

Sesión VI. General

Propuesta de comunicación:

La consolidación de los principales ejes de transporte en España
(1970 – 1988)

The consolidation of the main transport axes in Spain (1970 –
1988)

FEDERICO PABLO-MARTÍ, Universidad de Alcalà

EDUARD ALVAREZ-PALAU, Universitat Oberta de Catalunya

MATEU MORILLAS-TORNÉ, Universitat de Lleida

JORDI MARTÍ-HENNEBERG, Universitat de Lleida

Resumen: El objetivo del presente trabajo es realizar un estudio de los flujos transportados por los ejes que forman las infraestructuras terrestres en España entre 1970 y 1988. Durante este periodo, hemos cuantificado cómo la red principal de carreteras y autopistas se benefició de un trasvase modal del ferrocarril al coche y al camión, alterando los principales ejes de transporte.

Utilizando datos oficiales de transporte de pasajeros y mercancías, hemos elaborado una nueva base de datos en formato SIG que ha permitido comparar los ejes que se vieron beneficiados y perjudicados a lo largo del tiempo. Estos datos van a dar pie a estudiar la evolución del peso de las principales localidades conectadas, así como la relación entre el diseño de ambas redes y los flujos de transporte. En particular, se analizará si los corredores donde se ha promovido la competencia entre ferrocarril y carretera han salido reforzados en comparación con aquellos que únicamente han contado con uno de los dos medios de transporte. Es decir, nuestro objetivo es valorar hasta qué punto las políticas económicas en materia de transportes han ejercido una repercusión práctica.

El periodo analizado es solo de dieciocho años por motivos de disponibilidad de datos, aunque se sientan aquí las bases para ampliarlo en un futuro.

Palabras clave: ferrocarril, carretera, transporte de mercancías.

Abstract: The objective of this paper is to carry out a study of the flows transported by the axes that form the terrestrial infrastructures in Spain between 1970 and 1988. During this period, we have quantified how the main network of roads and highways benefited from a modal transfer of the railway to the car and the truck, altering the main transport axes.

Using official passenger and freight transport data, we have created a new database in GIS format that has made it possible to compare the axes that benefited and declined over time. These data will give rise to studying the evolution of the weight of the main connected localities, as well as the relationship between the design of both networks and transport flows. In particular, it will be analyzed whether the corridors where competition between rail and highway has been promoted have consolidated if we compare them to those that have only had one of the two means of transport. In other words, our objective is to assess the extent to which economic policies in the field of transport have had a practical impact.

The period analyzed is only eighteen years for reasons of data availability, although our objective is to extend it in the future.

Keywords: railway, highway, freight transport.

INTRODUCCIÓN

El tema central de esta comunicación es el análisis de los flujos de transporte y las transferencias intermodales de estos flujos a partir de un estudio cuantitativo. Se trata de

un contenido eminentemente metodológico, que pretende desarrollarse en un futuro en un doble sentido: ampliar el marco temporal referido a España, y perfilar esta metodología.

Nuestro planteamiento viene a cubrir algunas lagunas en la historia ferroviaria. Por una parte, aportamos el punto de vista de estudiar la función del ferrocarril desde la óptica de la demanda del servicio de transporte, ya que la mayor parte de trabajos se han interesado por la oferta (el desarrollo e impacto de la red y de las estaciones). Por otra, señalamos la necesidad de situar la relevancia del ferrocarril en el contexto del conjunto de los medios de transporte.

Diversas áreas de conocimiento se han interesado por esta temática. Por citar las dos más cercanas a este trabajo, hay que referirse en primer lugar a la historia económica y a los estudios sobre el proceso inversor (Herranz-Loncan, 2004) y el impacto del ferrocarril en el desarrollo económico, tanto en el marco general de Europa (Alvarez-Palau et al, 2021) como en el caso de España (Anes, 1978; Gómez-Mendoza, 1985; Martínez-Galarraga et al, 2015; Rosés et al, 2010). En segundo lugar, es necesario referirse al punto de vista de la geografía, que ha permitido incidir en el análisis territorial de la relevancia del ferrocarril en la localización de la población (Franch-Auladell et al, 2014) o específicamente de la urbanización (Mojica y Martí-Henneberg, 2011). Otros estudios también significativos para nuestro trabajo han incidido en la gobernanza del sector (Ortúñez-Goicolea, 2016) o han trazado estudios a escala muy detallada, como el que Pere Pascual (2016) llevó a cabo para Cataluña. No se puede acabar este escueto recorrido por la bibliografía imprescindible sin recordar dos obras que han servido de referencia: El libro ya clásico “Los ferrocarriles en España, 1844-1943” (Artola et al eds, 1978) y la obra de conjunto “150 años de historia de los ferrocarriles españoles” (Comín et al, 1998). Los trabajos sobre demanda son comparativamente menos numerosos, pero son relevantes el extenso capítulo de Anes (1978) y Germán (1999).

Aunque las infraestructuras de transporte desempeñan un papel importante en el crecimiento económico y la configuración del territorio, su mera presencia no la asegura. Es la utilización efectiva de estas infraestructuras, cuantificada por la cantidad y calidad del tráfico, lo que determina su impacto.

La correlación entre el uso de la infraestructura de transporte y su impacto económico es evidente. Una infraestructura que no se utiliza de manera óptima representa un gasto infructuoso que no produce retornos económicos significativos. Por el contrario, una infraestructura que maneja un volumen considerable de tráfico puede impulsar el comercio, facilitar la movilidad y estimular el desarrollo local.

Además, los cambios en la utilización de estas infraestructuras pueden tener impactos profundos en la distribución geográfica de la actividad económica dentro de un territorio. Así, por ejemplo, la creación de una nueva autopista puede reconfigurar las rutas de tráfico existentes, redirigiendo el flujo de viajeros y mercancías -y, en consecuencia, las oportunidades económicas- desde algunas áreas hacia otras, independientemente de si las infraestructuras de las rutas antiguas se mantienen o incluso se mejoran. Estos cambios pueden tener implicaciones significativas para las regiones cuyas economías locales dependen del tráfico.

A pesar de la importancia de estas cuestiones, el estudio de los flujos de transporte ha recibido una atención muy limitada en el campo de la historia económica. Este vacío en la investigación se justifica, en gran medida, por las dificultades para la obtención de los grandes volúmenes de datos que son necesarios para la aplicación de las técnicas de redes.

El análisis del tráfico en las redes de carreteras y ferrocarriles tiene dos vertientes fundamentales que se entrecruzan: por una parte, la relativa a la elección del medio de transporte y, por otra, la relacionada con la definición de las rutas intermodales. En otras

palabras, se trata de determinar cómo y por dónde se mueve la carga o los pasajeros (Liu et al 2017).

Hasta épocas muy recientes, los trabajos realizados sobre el tema se centraban en solo una de estas vertientes. Por ejemplo, Wang et al. (2013) exploraron los factores no observables que influyen en la elección entre carreteras y ferrocarriles como medio de transporte de mercancías. Por otro lado, Lian et al. (2015) emplearon modelos matemáticos para estudiar cómo los clientes eligen el servicio de transporte urgente.

El enrutamiento del flujo de carga intermodal también ha atraído a numerosos investigadores. He (2006) propuso un algoritmo para resolver el problema de encontrar la ruta de menor costo en el transporte multimodal de contenedores por carretera y ferrocarril. Wang et al. (2009) abordaron el problema de trazar rutas en una red de envío express multimodal y lo resolvieron usando software de programación matemática. Santos et al. (2015) analizaron el impacto de las políticas de transporte de carga, enfocándolo en cómo la asignación de flujos puede favorecer el transporte intermodal de ferrocarriles en Europa.

