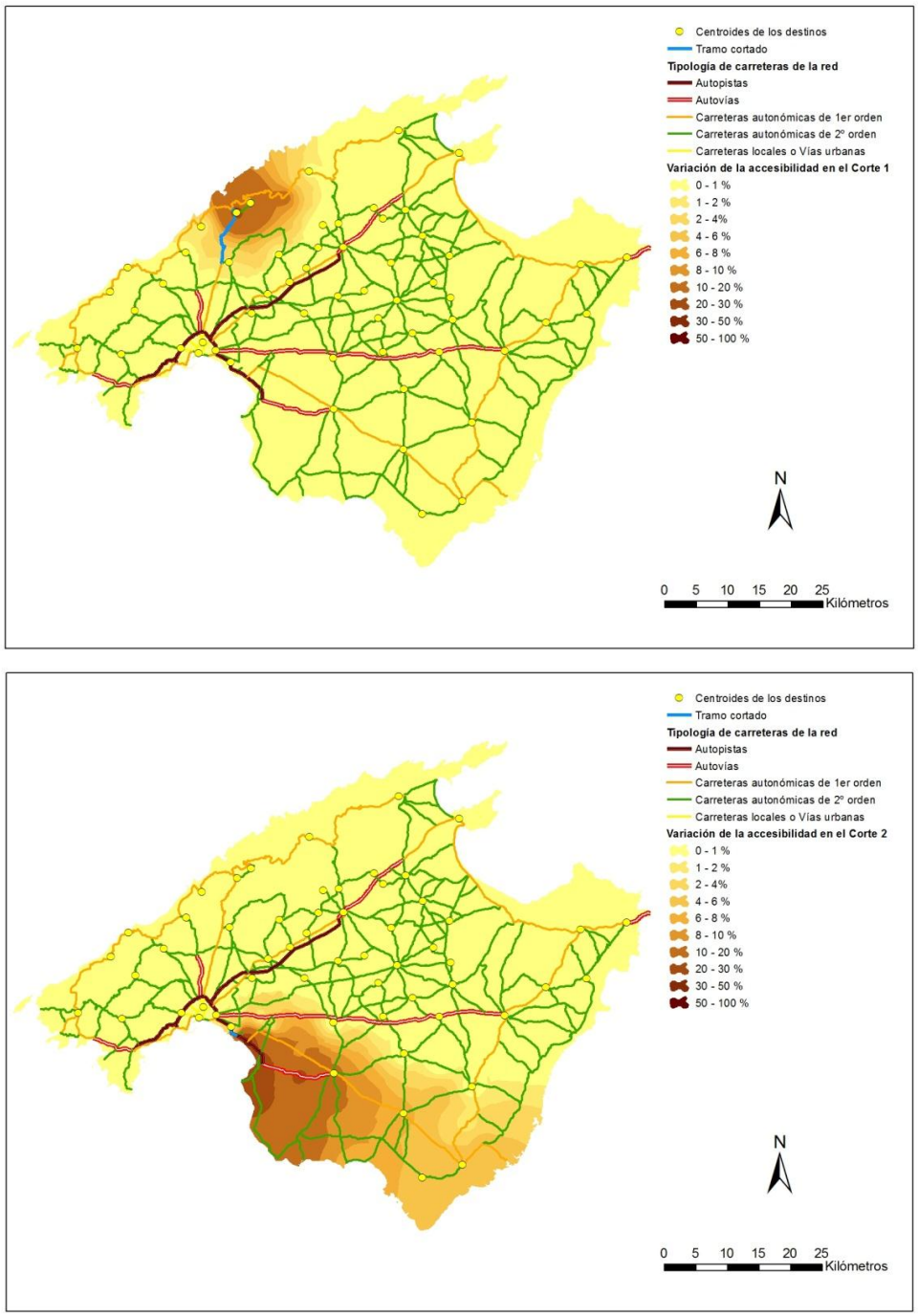

Figura 3. Variación de la accesibilidad en el escenario del Corte 1 Bunyola a Sóller (mapa superior) y en el escenario del Corte 2 Aeropuerto a Palma (mapa inferior)
Fuente: Elaboración propia

