

significaría que en el futuro la competitividad de las redes de ciudades se fundamentará en modelos económicos más basados en el conocimiento que en el consumo de recursos. En consecuencia, tratar de cambiar el modelo económico por razones únicamente medioambientales sin considerar el papel que desempeñan las economías de aglomeración (redes de ciudades) podría tener efectos negativos inesperados y causar disfunciones en términos económicos pero también ecológicos.

Estas conclusiones se pueden relacionar con la Estrategia Europa 2020 que incentiva un "crecimiento inteligente, sostenible e inclusivo", destacando el rol que pueden tener para conseguir estos objetivos las redes de ciudades policéntricas que configuran las megarregiones europeas (véase el anexo para más detalles de cada megarregión). En un futuro próximo, habrá que redirigir las políticas económicas y regionales hacia una mejora de la sostenibilidad a nivel megarregional.

LAS REDES DE CIUDADES: LA ESTRUCTURA DE LAS MEGARREGIONES EN EUROPA

Joan Marull
Carme Font
Rafael Boix

1. Las redes urbanas policéntricas

En los últimos dos siglos los límites de las ciudades se han estado redefiniendo constantemente. La fuerza motriz principal de los cambios de escala experimentados por las ciudades ha sido el efecto liberador de lo que se ha denominado "economías externas espacialmente móviles" (Trullén, *et al.* 2013), que no están limitadas a una simple localidad debido a fuerzas de aglomeración, sino que pueden crear complejas "estructuras urbanas transmetropolitanas a gran escala" (Lang y Nelson, 2009), como son las megarregiones.

El desarrollo de las megarregiones es causa y consecuencia de la densificación y la aceleración de procesos socioeconómicos, que resultan en niveles crecientes de complejidad y eficiencia. Las megarregiones están formadas por centros metropolitanos y sus áreas de influencia (Ross, 2009). Representan una nueva unidad de análisis de la red de ciudades, normalmente policéntrica, que emerge de la expansión de áreas metropolitanas, que crecen más allá uniéndose con otras metrópolis.

Un debate actual relevante en relación con las megarregiones se basa en la cuestión de si el policentrismo debería incorporar aspectos relacionales entre los centros que configuran el sistema urbano (Green, 2007). El policentrismo morfológico básicamente trata la dimensión y la distribución de los centros urbanos en el territorio y compara las distribuciones más equilibradas (Meijers y Burger, 2010). A su vez, el policentrismo funcional considera las conexiones entre los asentamientos y estudia el conjunto de relaciones multidireccionales (Goei, *et al.* 2010).

Combinar las características morfológicas con las relaciones funcionales en una misma aproximación conduce a una confrontación entre distintas dimensiones del policentrismo (Hoyler, *et al.* 2008). Se ha demostrado que muchas regiones tienden a ser más morfológicamente que funcionalmente

policéntricas, es decir, con distintos nodos pero con poca conectividad entre ellos. Esta diferencia se explica por la dimensión, la conectividad externa y el grado de autosuficiencia (Burger y Meijers, 2012).

En este sentido, el término policentrismo básicamente se refiere a la pluralidad de centros urbanos en un territorio (Parr, 2004). No obstante, el policentrismo tiende a estar estrechamente asociado con una distribución equilibrada de la importancia de estos centros urbanos en uno o diversos niveles. El presente artículo propone una serie de indicadores para medir, desde una aproximación estructural, la eficiencia y la estabilidad de las redes de ciudades a escala megarregional en el ámbito europeo (Marull, *et al.* 2015), tomando como referente la megarregión Barcelona-Lyon.

El desarrollo de las redes de ciudades dentro de la matriz territorial no es ajeno al proceso disipativo (Filchakova, *et al.* 2007), lo que resulta en una creciente complejidad inherente al propio metabolismo urbano (Wilson, 2009). El propósito de este artículo es demostrar que las megarregiones emergen a través de una mayor disipación de energía, pero también por el establecimiento de redes de ciudades conectadas por sistemas de transporte, que se tornan más eficientes en la actividad económica y de conocimiento, lo que sugiere la necesidad de una nueva escala geográfica para explorar la sostenibilidad (figura 1).

La aparición de complejidad en el territorio es inevitable, debido a la disipación de energía en el espacio (Pulselli, *et al.* 2006). Cuando una ciudad crece, las necesidades suelen aumentar más rápidamente que las disponibilidades, lo que pone unos límites al crecimiento. Con el fin de superarlos, es preciso desarrollar sistemas de transporte más rápidos y sistemas de procesamiento más eficientes. En el pasado, un elemento importante para el crecimiento de las grandes ciudades fue el desarrollo de los ferrocarriles, que aumentaron la eficiencia del transporte, y las máquinas de vapor, que incrementaron la capacidad de crear empleo. Actualmente, el tren de alta velocidad (TAV) tiene el potencial de ser un modo de transporte eficiente a escala megarregional (figura 2).