A pesar de estos avances, la mayoría de las investigaciones simplifican el problema al considerar los costos de viaje como constantes, ignorando algunas características clave del flujo de tráfico. Es importante considerar las peculiaridades del flujo de tráfico tanto en carreteras como en ferrocarriles al asignar flujos de carga en estas redes. En el caso del tráfico en las carreteras, se ha observado que el tiempo de viaje aumenta a medida que lo hace la carga de la vía. En cambio, en los ferrocarriles, el tiempo de viaje de un tren a través de una sección determinada se establece con antelación y permanece constante, independientemente de la carga de la sección.

En este trabajo se realiza una primera aproximación a estas cuestiones en el ámbito de los transportes terrestres en España durante la segunda mitad del siglo XX. En concreto se analiza la transformación en los flujos ferroviarios, causada por el auge del tráfico de carreteras entre 1970 y 1988. Para ello, se emplea la base de datos que hemos elaborado y que proporciona detalles precisos sobre el tráfico ferroviario y por carretera. Mediante análisis geoespacial y estadístico, el objetivo es identificar y cuantificar el impacto del desarrollo del transporte por carretera en la reorientación de los flujos de transporte desde las vías férreas. Los hallazgos de este estudio no solo revelan patrones históricos, sino que también pueden informar futuras decisiones sobre la planificación del transporte.

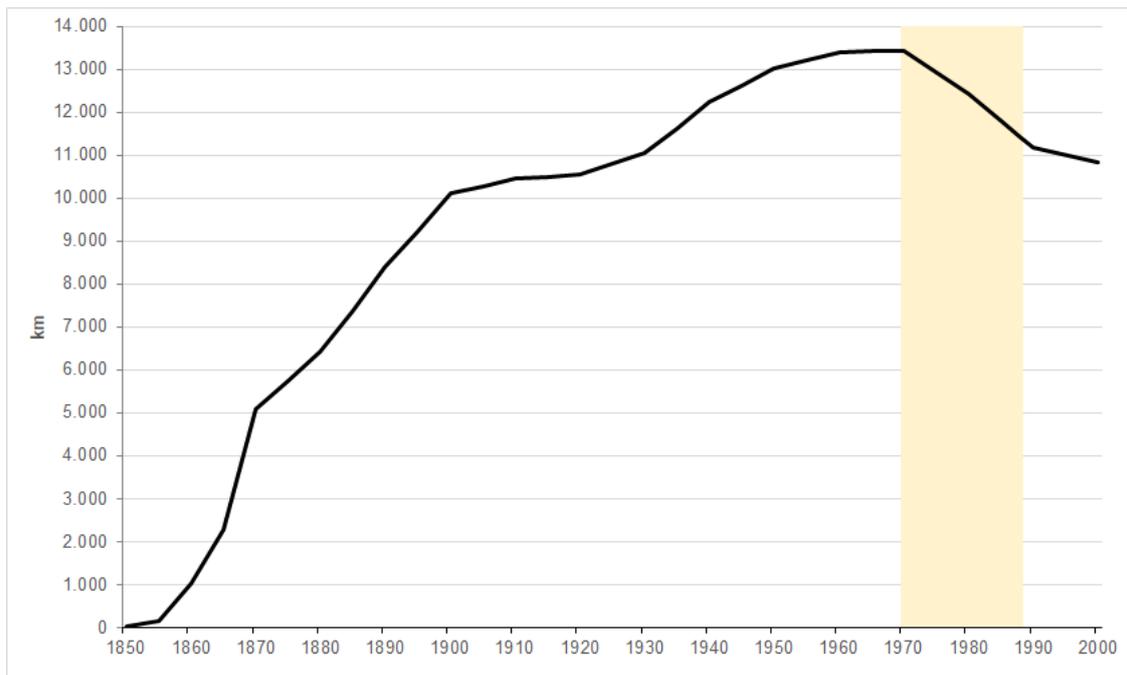
Esta comunicación se estructura en un primer apartado sobre Contexto y Datos, y un segundo sobre Metodología, Análisis de Redes y Flujos de Transporte.

1. CONTEXTO Y DATOS.

1. 1. Contexto

La información sobre infraestructura ferroviaria proviene de una base de datos de reciente creación (Esteban, 2021), que incluye la evolución histórica de la red ferroviaria y sus estaciones, tanto de ancho ibérico como de vía estrecha. Esta base es muy detallada, ya que los datos en formato SIG incluyen el detalle anual y los tramos van asociados a atributos sobre electrificación y vía única / doble. En esta comunicación se presentan algunos de los contenidos de este SIG, como se verá posteriormente. Previamente, en la Figura 1, hemos de observar un hecho relevante. El periodo que estudiamos (en tono sepia) coincide con una etapa de fuerte contracción de la red. Será interesante determinar si estos cierres afectan a los corredores de transporte que en este trabajo estudiamos.

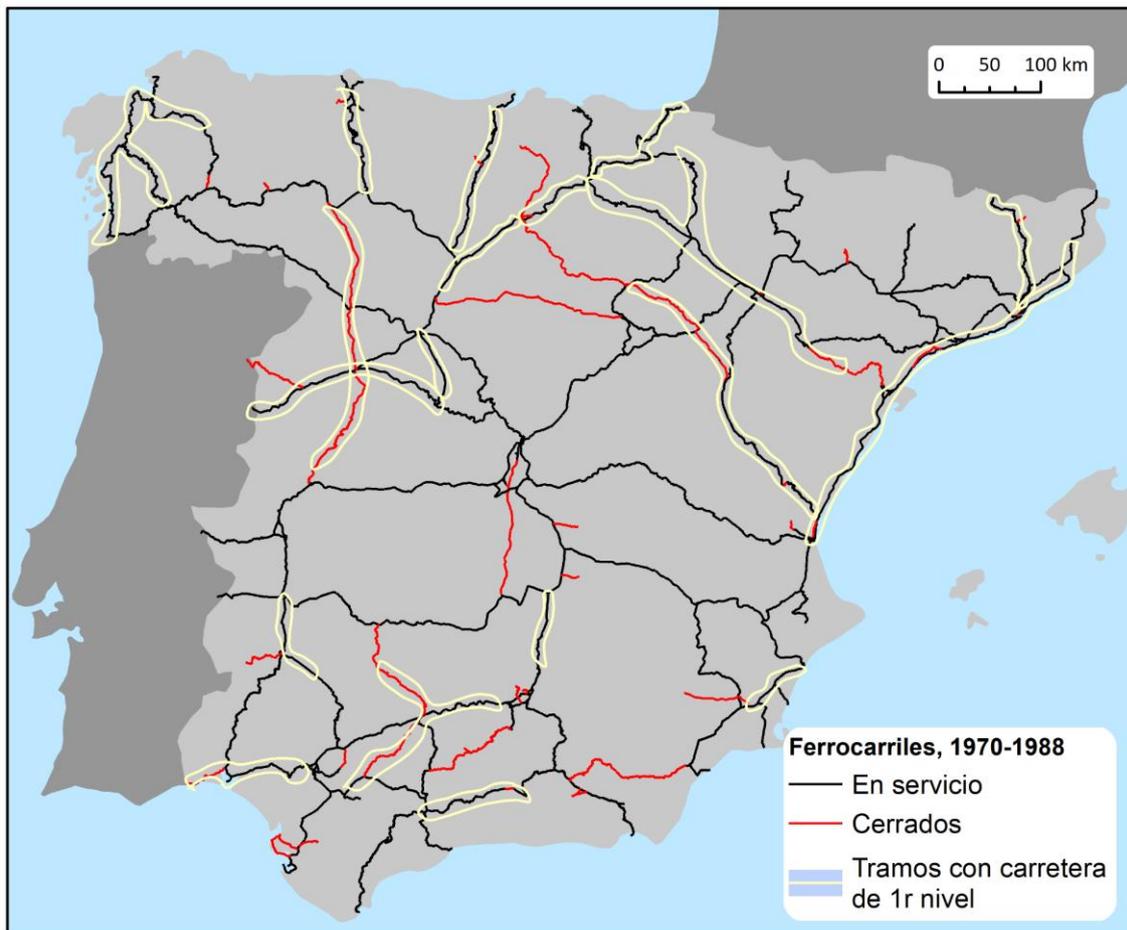
Figura 1. Evolución de la red de ancho ibérico en España. Total km.