© Los autores
www.geo-focus.org

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

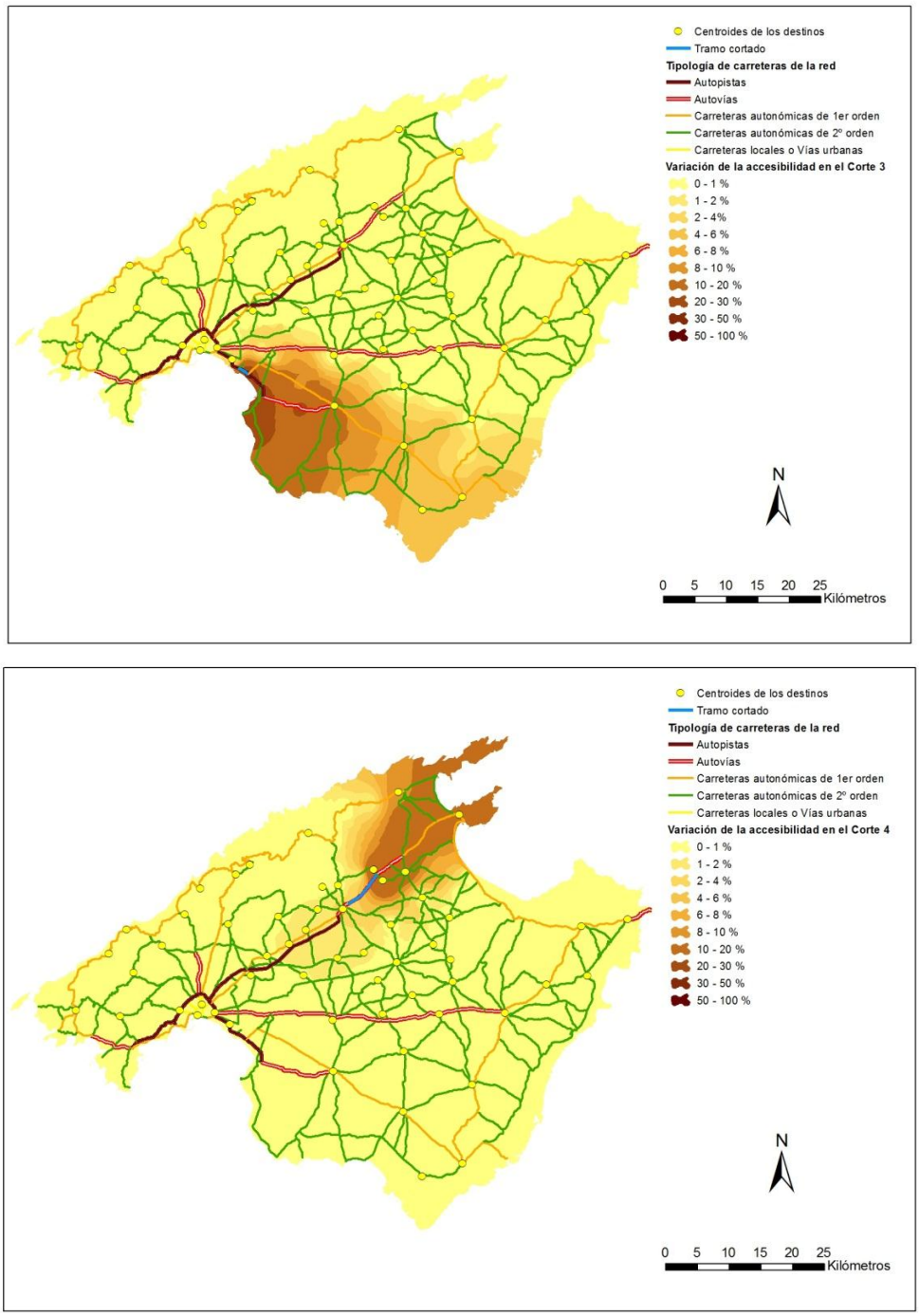

Figura 4. Variación de la accesibilidad en el escenario del Corte 3 Aeropuerto a Llucmajor (mapa superior) y en el escenario del Corte 4 Inca a Alcudia (mapa inferior)
Fuente: Elaboración propia

