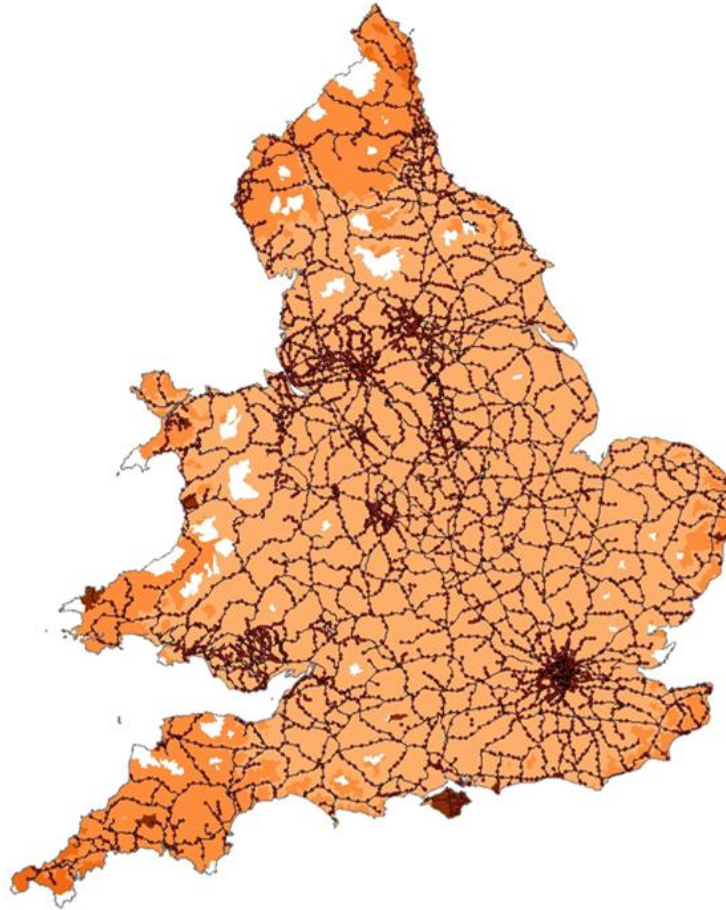


# Accesibilidad territorial concedida por el ferrocarril en Inglaterra.



**Alfonso Aguilar Hernández**

**Barcelona, Febrero de 2013**

## **Resumen**

Tutor externo: Jordi Martí Henneberg (Universitat de Lleida)

Tutor del máster: Pilar García Almirall

**Máster de Sistemas de Información Geográfica**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

## 1 Introducción y antecedentes

Para entender un poco la evolución de la comunicación entre distintas áreas del territorio en Inglaterra se debe realizar un breve repaso de la red ferroviaria inglesa, que es la red más antigua del mundo. Su creación comenzó a principios del s.XIX, con finalidad comercial.

El tipo de uso inicial, que fue el transporte de mercaderías entre pequeñas empresas del sector privado, hizo que la propia gestión del desarrollo de la misma red ferroviaria no estuviera a cargo del estado. Esto supuso una rivalidad entre empresas. Posteriormente, tras la II Guerra Mundial se completó la nacionalización de los ferrocarriles. El hecho de finalizar la privatización supuso la mejora en la calidad del servicio, así como la eficiencia, por lo que la tendencia fue la desaparición progresiva de vías y el mantenimiento de las de mejor proyección en la actualidad.

La red ferroviaria británica en el formato digital constituye una herramienta de análisis territorial y una opción metodológica en el campo de los Sistemas de Información Geográfica. Por ello, y para poder entender el comportamiento de la sociedad y el crecimiento o decrecimiento de las áreas pobladas, se ha calculado la accesibilidad entre los distintos municipios de Inglaterra atendiendo el medio de transporte ferroviario en distintos periodos.

Cabe destacar que este estudio se ha podido realizar debido a la creación de una referencia cartográfica digital y cuantificable sobre el Reino Unido, inexistente hasta hace poco tiempo. En concreto, se ha podido utilizar gracias la obra 'The Railways of Great Britain', cuyo autor es el coronel Michael Cobb.

En el proyecto se ha propuesto un indicador de accesibilidad ferroviaria para obtener un valor cuantitativo, con el objetivo de poder comparar y conocer la accesibilidad de cualquier punto de Inglaterra en distintas décadas con el resto del territorio y observar la evolución. Cabe remarcar que se entiende como accesibilidad la posibilidad de llegar a una localización en un tiempo o coste razonable. De esta manera, en términos de red ferroviaria, se puede considerar que una localidad es accesible cuando se puede acceder a la red en un tiempo acotado y desplazarse al resto de nodos del territorio a través de ésta.