Fuente: Elaboración propia a partir de Esteban (2021)

En el mapa de la Figura 2 pueden observarse los tramos de ferrocarril cerrados entre 1970 y 1988. Algunos de ellos coinciden con corredores alternativos de autopistas, autovías o carreteras de primer nivel (en servicio antes de 1988). Estas duplicidades carretera / ferrocarril se han destacado en amarillo. Si bien la mayoría de tramos de ferrocarril cancelados lo fueron en áreas con escasa densidad de población, es de destacar la diferencia entre las conexiones ferroviarias suprimidas pero que contaban con una alternativa de calidad por carretera (en algunos corredores ésta ha llegado, pero con retraso) y las que no. Desde el punto de vista del proceso de despoblación en España, los tramos en rojo (suprimidos durante nuestro periodo de análisis) y no rodeados por el dibujo en amarillo (alternativa por carretera) indican una situación de abandono, que afectó a amplias áreas de las dos Castillas.

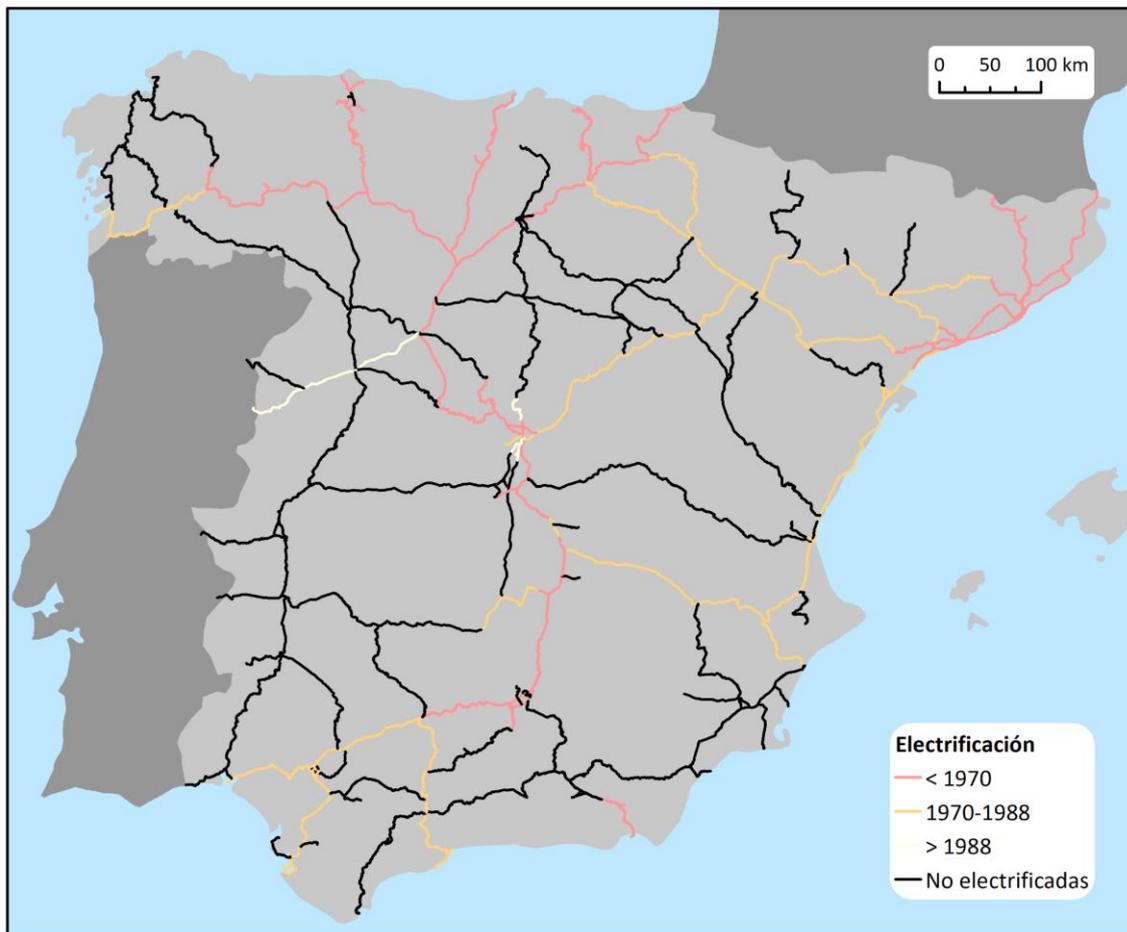
Figura 2. Tramos de confluencia de ferrocarril y carreteras principales, autovías y autopistas en España, 1970 - 1988.



Fuente: Elaboración propia a partir de Esteban (2021)

En términos del contexto para situar este trabajo, hay que tener también en cuenta las características cualitativas de la red en términos de electrificación (Figura 3) y doble vía de ancho ibérico (Figura 4). Puede observarse que la electrificación de la red ferroviaria en España es escasa. Si bien todas las líneas radiales con origen en Madrid están electrificadas, así como el conjunto de la red en Cataluña, ello no es así en buena parte del resto de la red. En la Figura 3 puede observarse que la situación era más precaria en 1970, pero se invirtió en electrificación durante el periodo 1970-1988, así como posteriormente en algún tramo concreto.

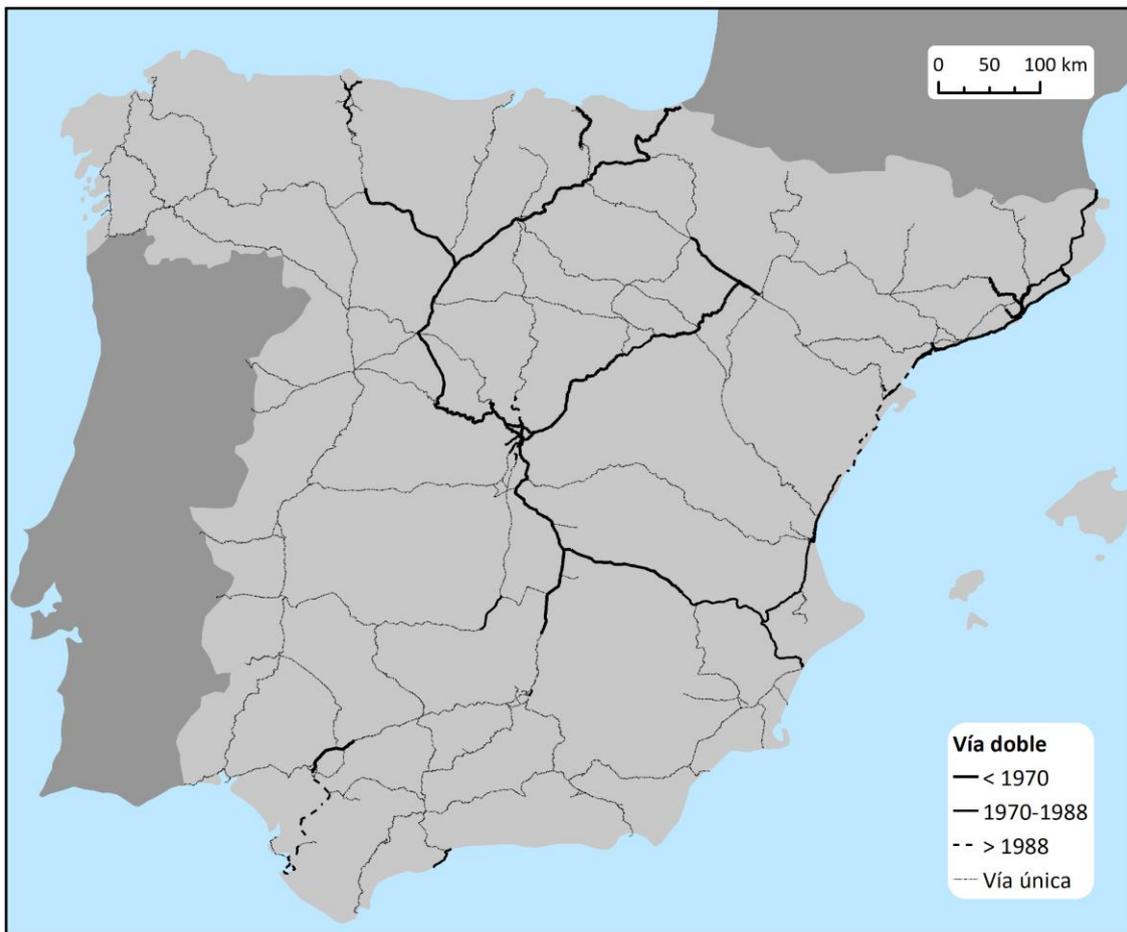
Figura 3. La electrificación de la red de ancho ibérico en España.