© Los autores
www.geo-focus.org

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

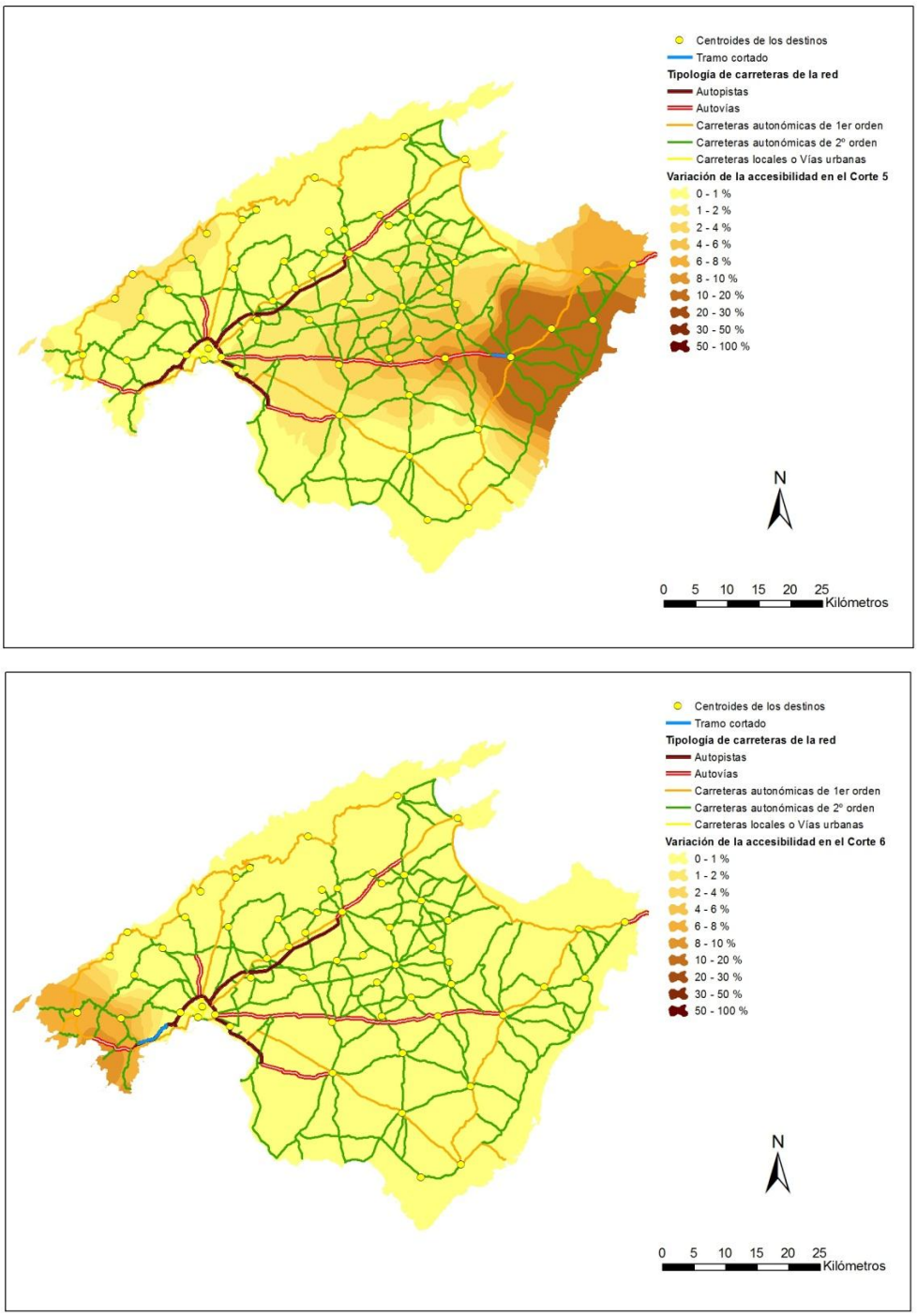

Figura 5. Variación de la accesibilidad en el escenario del Corte 5 Palma a Manacor (mapa superior) y en el escenario del Corte 6 Palma a Calvià (mapa inferior)
Fuente: Elaboración propia

