



## Resumen

Para evitar el desequilibrio territorial propio de grandes áreas metropolitanas como Madrid se debe adoptar una adecuada planificación que permita reducir los desplazamientos de la población y, por tanto, facilitar los movimientos espaciales. Es aquí donde entra en juego el concepto de *accesibilidad* que entraña una serie de aspectos a veces complejos de definir.

Este trabajo pretende abordar estrictamente este tema mediante su aplicación sobre la red de Cercanías de Madrid. Además aprovechando el Plan de Infraestructuras Ferroviarias proyectado en el año 2009, se cuantifican e ilustran tanto los valores de accesibilidad actuales como los futuros una vez articulado y finalizado dicho Plan. Mediante la metodología propuesta y la aplicación de una serie de indicadores se alcanzan unos resultados lógicos y coherentes que ponen de manifiesto la mejoría de la red futura, la cual se muestra mucho más diversificada, más cohesionada y por lo tanto más accesible. Con todo ello la accesibilidad se muestra como un potente instrumento de planificación para predecir y revelar las pautas de desarrollo urbano.

**Palabras clave:** Sistemas de Información Geográfica (SIG), accesibilidad, ferrocarril, transporte público, análisis de redes.

## Abstract

In order to avoid territorial imbalance typical of large metropolitan areas such as Madrid, cities should adopt proper planning that can help reduce the displacement of the population and therefore facilitate spatial movement. This is where the concept of *accessibility* comes into play, which however involves a number of aspects that are sometimes complicated to define.

This paper aims to address this issue strictly by looking at Madrid's Cercanías network. In addition, it makes use of the Railway Infrastructure Plan designed in 2009 to quantify and illustrate both current accessibility values as well as future ones, once this plan is finalized. By means of the proposed methodology and the implementation of a series of indicators, logical and coherent results are achieved showing the improvement of the future network, which is proven to be much more diversified, more cohesive and thus more accessible. With all this in place, accessibility is shown to be a powerful planning tool with which to predict and reveal urban development patterns.

**Keywords:** Geographic Information Systems (GIS), accessibility, railway transport, public transport, network analysis.



## ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| I. INTRODUCCIÓN.....  | 3  |
| I.1. Planteamiento e interés del tema.....  | 3  |
| I.2. Objetivos.....   | 4  |
| I.3. Estructura del trabajo.....  | 4  |
| II. ESTADO DE LA CUESTIÓN.....  | 6  |
| II.1. Marco teórico-metodológico.....   | 6  |
| II.2. Estado actual de la red de Cercanías de Madrid y el Plan de Infraestructuras<br>Ferroviarias (2009-2015)..... | 9  |
| III. FUENTES Y METODOLOGÍA.....   | 22 |
| III.1. Datos de partida.....  | 22 |
| III.2. Metodología de análisis.....   | 23 |
| IV. RESULTADOS.....   | 34 |
| IV.1. Cobertura general de la red.....  | 34 |
| IV.2. Indicadores de accesibilidad.....   | 35 |
| IV.2.1. <i>Media ponderada de los costes de transporte</i> .....  | 35 |
| IV.2.2. <i>Potencial económico</i> .....  | 39 |
| IV.2.3. <i>Oportunidades de acceso</i> .....  | 43 |
| IV.3. Distancia media a las estaciones.....   | 46 |
| IV.4. Tiempo medio de recorrido desde cada estación.....  | 46 |
| V. CONCLUSIONES.....  | 48 |
| BIBLIOGRAFÍA.....   | 50 |
| <i>Anexo I</i> .....  | 53 |



## LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

### FIGURAS

- Figura 1.** Mapa de la totalidad de la red de Cercanías de Madrid en la actualidad (noviembre de 2012). Elaboración propia
- Figura 2.** Mapa de la parte de la red de Cercanías en el municipio de Madrid en la actualidad (noviembre de 2012). Elaboración propia
- Figura 3.** Mapa esquemático de la red de Cercanías de Madrid (noviembre de 2012).
- Figura 4.** Población de los municipios con Cercanías (habitantes) en noviembre de 2012. Elaboración propia
- Figura 5.** Trazado del Eje Transversal Este Suroeste. Elaboración propia
- Figura 6.** Trazado de la línea Chamartín – Aeropuerto T4. Elaboración propia
- Figura 7.** Trazado de la Línea C-4: Parla – Torrejón de la Calzada/Torrejón de Velasco. Elaboración propia
- Figura 8.** Trazado de las Línea C-5: Humanes – Illescas. Elaboración propia
- Figura 9.** Trazado de la Línea C-4: Colmenar Viejo – Soto del Real. Elaboración propia
- Figura 10.** Trazado de la Línea C-4: Alcobendas/San Sebastián de los Reyes – Algete y San Agustín de Guadalix. Elaboración propia
- Figura 11.** Trazado de la variante por el centro urbano de Majadahonda y Las Rozas. Elaboración propia
- Figura 12.** Trazado de la variante de Torrejón de Ardoz. Elaboración propia
- Figura 13.** Trazado de la Línea C-5: Móstoles el Soto - Navalcarnero. Elaboración propia
- Figura 14.** Mapa de la totalidad de la red de Cercanías en el futuro una vez terminado el Plan. Elaboración propia
- Figura 15.** Mapa de la totalidad de la red de Cercanías en parte del municipio de Madrid en el futuro una vez terminado el Plan. Elaboración propia
- Figura 16.** Población de los municipios con Cercanías una vez finalizado el Plan (habitantes). Elaboración propia
- Figura 17.** Captura de pantalla del software ArcGIS 10.0 en la que se muestran tanto los arcos creados como su base de datos de atributos con los minutos en ambas direcciones en hora punta y en hora valle. Elaboración propia
- Figura 18.** Estación de Atocha con sus respectivas líneas y los arcos que simulan los transbordos. Elaboración propia
- Figura 19.** Conexión por el callejero entre Avenida de América y Nuevos Ministerios. Elaboración propia
- Figura 20.** Áreas de cobertura de diferentes estaciones mediante el método de distancia en línea recta (900 metros). Elaboración propia
- Figura 21.** Áreas de cobertura de diferentes estaciones mediante el método de distancia por la red (900 metros). Elaboración propia
- Figura 22.** Centroides de las secciones censales que quedan dentro de las áreas de cobertura de diferentes estaciones (900 metros). Elaboración propia
- Figura 23.** Media ponderada de los costes de transporte teniendo en cuenta la población y el método de distancia en línea recta (minutos). Elaboración propia
- Figura 24.** Media ponderada de los costes de transporte teniendo en cuenta el empleo (unidades locales) y el método de distancia en línea recta (minutos). Elaboración propia
- Figura 25.** Cambios entre presente y futuro de la Media ponderada de los costes de transporte (minutos) teniendo en cuenta la población y el método de distancia en línea recta (%). Elaboración propia
- Figura 26.** Cambios entre presente y futuro de la Media ponderada de los costes de transporte (minutos) teniendo en cuenta el empleo (unidades locales) y el método de distancia en línea recta (%). Elaboración propia
- Figura 27.** Potencial económico teniendo en cuenta la población y el método de distancia en línea recta. Elaboración propia
- Figura 28.** Potencial económico teniendo en cuenta el empleo (unidades locales) y el método de distancia en línea recta. Elaboración propia
- Figura 29.** Cambios entre presente y futuro del Potencial económico teniendo en cuenta la población y el método de distancia en línea recta (%). Elaboración propia
- Figura 30.** Cambios entre presente y futuro del Potencial económico teniendo en cuenta el empleo (unidades locales) y el método de distancia en línea recta (%). Elaboración propia