Fuente: Elaboración propia a partir de Esteban (2021)

En cuanto a la doble vía (Figura 4), la situación es aún más precaria ya que la mayor parte de la red es de vía única. También en este caso, la red radial desde Madrid cuenta con doble vía, así como la mayor parte de los tramos alrededor de Barcelona. Desde 1988 se ha continuado invirtiendo, aunque solo en los tramos Sevilla-Cádiz y en Castellón de la Plana. Hay que precisar que este mapa incluye toda la red que en 1970 estaba en servicio.

Figura 4. Doble vía en la red ferroviaria española.

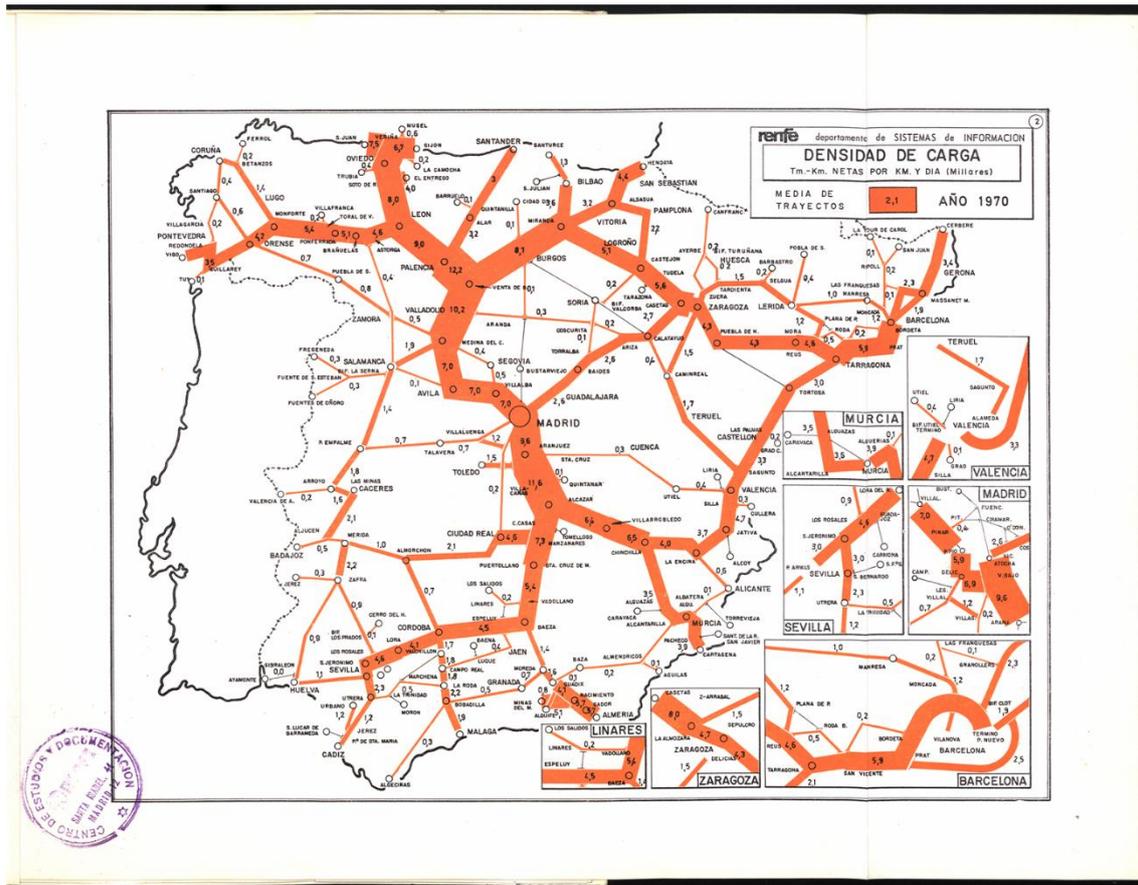


Fuente: Elaboración propia a partir de Esteban (2021)

1.2. Datos de tráfico ferroviario

En cuanto a los datos estadísticos, existe una colección de documentos cartográficos elaborados anualmente por RENFE, sobre tránsito ferroviario, desde mediados de la década de 1960 hasta 1990. Estos mapas tienen información sobre diferentes variables relativas al transporte ferroviario. Las más comunes son densidad de carga (la Figura 5 presenta un ejemplo de datos de esta variable), densidad de circulación y densidad de remolque, tanto de viajeros como de mercancías.

Figura 5. Densidad de Carga, TM netas por km y día en España, 1970.



Fuente: Biblioteca Ferroviaria. Museo del Ferrocarril de Madrid-FFE

Para el presente trabajo se han utilizado los datos de densidad de carga de los años 1970, 1980 y 1988. Con el uso de las herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica), se han añadido los valores de los mapas de RENFE a una capa vectorial de ferrocarriles, elaborada por Esteban (2021).

1.3. Datos de tráfico por carretera

El estudio del tráfico viario ha empleado frecuentemente los kilómetros recorridos por los vehículos (VKT) como proxy, a partir de mediciones de tráfico en puntos específicos de la red vial. Aunque esta medida puede variar debido a las conexiones a lo largo de los tramos, se utiliza ampliamente debido a la falta de mejores alternativas.

En España, los datos de VKT se han obtenido de encuestas de movilidad, conocidas como encuestas Movilia, hasta 2007. Estas encuestas han sido esporádicas y costosas, la última publicada ha sido Movilia 2006/2007¹, después de cinco años sin realizarse. Actualmente, el Instituto Nacional de Estadística (INE) está llevando a cabo estudios experimentales de movilidad cotidiana y estacional utilizando datos de telefonía móvil,

¹ <https://www.mitma.gob.es/informacion-para-el-ciudadano/informacion-estadistica/movilidad/movilia-20062007/encuesta-de-movilidad-de-las-personas-residentes-en-espan%CC%83a-movilia-20062007>

pero estos estudios se refieren a áreas de movilidad en general, no específicamente a la red de transportes, y hasta ahora sólo cubren los años 2020 y 2021.