## 2 Objetivos y metas propuestas

El objetivo principal de este estudio es el cálculo de la accesibilidad entre los municipios haciendo servir la red ferroviaria existente en cada periodo para poder hacer un análisis y entender el comportamiento de la sociedad en cada década. Además, esta modelización permitirá tener los datos digitalizados, por lo que las conclusiones a las cuales se lleguen estarán validadas por unos cálculos anteriores.

Por todo ello, los objetivos son los siguientes:

-Obtener el coste de acceso desde cualquier punto de Inglaterra al resto mediante la red ferroviaria como método de transporte, a partir del Índice de Accesibilidad Puntual (IAP).

-Obtener el coste medio de acceso de un municipio al resto de estaciones mediante el Índice de Accesibilidad Generalizada (IAG).

-Verificar que las zonas de mayor accesibilidad son las céntricas y las más pobladas.

-Obtener la evolución de la accesibilidad atendiendo la evolución en el combustible de los medios de transporte y la evolución de la infraestructura de la red ferroviaria.

### 3 Base teórica

La propuesta de la metodología se ha basado en indicadores de cobertura territorial mediante los cuales se ha podido analizar el territorio atendiendo la teoría de grafos. Los grafos, desarrollados por el matemático Leonhard Euler en el S. XVIII, permiten la modelización de manera simplificada de la infraestructura asociada a cualquier elemento que se pueda describir mediante red de vértices, nodos o puntos y el conjunto de aristas, líneas o lados. Con ello se permite el análisis del funcionamiento de una red de transporte, que en este caso será la del transporte ferroviario, utilizando relaciones matemáticas simples.

Dentro de la teoría de grafos, los indicadores que muestran la cobertura de una infraestructura se denominan instrumentos de oferta, “cuyo enfoque entiende que la localización de las actividades y su movilidad dependen de la forma y ordenación de las redes de infraestructuras” (Herce, 2009). En este sentido, Subero (2009) enumera los principales indicadores asociados al concepto de cobertura de una red, desde los desarrollados por Wootton and Pick (1967) hasta Echeverría (1998). Para éste, la cobertura puede definirse como “el grado de atracción que la red ejerce, o la utilidad que tiene sobre los individuos, para que éstos la utilicen en su desplazamiento”.

Para el cálculo de la accesibilidad territorial se han utilizado dos metodologías distintas:

- Por una parte, considerando el Índice de **Accesibilidad Generalizada (IAG)**, se ha cuantificado el tiempo de acceso desde cada nodo del territorio al resto, y posteriormente se ha obtenido la media aritmética. De esta manera, los nodos que obtienen valores más bajos han sido aquellos con mejor accesibilidad, mientras que por el contrario los que han obtenido un mayor indicador han sido aquellos cuyo coste de desplazamiento al resto del territorio es superior. La representación bidimensional del indicador de los valores de cada nodo ha dado una idea de la centralidad territorial.
- Por otra parte mediante el **Índice de Accesibilidad de forma Puntual (IAP)**, se ha calculado el coste desde un nodo concreto la extensión de territorio que cubre en un viaje de tiempo predeterminado.

Se debe hacer especial hincapié en que la cuantificación de posibles caminos entre dos nodos es un problema con diferentes soluciones. De este modo se ha implementado el algoritmo de caminos mínimos para la determinación de la ruta de viaje, y en consecuencia, la obtención del tiempo o coste de trayecto.

La formulación de los índices utilizados son los siguientes:

1. Índice de Accesibilidad Generalizada:

$$IAG_j = \frac{\sum_{i=1}^n C_{ji}}{n-1}$$

Donde:

- $IAG_j$  es el Índice de Accesibilidad Generalizada calculado para el nodo  $j$ .
- $C_{ij}$  es una matriz  $n \times n$ , que mide el coste de acceso mínimo desde el nodo  $j$  hasta el nodo  $i$ .
- $N$  es la suma de las localidades en estudio (univers).

El resultado del cálculo para cada nodo corresponde a la media de los valores de cada una de las filas de la matriz de costes  $C_{ij}$ . Además es representativa para un valor discreto que

determina el coste o tiempo medio de acceso desde éste al resto del territorio. La agrupación de todos los valores ha formado un vector de dimensión  $1 \times n$ .

## 2. Índice de Accesibilidad Puntual:

$$IAP_j = C_{ji}$$

Donde:

- $IAP_j$  es el Índice de Accesibilidad Puntual calculado para el nodo  $j$ .
- $C_{ji}$  es el coste mínimo de acceso desde el nodo  $j$  hasta el nodo  $i$ .

El resultado del cálculo para cada nodo es un vector  $n \times 1$ , que contiene valores puntuales de desplazamiento desde este nodo hacia el resto. La agrupación de los  $n$  vectores de dimensión  $n \times 1$  han formado una matriz  $n \times n$ , simétrica y con valores nulos a la diagonal.