© Los autores
www.geo-focus.org

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

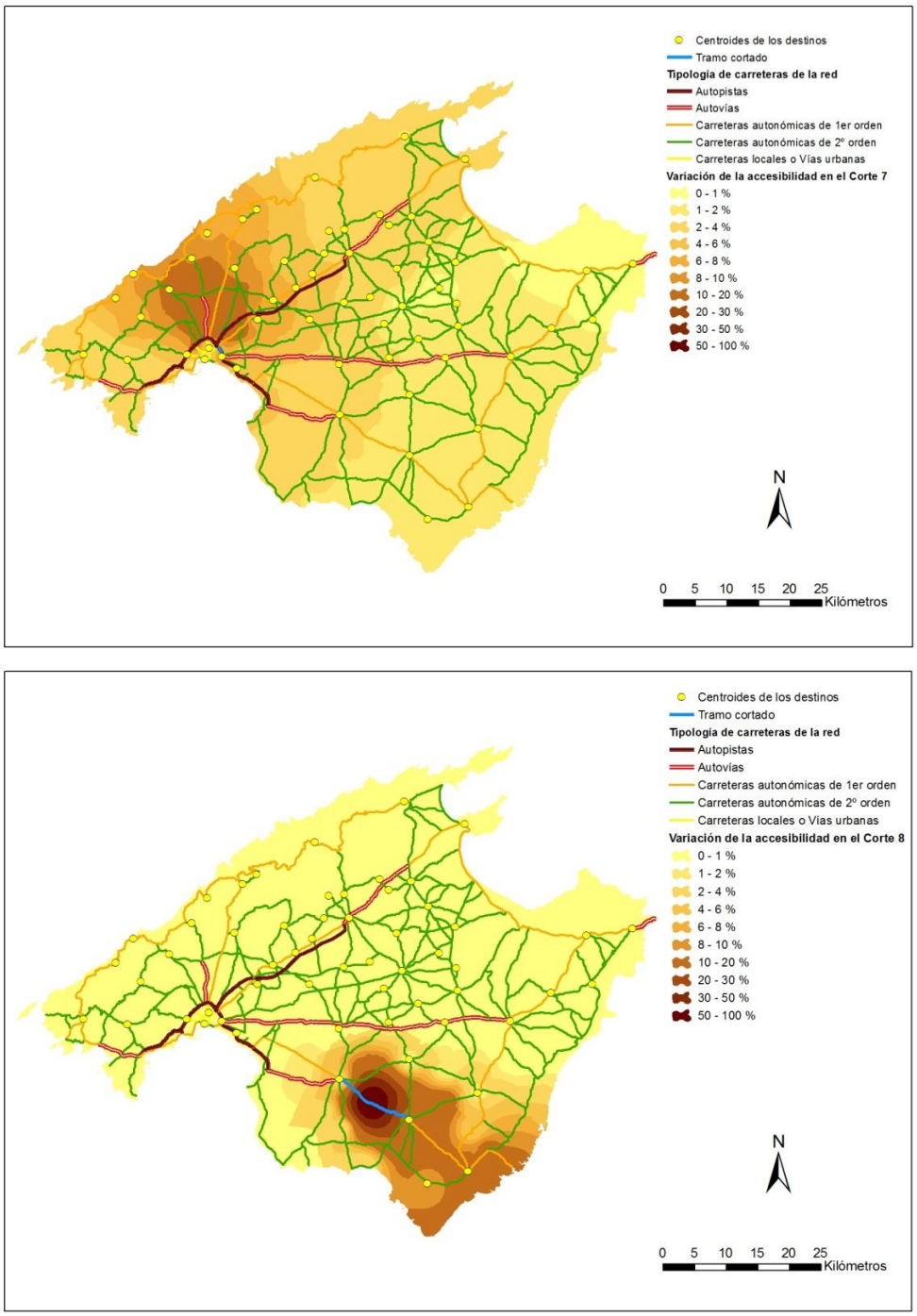

Figura 6. Variación de la accesibilidad en el escenario del Corte 7 Circunvalación de Palma (mapa superior) y en el escenario del Corte 8 entre Llucmajor y Campos (mapa inferior)
Fuente: Elaboración propia