En este trabajo vamos a utilizar los datos de intensidad de tráfico entre 1960 y 2021 elaborados por Pablo-Martí et al. (2023) a partir de los datos de intensidad media diaria (IMD) publicados por el Ministerio de Obras Públicas y sucesores durante el citado periodo (1960 – 2020).

Para los años en los que la única información son los mapas de IMD, se extrajeron los datos manualmente utilizando ArcGIS, y en concreto sus herramientas de procesamiento geoespacial. En la Figura 6 se muestra uno de los mapas utilizados como información de base.

Figura 6. Mapa de tráfico 1990 y detalle de la leyenda.





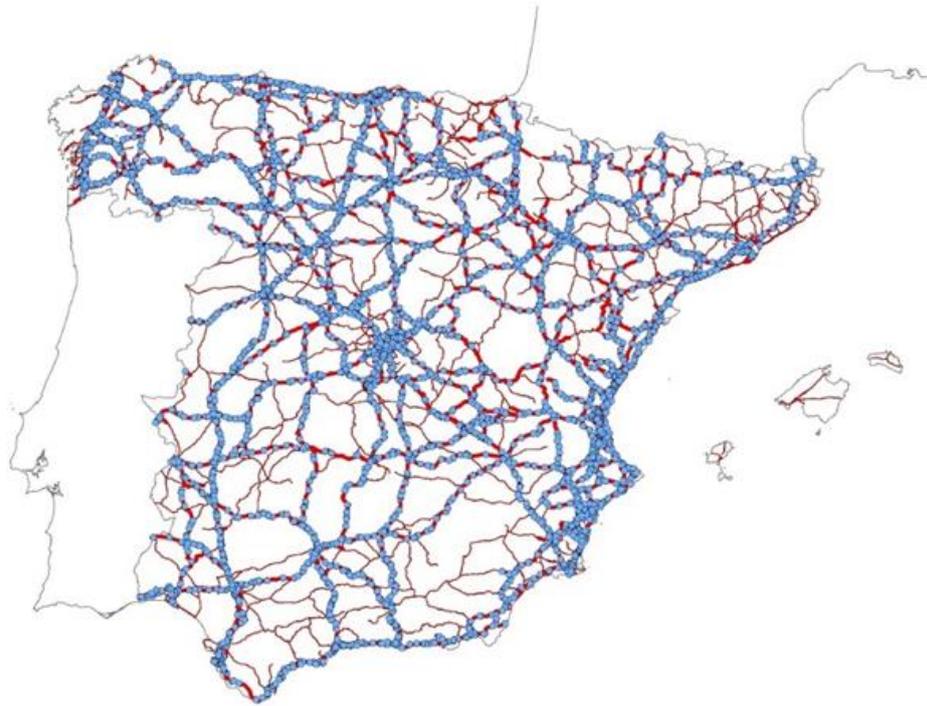
Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Transportes (1990).

Con la transferencia a las comunidades autónomas de parte de la red de carreteras nacionales en 1984 la información estadística sobre los flujos de tráfico se vio gravemente afectada. A partir de ese momento, la serie histórica solo pudo mantenerse parcialmente complementando los datos de la Dirección General de Carretera con información puntual de algunos aforos de la red transferida. Con el paso de los años, esta información dejó de ser homogénea, por lo que fue necesario complementarla con los datos proporcionados por las Comunidades Autónomas y las Diputaciones (Galán Bueno, 1999).

La falta de datos para algunos años y tramos, y la pérdida de la unidad estadística, hizo necesario que los huecos en la información fueran estimados mediante la interpolación de los datos disponibles. A pesar de que esto puede haber causado algunos errores, sobre todo cuando se produjeron en estos años la puesta en servicio de nuevas autopistas, creemos que el efecto a nivel agregado es mínimo y queda compensado por la ventaja de contar con un panel completo, con estimaciones de tráfico en 3.464 puntos de la red principal a lo largo de sesenta años. En la Figura 7 se muestra la red de carreteras considerada y con puntos azules la localización de los centros de medición para los que se tiene información para el periodo 1960-2020. Se ha supuesto que las carreteras principales que no tienen aforos es porque los organismos competentes consideraron que su bajo nivel de tráfico no lo hacían necesario. En estos casos, se le ha asignado un IMD igual a la media de la decila más baja de cada año.

Bajo este supuesto, nuestro estudio cubriría entre el 96% y el 99% del tráfico total, dependiendo de los años. La VKT se calculó asignando el valor observado en las estaciones de medición a los tramos de carretera donde estaban situados, utilizando una red de Voronoi para asignar los tramos debido a las distancias variables entre las estaciones.

Figura 7. Red de carreteras considerada y estaciones de medición



Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Pablo-Martí et al. (2023)

La evolución de la red de autopistas en España ha sido un proceso dinámico que se ha ido adaptando a las necesidades cambiantes del país, tanto a nivel socioeconómico como político. El desarrollo del parque móvil en España, impulsado por la aparición de vehículos asequibles como el Seat 600 en la década de 1960, requirió una modernización y expansión de las carreteras españolas que previamente habían sido establecidas con el diseño radial del Circuito Nacional de Firmes Especiales, en 1926.

En 1961, se lanzó el Plan General de Carreteras, o "Plan Mortes", con el objetivo de adaptar la infraestructura de las carreteras a un parque móvil en rápido crecimiento. Este plan incluyó programas como la Red de Itinerarios Asfálticos (REDIA), que se centró en la mejora de los 5.000 kilómetros de carreteras con más tráfico. Sin embargo, ante la insuficiencia del plan para alcanzar sus objetivos, en 1974 se promulgó la Ley de Carreteras, que ordenaba la creación de un nuevo plan de carreteras. Este plan, aprobado en 1984 con un horizonte hasta 1991, tenía tres objetivos principales: mejorar el servicio y la seguridad en las carreteras, facilitar la comunicación entre diferentes regiones y optimizar la gestión de la red de carreteras. A pesar de tardar dos años más de lo previsto en completarse, el plan contribuyó significativamente a la configuración actual de las carreteras de alta capacidad en España.