## 4 Metodología

Se debe incidir en que el objetivo principal ha sido obtener dos tablas a partir de las cuales se han calculado los índices.

Se ha obtenido la comunicación entre los municipios y las estaciones y entre las propias estaciones. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo, aunque cabe remarcar que para cada estación se ha calculado el menor índice de las estaciones más cercanas.

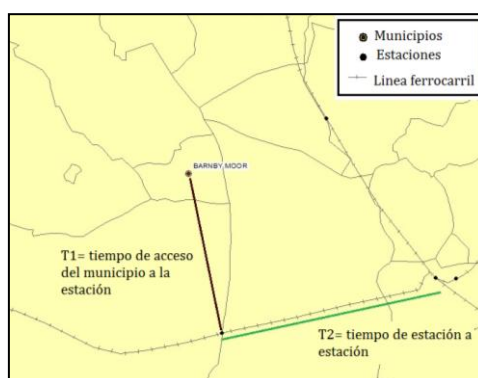


Ilustración 1. Tiempos contemplados en el estudio.

Por ello, los pasos seguidos se muestran a continuación:

1. Introducción en SIG de los polígonos que contienen la información de cada uno de los municipios en una época determinada.
2. Introducción de todas las estaciones indicando el año en el que se pusieron en funcionamiento, cierre, reapertura, re cierre, etc.
3. Introducción de todas las líneas indicando el año en el que se pusieron en funcionamiento, cierre, reapertura, re cierre, etc.
4. Realización de una copia del shape correspondiente a las estaciones en funcionamiento en el año específico.
5. Realización de una copia del shape correspondiente a las líneas en funcionamiento en el año de estudio.
6. Cálculo del centroide correspondiente a cada polígono representativo de las civil parishes y asociación de la información de éstos a los nodos resultantes.
7. Captación de la información altimétrica en cada nodo.
8. Cuantificación de la distancia desde cada municipio hasta las estaciones más cercanas en un radio de 10 km.
9. Cálculo de la diferencia de cota dentro del mismo shape de municipios, entre el centroide y la estación más cercana.

10. Cálculo del tiempo de acceso desde cada municipio a las estaciones más cercanas, considerando una gráfica de distribución de la velocidad que decrezca en función de la pendiente del terreno calculada previamente.

Por ello los valores utilizados han sido los siguientes:

Pendiente (%)	Velocidad asociada (km /h)
<3	5
3-8	2
8-19	1
>= 20	0*

Tabla 1. Velocidad de acceso a las estaciones atendiendo la pendiente.

\*Se consideran inaccesibles los terrenos con pendientes superiores al 20%.

11. Asignación a cada línea de ferrocarril de un valor de velocidad en función de la época concreta.

Los valores son los siguientes:

Año	Velocidad asignada (km/h)
1871	33
1880	34
1890	36
1900	37
1910	38
1920	41
1930	44

Tabla 2. Velocidad asignada a los trenes atendiendo la década.

12. Cálculo de la longitud de cada tramo de línea de ferrocarril.  
 13. Cálculo del tiempo de desplazamiento en cada uno de los tramos de las líneas de ferrocarril.  
 14. Implementación del análisis network con la red resultante.  
 15. Cálculo de la media de todos los valores de cada una de las filas, obteniendo una matriz Nx1.  
 16. Cálculo de los índices IAG e IAP.  
 17. Asignación a cada parish el mínimo IAG, para ver con un valor cuantitativo.

Este procedimiento se ha repetido para todo el periodo de estudio.

## 5 Periodo de estudio

El periodo de estudio es fundamental debido a que se han contemplado aspectos relacionados con la utilización de la pendiente para detallar el coste de acceso a las estaciones, además de la asociación de una velocidad real al tren atendiendo la década correspondiente. Por ello, lo que se ha buscado es un periodo en el cual la red ferroviaria se encontrara bastante consolidada, y que se le pudiera asignar una velocidad a los trenes atendiendo las fuentes de energía de los mismos.

### 5.1 Red ferroviaria consolidada

Para poder entender el desarrollo de la infraestructura ferroviaria en Inglaterra se va a mostrar una secuencia de la evolución atendiendo la década.