A modo de ejemplo, el TAV es a menudo citado como una solución a diversos problemas de transporte, ya que puede contribuir a reducir la congestión en las carreteras y los aeropuertos, mejorar la movilidad e, incluso, aportar algunos beneficios ambientales. En relación con este último aspecto, se ha demostrado empíricamente, para el caso del Estado español, que las emisiones de CO₂ de los TAV (por pasajero) suelen ser iguales o incluso menores que las de los trenes convencionales que viajan entre las mismas estaciones, pero en el caso del TAV se incrementa notablemente la velocidad.

Así pues, el TAV es más eficiente energéticamente que el transporte en avión y por carretera y, por lo tanto, su implantación debería disminuir las emisiones de CO₂ en la megarregión de Barcelona-Lyon. Por otra parte, el tiempo de viaje entre los distintos destinos se acorta hasta el punto de que puede competir eficazmente con el avión a nivel de megarregión (figura 2). Ambos indicadores dan lugar a un impacto potencial positivo de este modo de transporte megarregional en términos económicos y ambientales.

Acto seguido se estudian las doce megarregiones europeas —incluyendo la megarregión Barcelona-Lyon para aproximar la evolución de las redes de ciudades y las metrópolis hacia sistemas urbanos más

complejos y eficientes, analizando su implicación en relación con la sostenibilidad.

2. Análisis de la red de ciudades

Los datos de luces nocturnas (*night time light*, NTL) que proporciona el sensor satelital Defense Meteorological Satellite Program-Operational Linescan System (DMSP-OLS) permiten analizar, a escala global, la evolución de redes de ciudades hacia estructuras que ya superan la escala metropolitana (Doll, 2008; Zhang y Seto, 2011), en sistemas que denominamos megarregiones.

Se ha realizado un análisis para determinar cómo cambia la estructura de estos sistemas de ciudades en el tiempo (figura 3), mediante indicadores de complejidad, eficiencia, estabilidad y policentricidad (Bonacich, 1987; Latora y Marchiori, 2003; Cover y Thomas, 2006), utilizando las principales redes viales y ferroviarias de las megarregiones europeas (figura 4).

Número de ciudades conectadas

Los resultados muestran que, en la mayoría de casos, las megarregiones han aumentado el número de nodos (ciudades >50.000 habitantes) (tabla 1), excepto 'Berlín', que tiene exactamente el mismo número, y 'Prague', que pierde uno. El mayor número de nodos es $N_{\max}=203$, y corresponde a 'Am-Brus-Twerp'. El caso de 'Berlín' es debido al proceso histórico derivado de la segunda Guerra Mundial, y el caso de 'Prague' se explica por un decrecimiento de la población en los últimos años (Kostecký y Čermák, 2004).

Las megarregiones europeas han incrementado sus redes de ciudades en el periodo de análisis (1991-2005). Una red es más eficiente si conecta un mayor número de ciudades en el menor tiempo posible, por lo tanto el tipo de estructura de la red de transporte adquiere un papel relevante.

Eficiencia y estabilidad de la red de transporte

Para medir la eficiencia de la red se considera tanto el número de ciudades conectadas como la calidad de las vías de comunicación, en este caso expresada a partir de la velocidad media a la que se puede circular por la red. Por lo tanto, este indicador es una medida de las conexiones en red entre los asentamientos que caracterizan el policentrismo funcional.

Las megarregiones con un crecimiento más rápido son 'Glas-Burgh', 'Madrid' y 'Lisbon'. Pero aunque estas megarregiones prácticamente han doblado su dimensión, la eficiencia de la red no ha crecido de la misma forma (tabla 2). En el caso de 'Paris', 'Barce-Lyon', 'Rom-Mil-Tur' y 'Am-Brus-Twerp' se incrementa más la distancia total sobre el tiempo total para atravesar la red (por ejemplo, mejorando las infraestructuras). También ha mejorado la red ferroviaria en 'Frank-Gart'. En otros casos, el crecimiento de la red y la eficiencia (*NE*) son bastante similares.

La estabilidad de la red NE_{local} indica la capacidad de la red para reaccionar ante fallos. Mide la eficiencia de la subred formada por una ciudad y las ciudades vecinas (a menos de una hora) cuando esta ciudad no está. Por lo tanto, este indicador es una medida del equilibrio en la distribución de ciudades según la estructura en red que caracteriza el policentrismo morfológico.