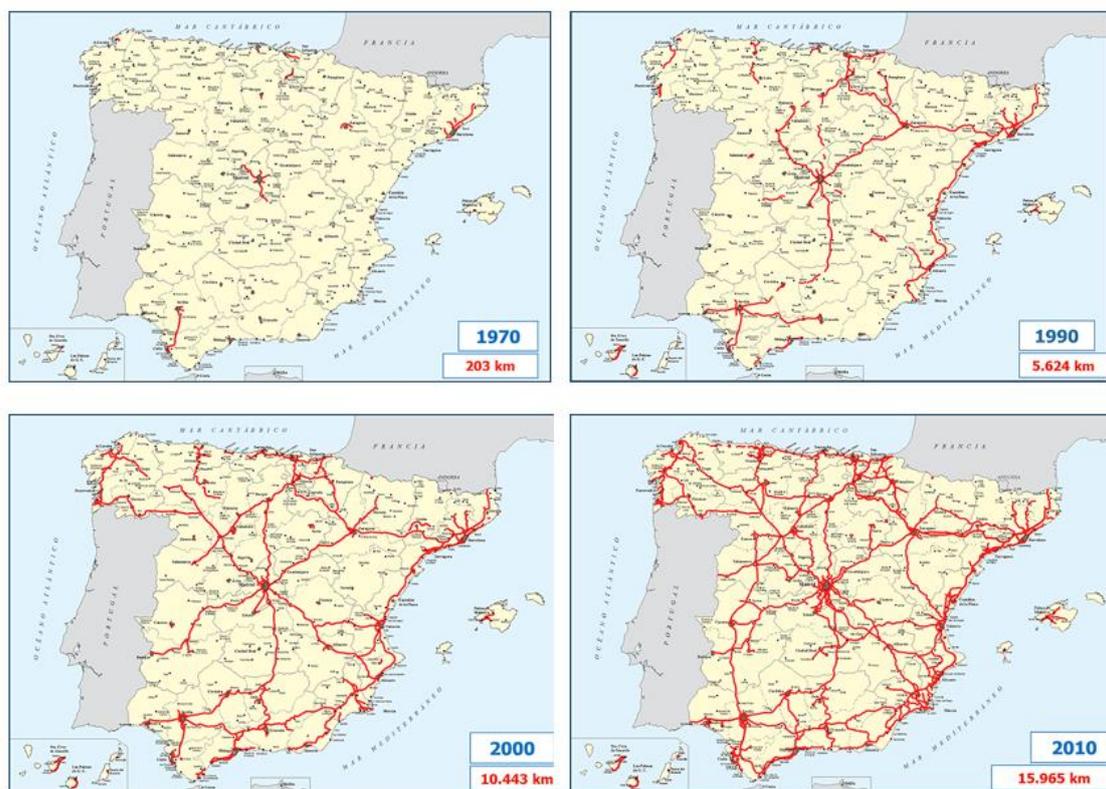
Para continuar con la mejora de la infraestructura de carreteras, se lanzó el Plan Director de Infraestructuras (PDI) en 1993, con un enfoque en el desarrollo integral y sostenible del territorio español. Este plan buscaba ampliar la red de autopistas y autovías en 11.000 kilómetros. En 2005, antes de la finalización del PDI, se aprobó el Plan

Estratégico de Infraestructuras y Transporte (PEIT) con una inversión estimada de 250.000 millones de euros. Este plan tenía como objetivo mejorar las conexiones interterritoriales y cumplir con los objetivos medioambientales propuestos. En la figura 8 se muestra la evolución de la red de carreteras de alta capacidad entre 1960 y 2010).

La red de carreteras de España, que ha sido modelada a lo largo de la historia en función de las necesidades de cada época, cuenta actualmente con 165.445 kilómetros. La alta tasa de motorización en España, con 32,05 millones de vehículos, refleja la preferencia de la sociedad española por el uso del automóvil. El tráfico en España ha experimentado un crecimiento exponencial desde la década de 1960 hasta la crisis de 2008, seguido de una disminución durante la crisis económica y la pandemia de COVID-19 en 2019-2020.

Las estaciones de medición indican que el tráfico ha aumentado considerablemente desde 1960, especialmente en áreas metropolitanas como Madrid, Barcelona, Valencia y Sevilla, así como en las carreteras de alta capacidad.

Figura 8. Evolución de la red de carreteras españolas de alta capacidad (1960-2010)



Fuente: Ministerio de Fomento

2. METODOLOGÍA. ANÁLISIS DE REDES Y FLUJOS DE TRANSPORTE

El algoritmo de descomposición de flujo, también conocido como *flow decomposition* en inglés, es una técnica utilizada en el análisis de redes para descomponer los flujos de una red en rutas sencillas.

En términos generales, una red es un conjunto de nodos o puntos interconectados por enlaces o aristas. En el caso de una red de transporte, estos nodos podrían representar estaciones de tren o paradas de autobús, y los enlaces podrían representar las rutas que

conectan estas estaciones. Un "flujo" en esta red podría representar el movimiento de los pasajeros, los vehículos o las mercancías de un nodo a otro.

El propósito de la descomposición de flujo es simplificar el análisis de estos flujos dividiéndolos en rutas más sencillas o básicas. Estas rutas básicas son seleccionadas de tal manera que el flujo original pueda ser reconstruido a partir de ellas, lo que permite analizar el flujo en términos de estas rutas más sencillas.

En el contexto de las redes de transporte por carretera y ferroviario, este tipo de algoritmo puede ser extremadamente útil. Por ejemplo, podría usarse para analizar las rutas de transporte de mercancías o pasajeros. Al descomponer los flujos de transporte en rutas más sencillas, los planificadores pueden identificar cuáles son las rutas más utilizadas, dónde existen cuellos de botella en la red, y dónde podrían ser necesarias mejoras en la infraestructura de transporte.

Además, al entender mejor cómo fluyen las mercancías y los pasajeros a través de la red, los operadores de transporte pueden optimizar sus operaciones, mejorando la eficiencia y reduciendo los costos. Por ejemplo, podrían decidir añadir más trenes o autobuses a las rutas más concurridas, o reorganizar sus horarios para adaptarse mejor a los patrones de demanda.

En resumen, los algoritmos de descomposición de flujo son una herramienta valiosa para analizar y optimizar las redes de transporte, permitiendo a los planificadores y operadores entender mejor cómo se utilizan sus redes y dónde podrían ser necesarias mejoras o ajustes.

La descomposición de flujo mínimo (DFM) — se ocupa del problema de encontrar un conjunto mínimo de trayectorias ponderadas desde el origen hasta el destino que descomponga perfectamente un flujo—. Se trata de un problema clásico en Informática. Variaciones de este problema representan modelos potentes en diferentes campos, como la Bioinformática o los Transportes. Incluso aunque no haya bucles en la red, es un problema de gran dificultad ya que requiere de un largo tiempo de cálculo para resolverlos, especialmente cuando se trata de problemas grandes, ya que al no tener una solución matemática, es necesario probar múltiples combinaciones y evaluar cómo encajan entre sí.

En nuestro caso, asumamos que estamos estudiando con una red de transporte donde los nodos son ciudades y las aristas representan las vías de comunicación que las conectan ya sean carreteras o líneas de ferrocarril.

Vamos a representar nuestra red de transporte como una matriz de adyacencia, donde $A(i, j)$ es el flujo de tráfico del nodo i al nodo j . En este ejemplo, asumiremos que el flujo de tráfico es simétrico, es decir, $A(i, j) = A(j, i)$.

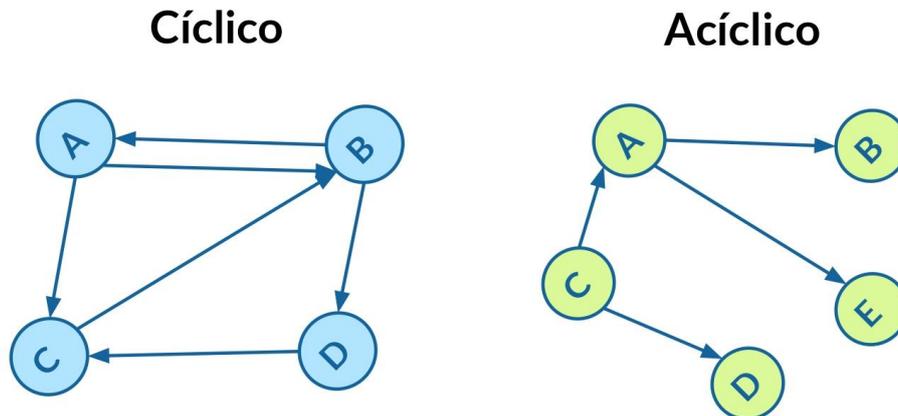
El código que se muestra en el anexo descompone los flujos de tráfico en la red de transporte en rutas más simples, utilizando un algoritmo de descomposición de flujo muy básico. La matriz `flowRoutes` almacena las rutas de flujo descompuestas, de modo que `flowRoutes(i, j, k)` es la cantidad de tráfico que fluye del nodo i al nodo k a través del nodo j .