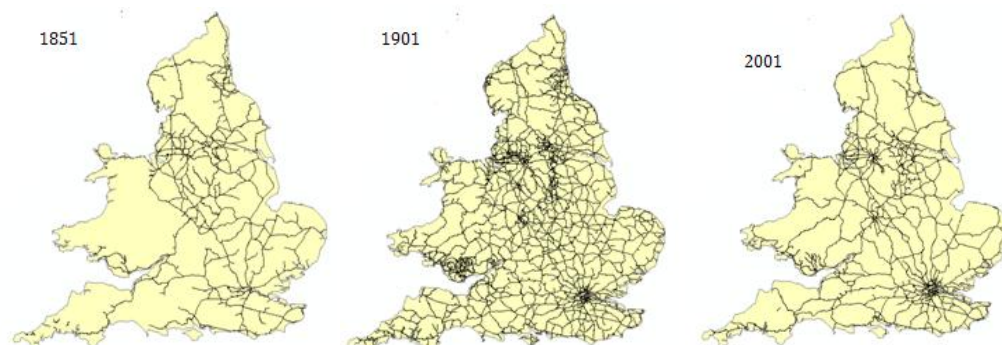


Ilustración 2. Evolución de la red ferroviaria en Inglaterra.

Los datos numéricos de la evolución se pueden observar de una manera más exacta en la siguiente tabla:

Año	Longitud de línea (Km)	Estaciones (unidades)
1851	8.104,0	1.686
1861	12.076,4	2.727
1871	17.137,4	3.394
1881	19.869,9	4.076
1891	22.218,4	4.633
1901	23.623,2	5.075
1911	24.770,8	5.679
1921	24.971,6	5.647
1931	25.013,7	5.489
1941	24.602,4	5.309
1951	24.150,9	5.000
1961	22.356,0	3.782
1971	15.121,8	2.254
1981	14.111,6	2.191
1991	13.165,1	2.243
2001	12.963,2	2.271
2010	12.401,5	*Sin dato

Tabla 3. Evolución de la red ferroviaria en Inglaterra.

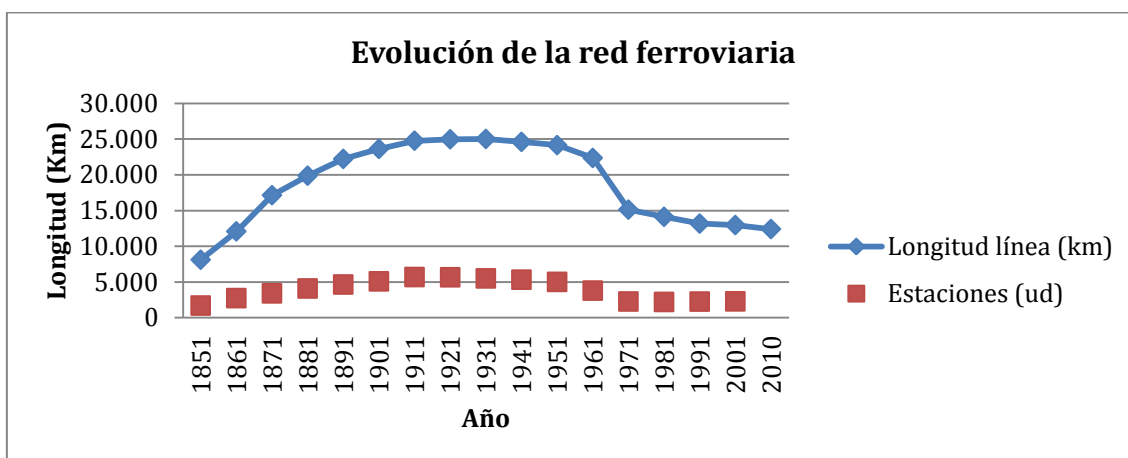


Gráfico 1. Evolución de la red ferroviaria en Inglaterra.

Tal y como se observa en el gráfico y datos, la evolución de la red ferroviaria en Inglaterra ha supuesto un ascenso inicial, mantenimiento y decrecimiento. Esto, tal y como se ha especificado en el punto 1, es debido a las diferentes gestiones que ha tenido en la historia.

Por lo tanto, a partir del 1871 se puede considerar que la línea ferroviaria tenía un carácter representativo y homogéneo; es decir, la línea ya estaba consolidada.

## 5.2 Velocidad del tren asociada a la fuente de energía

En la siguiente tabla se muestra la velocidad asociada a la red ferroviaria atendiendo la fuente del combustible que posiblemente se utilizaba en el año correspondiente.

Año	Vapor	Electricidad	Diesel	AVE
1830	27,7979			
1840	29,0892			
1850	30,3805			
1860	31,6718			
1870	32,9631			
1880	34,2544			
1890	35,5457			
1900	36,837			
1910	38,1283	38,108		
1920	39,4196	42,486		
1930	40,7109	46,864		
1940	42,0022	51,242		
1950	43,2935	55,62		
1960	44,5848	59,998	60	
1970	45,8761	64,376	66	
1980	47,1674	68,754	72	72
1990	48,4587	73,132	78	88
2000	49,75	77,51	84	104

Tabla 4. Velocidad media concedida al ferrocarril atendiendo el combustible utilizado.