La estabilidad de la red tampoco es del todo relacionada con el número de nodos. Podemos ver (tabla 2) que la red vial de

'Paris' de 2005 está en la tercera posición en términos de estabilidad, mientras que es la séptima en número de nodos (tabla 3.2.1). 'Madrid' tiene un comportamiento similar. En contraste, 'Rom-Mil-Tur' es una de las megarregiones con más nodos y, al mismo tiempo, su red de carreteras ofrece menos estabilidad.

Los indicadores propuestos para medir la estructura de la red de ciudades a escala megarregional están correlacionados entre ellos. Una red estable incrementa su eficiencia. Además, cuando una red compleja incorpora un alto grado de policentrismo se vuelve más eficiente.

Complejidad de la red de transporte

Una red de transporte es más compleja cuantos más caminos posibles existan para ir de una ciudad a otra de la red. Se interpreta que el sistema con mayor entropía es el más complejo porque ello implica que cuesta prácticamente lo mismo llegar a cualquier nodo (Cover y Thomas, 2006). El policentrismo se refiere a la pluralidad de ciudades en un territorio. No obstante, el policentrismo tiende a estar estrechamente asociado con una distribución equilibrada en la importancia de estas ciudades, aspecto que mide la complejidad de la red.

La complejidad (H), medida a partir del índice de Shannon (1948), no varía mucho en el periodo de análisis (tabla 3). En el análisis hemos tenido en cuenta la distancia de las conexiones como medida ponderada. No obstante, la complejidad se incrementa de 1991 a 2005 en las redes vial y ferroviaria, excepto para los casos de 'Prague' y 'Paris' a causa de su crecimiento. En general los resultados son bastante altos, lo que significa que estas redes son considerablemente densas.

Comparando los valores de complejidad y eficiencia, los resultados muestran una clara relación logarítmica (figura 5). Es decir, que en redes de ciudades densas como son las megarregiones, un pequeño aumento de complejidad significa una eficiencia más elevada. Una complejidad más elevada de la red incrementa la eficiencia, pero hay un estancamiento en sistemas altamente complejos, donde entonces podría ser más eficiente aumentar la información organizada.

Más interesante todavía es observar la relación entre la complejidad o la eficiencia de la red de carreteras y la actividad económica (PIB) en las megarregiones europeas (1991 y 2005), logarítmica en el primer caso y lineal con el segundo (figura 6).

Estructura de la red de ciudades

En este artículo se ha considerado que una megarregión consiste en una aglomeración policéntrica de ciudades y su entorno menos denso. En base a los criterios definidos, la mayor parte de las megarregiones europeas se han mostrado como redes compactas que mayormente toman una estructura policéntrica. La estructura policéntrica es portadora de más información organizada.

Los principales cambios estructurales son el paso de estructura de árbol a policéntrica (tablas 4 y 5) según la distribución de las ciudades en centros y subcentros de la red (figura 3). Algunas ciudades asumen función de centro, al mejorar las infraestructuras que las conectan con el entorno. Este es el caso de la red ferroviaria de 'Glas-Burgh'. Mientras que en 'Lisbon' la red se torna más monocéntrica, debido a su crecimiento. Las otras megarregiones mantienen el tipo de estructura, con pequeñas variaciones respecto a la distribución de centralidad.

Finalmente, se ha calculado el grado de policentricidad (P) (Marull, *et al.* 2015) para el periodo de análisis (tabla 6). Los resultados muestran una tendencia a aumentar la policentricidad de la red de transporte (vial y ferroviaria). La megarregión con un grado de policentrismo más elevado es 'Frank-Gart'.

La megarregión Barcelona-Lyon es la sexta en policentrismo (P) (figura 7). Cuando una red urbana se hace lo bastante compleja le es más eficiente invertir en información (conocimiento) que en energía para aumentar su actividad económica.

3. Conclusiones. ¿Son sostenibles las redes urbanas policéntricas?

Las megarregiones han emergido como consecuencia de la densificación y la aceleración de los procesos socioeconómicos. Estas redes de ciudades concentran una gran proporción de población, producción, innovación y bienestar social a nivel mundial, aunque también son mayores consumidoras de recursos naturales. Nuestra pregunta de investigación se centra en analizar si las megarregiones evolucionan hacia un modelo (in)sostenible. La pregunta resulta trascendental y tiene implicaciones directas en el planeamiento urbanístico y las políticas territoriales proactivas.

En este artículo se han estudiado las megarregiones desde el punto de vista de la teoría de redes y la 'termoeconomía'. Se ha propuesto un isomorfismo donde las megarregiones se definen como 'sistemas complejos abiertos' formados por redes de ciudades que intercambian energía interna y externa. Las propiedades termodinámicas de los sistemas complejos abiertos sugieren una secuencia donde la estructura interna de las megarregiones debería evolucionar hacia una red más conectada, aumentando su complejidad pero también incrementando la producción de información.