Es un ejemplo muy básico que no toma en cuenta muchas características que podrían estar presentes en una red de transporte real, como las restricciones de capacidad o los diferentes costos de transporte entre nodos pero que sirve para ilustrar el funcionamiento del algoritmo.

Sin embargo, la existencia de ciclos en la red puede complicar el proceso de descomposición de flujos y, en algunos casos, puede hacer que ciertos métodos de descomposición de flujos no funcionen correctamente. Para entender por qué, primero debemos comprender qué es un ciclo en el contexto de una red.

Un ciclo en una red es una secuencia de nodos y aristas que comienza y termina en el mismo nodo sin repetir ningún nodo o arista. En términos de una red de transporte, un ciclo podría representar una ruta que comienza en una ciudad, pasa por otras ciudades, y luego vuelve a la ciudad inicial sin repetir ninguna ciudad o carretera.

Figura 9. Grafos cíclicos y acíclicos.



En el análisis de las redes de transportes se utilizan ambos tipos. En los análisis habituales, centrados en las infraestructuras, las redes son fuertemente cíclicas ya que es posible ir de un nodo a todos los demás. Es más, en la mayor parte de los casos la conectividad entre los nodos es bidireccional. Sin embargo, cuando se consideran redes temporales los grafos son acíclicos ya que los desplazamientos no son solo en el espacio sino también en el tiempo. No es posible así volver en ningún caso a un nodo anterior de la red. Si dejamos el nodo Barcelona-9:00h para desplazarnos a Lleida-10:00h nunca podremos volver al nodo de salida. No importa la ruta que sigamos. Solamente podremos llegar a Barcelona-11:00h, pero ese es un nodo diferente en el grafo temporal.

Cuando existen ciclos en la red, el flujo a lo largo de una arista determinada podría ser parte de varios flujos diferentes a lo largo de varias rutas diferentes. Esto hace que sea más difícil determinar cómo descomponer el flujo total a lo largo de esa arista en flujos individuales a lo largo de rutas individuales.

Por ejemplo, si consideramos una red con tres nodos A, B y C, y aristas que conectan A con B, B con C y C con A, formando un ciclo. Si existe un flujo de 10 unidades de A a B, un flujo de 10 unidades de B a C y un flujo de 10 unidades de C a A, es difícil determinar cómo descomponer estos flujos en rutas individuales ya que el flujo podría estar circulando alrededor del ciclo.

Este problema se conoce en la literatura de análisis de redes como el problema de la descomposición de flujos con ciclos. Existen varios métodos para tratar este problema, como el uso de algoritmos de descomposición de flujos que pueden manejar ciclos, o la transformación de la red para eliminar los ciclos antes de aplicar la descomposición de flujos. Sin embargo, estos métodos pueden ser más complejos y computacionalmente más intensivos que los métodos de descomposición de flujos estándar.

Variaciones de este problema constituyen modelos potentes para problemas de multiensamblaje en Bioinformática, como el ensamblaje de ARN. Dada su complejidad, las herramientas prácticas de multiensamblaje suelen recurrir a heurísticas o resuelven

versiones más simples del problema, solubles en tiempo polinomial, que pueden generar soluciones que no son mínimas o no descomponen perfectamente el flujo.

En este trabajo, se utiliza el algoritmo desarrollado por Dias et al (2023) que proporciona la primera formulación de programación lineal entera (ILP, por sus siglas en inglés) para tres variantes naturales del problema de DFM en grafos con ciclos, solicitando una descomposición que conste únicamente de trayectorias ponderadas desde el origen hasta el destino o ciclos, sendas y paseos, respectivamente. Esperamos tener los primeros resultados de este análisis próximamente.

Como paso previo, se ha realizado un estudio descriptivo de la compleja relación entre los flujos por ferrocarril y por carretera a lo largo del tiempo mediante un gráfico de burbujas dinámico. Este gráfico puede visualizarse en el siguiente enlace:

<http://europa.udl.cat/wp-content/uploads/2023/06/Evolucion-traffic-ferrocarril-carretera.html>

En este gráfico se representa el tráfico por ferrocarril en el eje de abscisas y el tráfico por carretera en el de ordenadas. Para la medición del tráfico en los nodos se ha calculado un índice de centralidad de grado ponderado en el que se ha sumado los tráficos de ferrocarril y por carretera que llegan a cada una de las poblaciones consideradas. Para evitar los tráficos metropolitanos o de cercanías, que podrían distorsionar la visión de los flujos de transporte a escala nacional, se han tomado como referencia los puntos de la red situados a una distancia superior a 50 km de los nodos.

Cada periodo de la simulación representa un año del periodo 1960-1988. El tamaño de las burbujas indica la población de la localidad considerada en 2022. Cuanto mayor sea la burbuja, mayor será la población de esa localidad. Esto permite visualizar de manera rápida y fácil la distribución de población en el gráfico.

Además, el color de las burbujas representa la pertenencia de la localidad a una región NUTS1 específica. Esto ayuda a identificar visualmente las regiones y comprender la distribución geográfica de las localidades en el gráfico.

Cuando una burbuja se desplaza hacia arriba y a la derecha en el gráfico, significa que tanto el tráfico por ferrocarril como el tráfico por carretera están aumentando a lo largo del tiempo. Esto puede indicar un crecimiento de la centralidad del nodo debido a cambios en las infraestructuras de transporte o, simplemente, una mayor movilidad en esa localidad por lo que requiere un análisis ulterior para determinar las causas.

Por otro lado, si una burbuja se desplaza rápidamente hacia la izquierda sin moverse apenas en el eje y, significa que el tráfico por ferrocarril está disminuyendo mientras que el tráfico por carretera se mantiene relativamente constante. Esto puede indicar un cambio en las preferencias de transporte de la población, con una mayor dependencia del transporte por carretera y una disminución del uso de ferrocarriles.

En resumen, el gráfico de burbujas dinámico proporciona una representación visual de cómo el tráfico por ferrocarril y el tráfico por carretera se relacionan con la población y la ubicación geográfica de las localidades consideradas. Los desplazamientos en el gráfico pueden indicar cambios en la infraestructura de transporte, las preferencias de transporte y la movilidad de la población a lo largo del tiempo.

En este gráfico, es evidente cómo el tráfico por carretera aumenta para todos los municipios estudiados y a lo largo del periodo. Es relevante la evolución que hacen las ciudades de Barcelona, Valencia y Madrid, pues son los municipios cuyos valores relativos al transporte por carretera son más altos, con un incremento considerable durante el periodo analizado.

Para una mejor comprensión de la perspectiva espacial de estos cambios en los flujos de tráfico se incluyen dos mapas dinámicos en la que se aprecia cómo va cambiando con el tiempo el tráfico en cada una de las poblaciones consideradas.

El mapa dinámico relativo al tráfico ferroviario puede visualizarse en el siguiente enlace:

<http://europa.udl.cat/wp-content/uploads/2023/06/Evolucion-traffic-ferroviario-mapa.html>

El mapa dinámico relativo al tráfico por carretera puede visualizarse en el siguiente enlace:

<http://europa.udl.cat/wp-content/uploads/2023/06/Evolucion-traffic-carretera-mapa.html>

Finalmente, el gráfico y los dos mapas dinámicos se han recopilado también en el siguiente enlace

<https://europa.udl.cat/projects/roads-railways-spain/>

CONCLUSIONES

En este trabajo exploramos una metodología para analizar el tráfico por carretera y por ferrocarril en España. Es el primer resultado fruto de añadir en un entorno SIG datos de flujos de transporte por carretera y ferrocarril en el periodo 1970-1988.