Por lo tanto el único periodo en el que se ha podido definir una velocidad asociada de manera aproximada al tren (para poder aplicar a la matriz OD obtenida del análisis network) es el comprendido entre el 1830 y el 1930.

## 5.3 Concreción del periodo de estudio

El periodo de estudio que se ha utilizado es el correspondiente entre las décadas del 1871 y 1931. La razón de escoger este periodo y no ampliarlo, es que la red se considera consolidada a partir del 1870 y debido a que hasta el año 1930 es el único periodo sobre el que se puede establecer una velocidad del ferrocarril atendiendo al combustible utilizado. Además de estas razones cabe destacar que en el año 1950 el coche ya había entrado en funcionamiento de una manera más regular, por lo que era competencia directa del ferrocarril. Por ello no se puede determinar la influencia del mismo en el hecho de acceder desde cualquier punto de Inglaterra al resto, constituyendo otro condicionante para no continuar el estudio a partir del 1931.

## 6 Simplificaciones del modelo propuesto

Para poder llevar a cabo la metodología propuesta para la modelización se han asumido un conjunto de simplificaciones.

A continuación vienen detalladas:

- Analizar el territorio de forma discreta desde las localidades preexistentes.
- Considerar únicamente tres modos de transporte: tracción animal y a pie para acceder desde el municipio al ferrocarril, y el ferrocarril.
- Considerar que el centroide es representativo de los núcleos poblacionales.

- Estimar la velocidad media de circulación para acceder a las estaciones.
- Estimar la velocidad de circulación de los ferrocarriles.
- Desestimar el tiempo de espera en la estación ferroviaria y el tiempo de transbordo.

## 7 Problemática en el desarrollo de los cálculos

Durante la ejecución del estudio se han encontrado algunos problemas subsanados de la siguiente manera:

Problema	Solución
Fallo del Arcgis en el análisis network, concretamente en el cálculo del coste de la matriz OD por exceso de datos. Cabe destacar que los resultados han constituido tablas de más de 20.000.000 de registros, por lo que el volumen y peso de los datos son muy elevados	Partir en cada década la base de datos. Realización del cálculo separando la base de datos, mediante el cálculo en grupos de 1.000 estaciones al resto y uniendo los resultados posteriormente el Spss.
Error en el cálculo del IAG en el Spss debido a que la matriz no estaba totalmente cumplimentada y había valores perdidos.	Poner un valor genérico a los puntos sin conexión, debido a que la situación real no es la idónea, y la matriz del IAP no dispone de todos los valores..
Error en el cálculo de los índices mediante el Spss, mediante la opción de calculadora directamente por el exceso de registros de datos. Esto ha sido causado porque ha habido años con más de 60.000 registros.	Inserción de operaciones mediante sintaxis.

Tabla 5. Problemática en el desarrollo del proyecto.

## 8 Resultados y aportaciones

Con el estudio se han obtenido diversas tablas de información.

- Por una parte se ha obtenido una tabla por década en la que se refleja el IAP desde cada municipio al resto de estaciones (es decir, 7 tablas). Las tablas no se pueden adjuntar puesto que contienen más de 70.000 Registros.
- Por otra parte se ha obtenido una tabla con el IAG de cada municipio durante el periodo de estudio (obteniendo un total de 7 tablas), índice generalizado que permite realizar una comparativa de manera relativamente fácil.
- También se ha obtenido una tabla con el mínimo IAG de cada parish (obteniendo 7 tablas) ya que se había calculado la accesibilidad de las cinco estaciones más cercanas a cada parish, siempre que estuviera en un radio inferior a 10 km. La situación escogida para mapificar ha sido la óptima, es decir, la de menor coste en horas.

### 8.1 Mapificación

Los resultados obtenidos del IAG son los reflejados en la siguiente tabla:

Año	Mínimo IAG (h)	Máximo IAG (h)	Año	Mínimo IAG (h)	Máximo IAG (h)
1871	6,36	29,99	1911	5,31	29,99
1881	5,58	29,99	1921	5,00	29,99
1891	5,58	29,99	1931	4,66	29,99
1901	5,46	29,99			

Tabla 6. Valores IAG.