Sin embargo, un sistema urbano no puede absorber con la misma estructura una cantidad ilimitada de energía, de forma que reacciona modificando su organización funcional con la finalidad de poder generar y controlar una mayor cantidad de información, lo que a su vez incrementa su grado de policentrismo. Este proceso permite una reducción de la entropía, y un incremento en la eficiencia y estabilidad del sistema, lo que potencialmente implica una mayor sostenibilidad.

Con el propósito de estudiar la sostenibilidad de las megarregiones, se proponen una serie de indicadores fundamentados en la teoría de redes y la termoeconomía, midiendo las propiedades básicas de la siguiente secuencia: complejidad, policentricidad, eficiencia y sostenibilidad. Los indicadores se han aplicado a la evolución de las doce megarregiones europeas en el periodo 1991-2005. Los resultados muestran que las megarregiones incrementan sus niveles de complejidad, aumentando el grado de policentricidad, e incrementando los niveles de eficiencia y estabilidad. La conclusión es que tanto la secuencia teórica como los cálculos empíricos que la avalan, sugieren que las megarregiones evolucionan hacia una estructura urbana más sostenible.

En consecuencia, los indicadores sobre redes de ciudades propuestos en este capítulo, facilitan el diálogo entre el análisis económico-ecológico de los balances sociometabólicos y el estudio de los sistemas urbanos, en una nueva escala espacial configurada por las megarregiones, lo que a su vez tiene que permitir explorar el desarrollo urbano sostenible de la megarregión Barcelona-Lyon.

DINÁMICAS TERRITORIALES: LA SOSTENIBILIDAD DE LAS MEGARREGIONES EUROPEAS

Elena Domene
Joan Marull
Vittorio Galletto

1. Una nueva escala para el estudio de los sistemas urbanos

La imponente representación de la iluminación artificial nocturna de la Tierra nos permite intuir redes de ciudades, con sus conexiones, distribuidas según unos patrones que recuerdan sistemas neuronales, incluso galaxias, según la imaginación del observador (figura 1). Estas imágenes fueron conseguidas con el sensor DMSP-OLS del satélite NOAA (National Geophysical Data Center, Colorado, USA), inicialmente concebido para registrar la presencia de nubes bajo la débil luz lunar. En ausencia de nubes, el sensor capta la luz emitida por las poblaciones, las vías de comunicación iluminadas y la actividad económica.

Las imágenes de luces nocturnas que nos proporciona el sensor satelital DMSP-OLS permiten analizar, a escala planetaria, la evolución de la red de ciudades hacia estructuras que ya superan la escala metropolitana, en sistemas que denominamos megarregiones (Trullén, *et al.* 2010). Las megarregiones son unidades económico-territoriales emergentes a escala global, fruto de la concentración de centros de producción, innovación y mercados de consumo (Florida, *et al.* 2007). Su evolución se basa en dinámicas socioeconómicas; procesos que ocasionan profundas transformaciones en la matriz territorial de la que forman parte y, a la vez, aceleran el cambio global.

En contra de la idea de un 'mundo plano' que se ha asociado al proceso de globalización, la ubicación geográfica es mucho más importante para la economía de lo que nunca antes lo había sido. Cuando se afirma que la globalización tiene el efecto de centrifugar y dispersar la actividad económica (Friedman, 2005), no se tiene en cuenta la importancia de las economías de aglomeración. La disparidad en la capacidad de concentración económica en determinadas áreas metropolitanas —ciudades situadas en torno a los núcleos principales y conectadas a aglomeraciones de escala regional (picos), con respecto a las ciudades que quedan al margen de estos procesos (valles)— corrobora esta afirmación (Castells, 1996). Compiten las empresas, las ciudades, las metrópolis y, ahora, también las megarregiones.

La complejidad en el territorio aparece inevitablemente, como consecuencia de la disipación de energía en el espacio, con la consiguiente construcción de estructuras organizadas (Morrowitz, 2002). El desarrollo del sistema urbano no es ajeno a este proceso disipativo, que provoca una creciente complejidad, inherente al propio metabolismo urbano. Sin embargo, la demanda de suelo para emplazar viviendas, actividad económica, infraestructuras y redes de transporte produce una notable presión en los paisajes.

Demasiado a menudo la dispersión urbana ha sido escasamente gestionada, lo cual ha conducido a un tratamiento del territorio ineficiente. Eso ha comportado graves problemas en la metrópolis y el bienestar de las personas, y en el funcionamiento ecológico de la matriz territorial. Existen numerosos estudios sobre ecología urbana a escala local, y sobre los efectos ambientales del crecimiento urbano a escala metropolitana y regional. No obstante, estos estudios esconden una nueva realidad,