Los resultados permiten conocer qué municipios ganaron importancia como nodos centrales, en base a los flujos (viarios o ferroviarios) que circulan por las vías a las que están conectados. Efectivamente, Madrid, pero también de Valencia y Barcelona, son los que acaban teniendo mayores flujos en ambos medios de transporte. Aunque también otros municipios ganaron peso como nodo central en el transporte de ferrocarril y, especialmente, carretera. Es el caso de Málaga, Tarragona, Zaragoza o Valladolid. Por otra parte, hay municipios que pierden esta cualidad de nodo central en su área, como son Soria y Cuenca. Se trata de capitales de provincia de pequeña dimensión. Queda demostrado que éstas no se han visto beneficiadas en el contexto de la consolidación de los principales ejes de transporte.

Esta comunicación es un primer paso para explorar en un futuro esta temática para un periodo más amplio y añadiendo nuevas variables, como la densidad de circulación (de pasajeros y de mercancías), así como la utilización del algoritmo de descomposición de flujos. Este último nos permitirá reconstruir el flujo entre los distintos orígenes y destinos, estimando el porcentaje de tráfico que circula por cada una de las rutas alternativas.

AGRADECIMIENTOS

Publicado con el apoyo de: Departament de Recerca i Universitats de la Generalitat de Catalunya (2001 SGR 01369). Cátedra Jean Monnet (ERASMUS-JMO-2021-CHAIR. Project 101048018). Centro de Excelencia Jean Monnet (Historical Transportation studies) en la Universitat de Lleida (ERASMUS-JMO-2021- HEI-TCH-RSCH. Project 101047906).

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez-Palau, Eduard; Díez-Minguela, Alfonso y Jordi Martí-Henneberg (2021), "Railroad Integration and Uneven Development on the European Periphery, 1870–1910", *Social Science History*, 45(2), pp. 261-289.
- Artola, Miguel; Tedde, Pedro y Rafael Anes Álvares (1978), "El Estado y los ferrocarriles", en *Los Ferrocarriles en España, 1844-1943*, edited by Miguel Artola, Madrid, Servicio de Estudios del Banco de España.
- Comín, Francisco; Martín Aceña, Pablo; Muñoz, Miguel y Javier Vidal Olivares (1998), *150 años de historia de los ferrocarriles españoles*. Madrid, Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- Dias FHC, Williams L, Mumey B, Tomescu AI. (2023) *Minimum Flow Decomposition in Graphs with Cycles using Integer Linear Programming*. . Available: <https://arxiv.org/abs/2209.00042>
- Esteban Oliver, Guillermo (2021), *El ferrocarril en España. Estaciones, acceso a la red y compañías privadas 1848-1941*. Universitat de Lleida
- Franch-Auladell, Xavier, Morillas-Torné, Mateu y Jordi Martí-Henneberg (2014), "The railway network and the process of population concentration in Spain, 1900-2001". *Revista de Historia Económica-Journal of Iberian and Latin American Economic History*, 32(3), pp. 351-379.
- Galán Bueno, Pedro (1999), La información sobre tráfico en las redes de carreteras. *Rutas: Revista de la Asociación Técnica de Carreteras*. 71, pp. 4-17.
- Germán Zubero, Luis (1999), "Red ferroviaria y evolución del comercio interregional de la economía aragonesa, 1875-1930", en Miguel Muñoz Rubio; Jesús Sanz Fernández and Javier Vidal Olivares (eds.), *Siglo y medio del ferrocarril en España 1848-1998: Economía, Industria y Sociedad*, Alicante, Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- Gómez-Mendoza, Antonio (1985), *Ferrocarril y mercado interior en España (1874-1913)*. Vol. II, *Manufacturas textiles, materiales textiles, minerales, combustibles y metales*, Madrid, Banco de España.
- He GX. (2006) Computer-aided Algorithm of the Cost Weighted Shortest Path Problem in Container Motor-rail Multimodal Transportation. *Journal of the China Railway Society*.; 28(1): 1–5.
- Herranz-Loncan, Alfonso (2004), *La dotación de infraestructuras en España, 1844-1935, Estudios de historia económica/Banco de España*, Madrid, Banco de España.

- Lian L, Zhang S, Wang Z, Liu K, Cao LH. (2015) Customers' Mode Choice Behaviors of Express Service Based on Latent Class Analysis and Logit Model. *Mathematical Problems in Engineering*. vol. 2015, Article ID 610673, 8 pages., <https://doi.org/10.1155/2015/610673>
- Liu C, Lin B, Wang J, Xiao J, Liu S, Wu J, et al. (2017) Flow assignment model for quantitative analysis of diverting bulk freight from road to railway. *PLoS One*. ;12: 1–22. doi:10.1371/journal.pone.0182179
- Martínez-Galarraga, Julio; Rosés, Joan y Daniel Tirado (2015), “The long-term patterns of regional income inequality in Spain, 1860–2000”. *Regional Studies*, 49(4), pp. 502-517.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (1990), *Mapa de Tráfico 1990*, Madrid, Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
<https://www.mitma.gob.es/areas-de-actividad/carreteras/trafico-velocidades-y-accidentes-mapa-estimacion-y-evolucion/mapas-de-trafico/serie-historica-mapas/1990>
- Mojica, Laia and Jordi Martí-Henneberg (2011), "Railways and population distribution: France, Spain, and Portugal, 1870–2000" *Journal of Interdisciplinary History* 42 (1), pp. 15-28.
- Ortúñez Goicolea, Pedro Pablo (2016), “Gobernanza en la regulación del sector ferroviario español. Un análisis histórico: 1844-1941”, *Revista de Historia Industrial*, 25(61), pp. 79–109.
- Pablo-Martí, Federico; Escudero, Antonio y Sánchez, Ángel (2023), “Dinámica de redes y concentración de tráfico: un análisis de la red de carreteras española” *SCCS Working Papers-UAH*, 2302.
- Pascual, Pere (2016), *El ferrocarril en Catalunya (1848-1935). Una historia de su explotación*, Barcelona, Eumo Editorial.
- Rosés, Joan; Martínez-Galarraga, Julio y Daniel Tirado (2010), “The upswing of regional income inequality in Spain (1860–1930)” *Explorations in Economic History*, 47(2), pp. 244-257.
- Santos BF, Limbourg S, Carreira JS. (2015) The impact of transport policies on railroad intermodal freight competitiveness—The case of Belgium. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*.; 34: 230–244. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.10.015>
- Wang BH, He SW, Song R, Shen YS. (2009) Multi-modal Express Shipment Network Routing Optimization Model and Algorithm. *Journal of the China Railway Society*.; 31(2): 12–16. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-8360.2009.02.003>

Wang YW, Ding C, Liu C, Xie BL. (2013) An analysis of Interstate freight mode choice between truck and rail: A case study of Maryland, United States. *Procedia—Social and Behavioral Sciences*. 2013; 96: 1239– 1249. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.08.141>

Anexo

matlab

```
% Matriz de adyacencia representando nuestra red de transporte
A = [0 10 15 0 0;
     10 0 5 20 0;
     15 5 0 0 25;
     0 20 0 0 10;
     0 0 25 10 0];

% Número de nodos en la red
n = size(A, 1);

% Matriz para almacenar las rutas de flujo descompuestas
flowRoutes = zeros(n, n, n);

% Descomposición de flujo
for i = 1:n
    for j = 1:n
        if A(i, j) > 0
            for k = 1:n
                if A(j, k) > 0
                    minFlow = min(A(i, j), A(j, k));
                    flowRoutes(i, j, k) = minFlow;
                    A(i, j) = A(i, j) - minFlow;
                    A(j, k) = A(j, k) - minFlow;
                end
            end
        end
    end
end
end
end
```

```
% Ahora la matriz flowRoutes contiene las rutas de flujo descompuestas
```