© Los autores
www.geo-focus.org

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

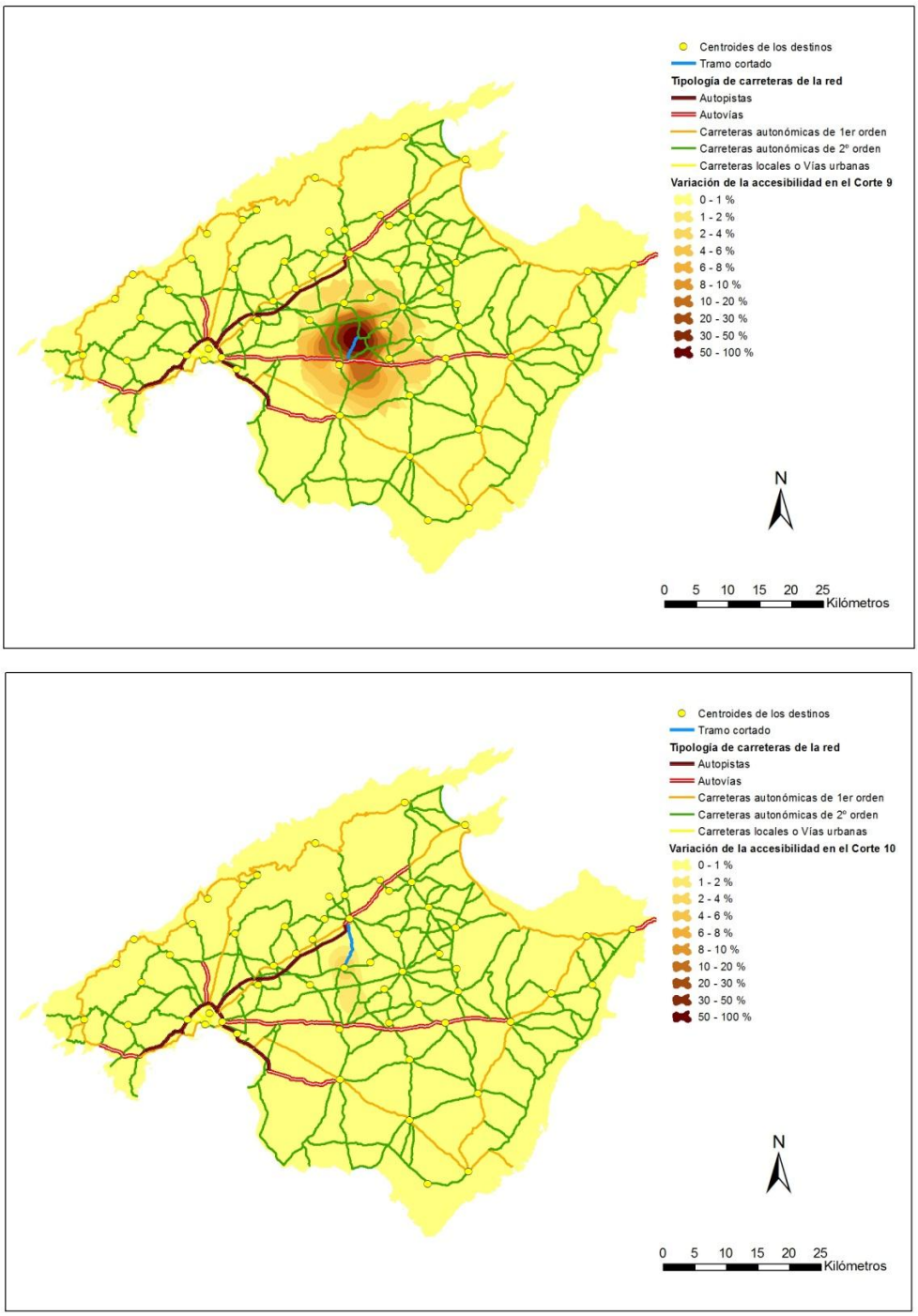

Figura 7. Variación de la accesibilidad en el escenario del Corte 9 entre Algaida y Pina (mapa superior) y en el escenario del Corte 10 entre Inca y Sencelles (mapa inferior)
Fuente: Elaboración propia

© Los autores
www.geo-focus.org

Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012): "Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de carreteras de Mallorca", GeoFocus (Artículos), nº 12, p.374-394. ISSN: 1578-5157

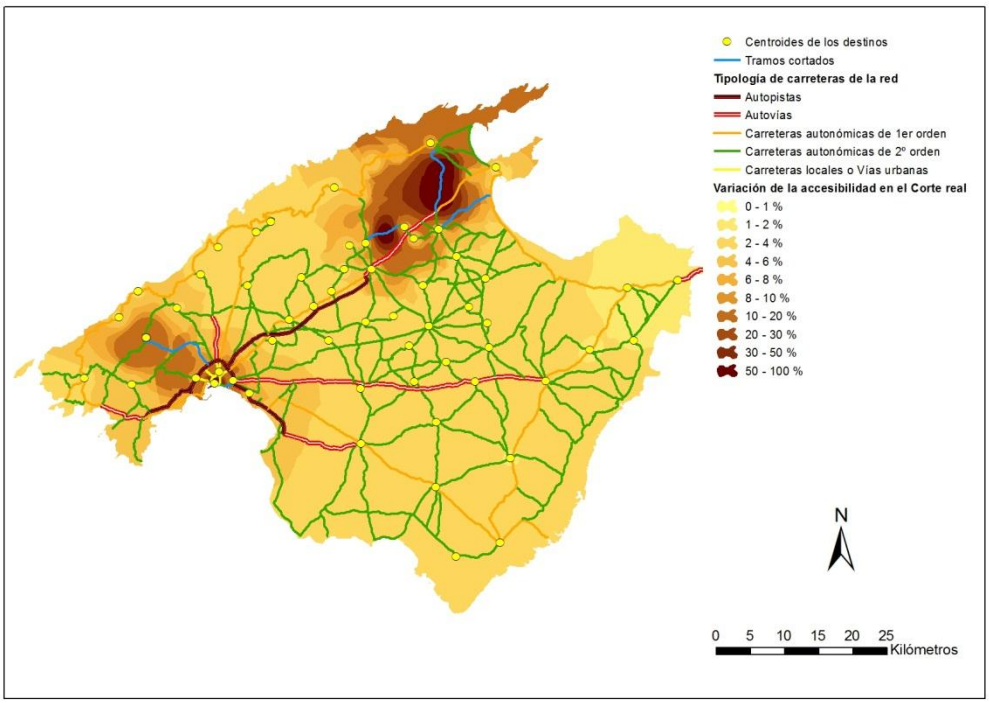

Figura 8. Variación de la accesibilidad en el escenario de los Cortes Reales de 10 de Mayo de 2010
Fuente: Elaboración propia

[1] Un avance de resultados de investigación de este trabajo fue presentado en el *V Congreso Geografía de los Servicios* (Rodríguez Núñez, 2011).
[2] No hemos encontrado estudios españoles sobre vulnerabilidad de las redes de transporte que utilicen herramientas SIG. Díaz Pineda (2000) aborda este tema, pero desde una perspectiva diferente.
[3] La red de carreteras de Mallorca ha sido previamente analizada desde el punto de vista topológico (Brunet Estarelles, 1979 y Binimelis Sebastián, 1989), del transporte colectivo (Brunet Estarelles, 1989) y de la optimización de rutas de transporte escolar (Seguí Pons *et al.*, 2003).

© Los autores
www.geo-focus.org