La serie de mapas resultante es la siguiente:

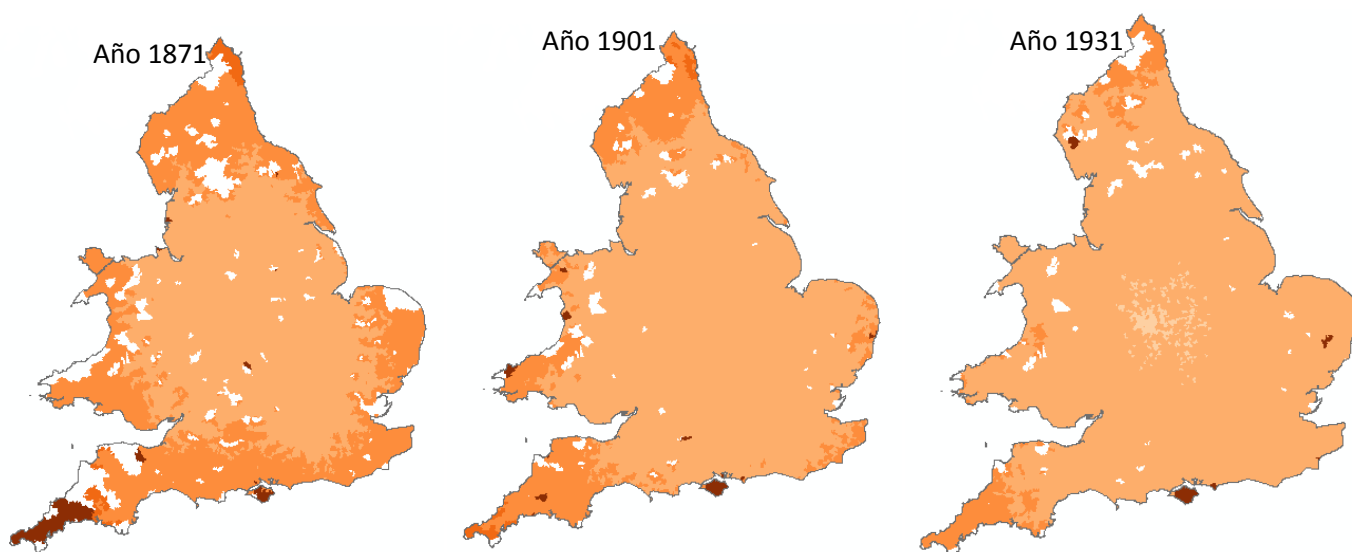


Ilustración 3. Evolución del mínimo IAG.

## 8.2 Influencia de la población en la red ferroviaria

Al tratarse de una zona tan amplia de estudio, se ha comprobado que para este tipo de resultados y aportaciones se debe acotar una zona de menor tamaño y observar los resultados. Por ello se ha realizado el ejemplo de Londres.

### 8.2.1 Caso de Londres

En primer lugar se ha observado el menor Índice de Accesibilidad de los núcleos poblacionales que la comprenden.

La serie de mapas resultantes es la siguiente:

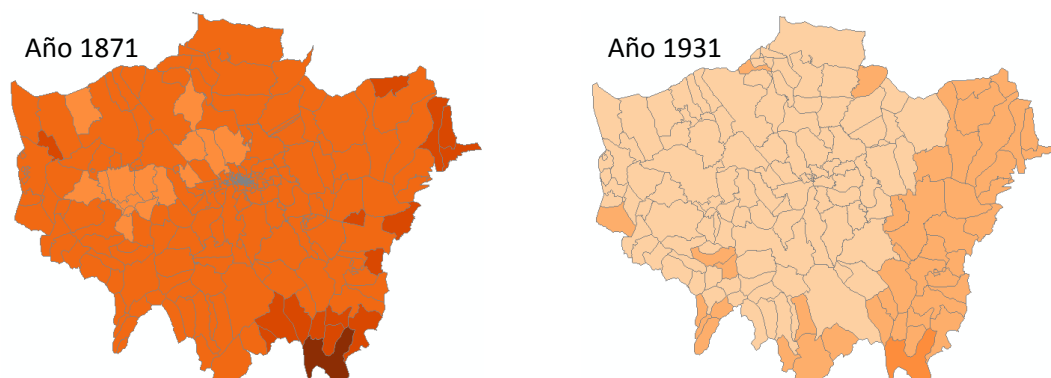


Ilustración 4. Evolución del mínimo IAG en Londres.

## 9 Conclusiones

Tras los resultados obtenidos, y teniendo en cuenta los mapas que se han adjuntado en los anejos, se han establecido una serie de conclusiones del estudio.

Por una parte se puede observar que el Índice de Accesibilidad Generalizada (mínimo) se reduce notablemente en cuanto a coste se refiere. En concreto, en el total de 6 décadas se reduce de 6,36 horas a 4,66 horas, es decir, en más de 1 hora de media. Además de ello se puede observar que las zonas sin accesibilidad al resto del territorio se reducen década tras década. Esto es debido al crecimiento de la red ferroviaria, ya que en la fase de estudio el crecimiento tanto de las líneas de ferrocarril como de las estaciones aumenta notablemente.

En concreto los valores resultantes y datos más significativos del IAG se pueden observar en el siguiente gráfico:

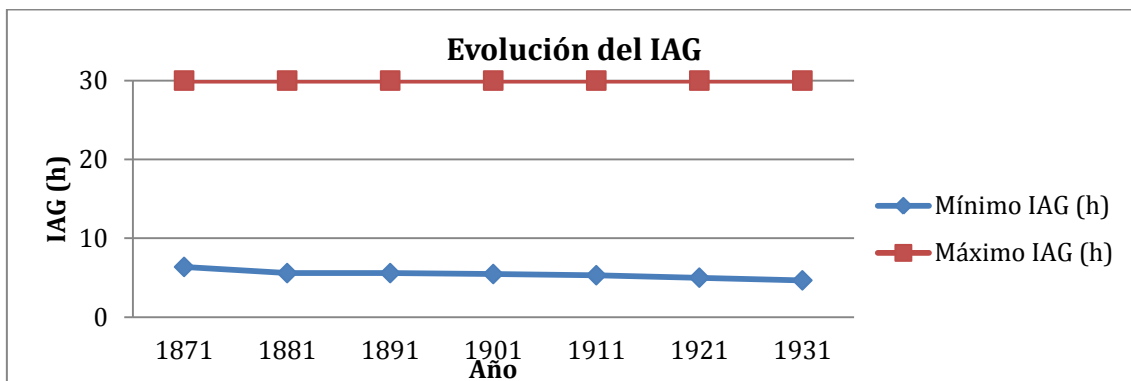


Gráfico 2. Evolución del IAG en Inglaterra.

Para obtener una idea un poco más concreta, se ha seleccionado de cada década los registros con menor Índice de Accesibilidad Generalizada y, por tanto, mejores condiciones de accesibilidad al resto del territorio. Se han realizado dos tablas en las que por una parte, se muestra en cada década los mejores valores y, por otra parte, qué parishes se repiten en distintas décadas.

De los 89 registros con mejor accesibilidad:

- 62 parishes corresponden al condado de Staffordshire.
- 16 parishes corresponden al condado de Warwickshire.
- 7 parishes corresponden al condado de Derbyshire.
- 3 parishes corresponden al condado de Leicestershire.
- 1 parish corresponde al condado de Worcestershire.

En el siguiente gráfico se puede observar mejor el resultado:

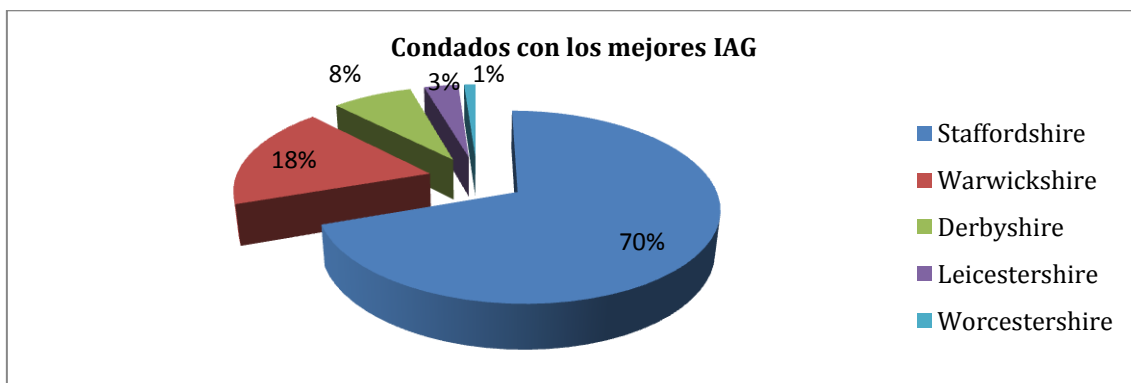


Gráfico 3. Condados con menor IAG.

Con ello se determina que las zonas centrales son las de mejor comunicación por la ubicación territorial.

En el siguiente mapa se muestra la ubicación de las citadas áreas:

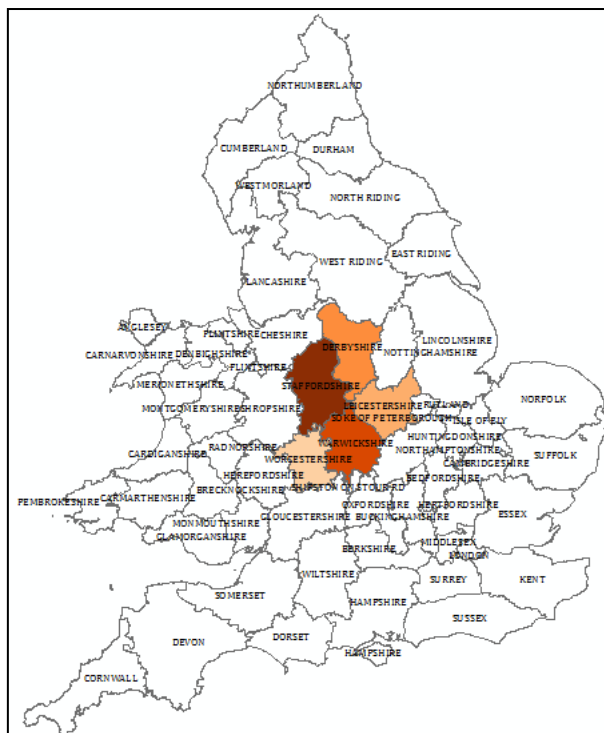


Ilustración 5. Condados con menor IAG.

En cuanto a la estructura de la accesibilidad, tal y como se esperaba, aumenta de manera concéntrica. Esto es debido a que por la geometría del territorio los puntos centrales son los que menor coste necesitan para llegar al resto a igual de condiciones.

En el caso particular de Londres se puede observar cómo la accesibilidad disminuye de más de 10 horas en algunas de las regiones de la citada área, a menos de 6 horas en más del 50 % del territorio. Además de esto, se puede observar cómo las mejores condiciones se dan en primer lugar en la zona noroeste. Este hecho se puede deber a la proximidad de esta zona al centro.

En la siguiente tabla se observa de una manera más detallada los resultados:

Año	Mínimo IAG (h)	Máximo IAG (h)
1871	7,84	10,28
1881	7,67	10,33
1891	6,91	9,28
1901	6,76	9,09
1911	6,49	8,32
1921	6,00	7,82
1931	5,49	7,25

Tabla 7. Resumen del IAG en Londres.

Por otra parte se ha observado la relación entre la población y la accesibilidad. El hecho de no corresponder siempre las zonas más pobladas con las de menor índice de accesibilidad general se puede deber a la gestión en la época de estudio. Lo que sí que se corresponde es que las zonas de mayor coste de accesibilidad son las de menor población.

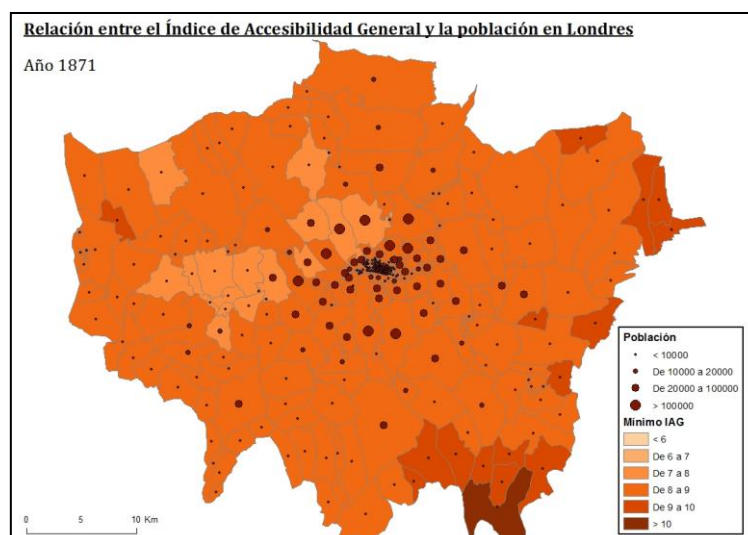


Ilustración 6. Relación de población e IAG.

Como se ha indicado en la introducción y antecedentes, en Inglaterra se inició el desarrollo de la red ferroviaria coincidiendo con el movimiento interno de mercancía y con carácter privado. Por ello es muy probable que la población tuviera un carácter decisivo en la instalación de nuevas líneas y estaciones, pero también las rutas comerciales por tierra.

Además de las conclusiones extraídas para el presente estudio se ha creado una matriz con el Índice de Accesibilidad Puntual entre las estaciones y el Índice de Accesibilidad General desde el 1871 hasta el 1931.

## 10 Nuevas líneas de estudio

Tras la realización del proyecto se proponen nuevas líneas de estudio para continuar con la temática indicada y, de esta manera, obtener resultados que puedan complementar este estudio.

- Por una parte, se podrían estudiar las principales rutas de comercio interior por tierra, para saber de manera exhaustiva si hay una relación entre éstas y la red ferroviaria, ya que al principio se constituyó de manera privada.
- Por otra parte, al igual que se ha realizado en Londres, se debería realizar un análisis exhaustivo de las distintas regiones de Inglaterra. Concretamente se podría comprobar si hay una relación entre la población y el crecimiento de la infraestructura férrea.
- También se podría completar con un proyecto en el que se valide si el relieve del territorio condiciona de manera muy severa el recorrido de la red ferroviaria en las distintas épocas. Con ello se podría observar si en las zonas sin acceso no es posible tenerlo debido a que el terreno es muy abrupto y, por consiguiente, no es factible la construcción de éste medio de transporte.