### TABLAS

- Tabla 1.** Algunos indicadores de accesibilidad seleccionados por Gutiérrez, J. y Gómez, G. (1998).
- Tabla 2.** Tráfico de viajeros subidos y bajados entre 2009 y 2011 de las 20 primeras estaciones con más viajeros de la red de Cercanías de Madrid. Elaboración propia
- Tabla 3.** Mitad de las frecuencias de cada línea en día laborable. Elaboración propia
- Tabla 4.** Población y empleo totales a menos de 900 metros de las estaciones actuales y futuras según los métodos de distancia en línea recta y distancia por la red. Elaboración propia
- Tabla 5.** Población y empleo totales situados a menos de 900 m. de las diferentes estaciones de la red actual y de la red futura desde y hacia las estaciones de Atocha, Nuevos Ministerios, Chamartín y Sol, mediante el método de distancia en línea recta. Elaboración propia
- Tabla 6.** Duración media del trayecto (en minutos) entre una estación y las demás en hora punta en el presente, en el futuro y las diferencias en valores absolutos y valores relativos entre ambos momentos temporales. Elaboración propia



## I. INTRODUCCIÓN

### I.1. Planteamiento e interés del tema

En la actualidad nuestras sociedades desarrolladas viven un acelerado desarrollo de los transportes y las comunicaciones. Esto permite dotar a determinados territorios de significativas cualificaciones para relacionarse con los demás, pero a la vez margina a otros que carecen de estas facilidades para desarrollarse. Es, por tanto, que el propio desarrollo de las redes de transporte impone un modelo territorial desequilibrado.

Para evitar este desequilibrio se debe adoptar una adecuada Planificación Territorial que debe buscar la reducción en los desplazamientos de la población tanto si es en vehículo privado como si es en transporte público y, por tanto, facilitar los movimientos espaciales.

Es aquí donde entra en juego el concepto de “accesibilidad”. Numerosos autores han venido trabajando en su definición aunque mayoritariamente la accesibilidad se puede definir como la facilidad o dificultad para alcanzar un determinado destino desde un origen concreto. Es, por tanto, que el nivel de accesibilidad se convierte en un instrumento decisivo en la dinámica territorial. Además puede determinar otros aspectos como la propia distribución de la actividad económica o el establecimiento de los precios del suelo, mayores en las áreas con una mejor accesibilidad.

Las políticas públicas (también preocupadas por la movilidad sostenible) deberán ir encaminadas a mejorar la accesibilidad de los diferentes territorios y, por tanto, a facilitar los flujos espaciales entre los mismos, fomentando cada vez más el uso del transporte público por parte de los ciudadanos.

Esto fue lo que pretendió el Ministerio de Fomento el 20 de mayo de 2009 en colaboración con la Comunidad de Madrid al presentar el Plan de Infraestructuras Ferroviarias de Cercanías para Madrid con el que se intentaba acometer y finalizar para el año 2015 una gran expansión de esta red de transporte ferroviario. Aunque previsiblemente no se van a cumplir los plazos previstos inicialmente por la crisis económica que aqueja España en la actualidad, dicho Plan se encuentra aprobado y pretende poco a poco ir abriendo nuevas estaciones y prolongando las líneas ya existentes a municipios que hasta ahora carecían de acceso a esta red.

Tradicionalmente la red de Cercanías de Madrid ha sido la red ferroviaria que ha conectado la ciudad de Madrid con su área metropolitana y las principales poblaciones de la Comunidad. Actualmente, se extiende por casi toda ella alcanzando además localidades limítrofes de las provincias de Guadalajara (Azuqueca y Guadalajara) y de Segovia. Además interconecta su servicio con el de Metro de Madrid en más de 20 estaciones contando con diez líneas en funcionamiento, discurriendo por 370 km de vías



férreas, con 1.385 circulaciones diarias (en días laborables) y pudiendo transportar hasta un total de 880.000 viajeros. De hecho, el trazado y funcionamiento de las líneas de Cercanías contribuyen junto con las líneas de autobuses a definir y consolidar el área metropolitana de una gran aglomeración urbana como Madrid.

En este trabajo se pretende analizar la accesibilidad actual de esta red vertebradora del territorio así como su nivel de accesibilidad futuro tras la finalización y apertura de todas las estaciones y líneas propuestas en el Plan mencionado.

## **I.2. Objetivos**

El principal objetivo del trabajo es analizar y comparar la accesibilidad de la red de Cercanías de Madrid entre dos momentos temporales (en la actualidad y tras la finalización del Plan) mediante el empleo de tres indicadores de accesibilidad. Pero además se persiguen otros objetivos:

- Encuadrar este proyecto dentro de su marco teórico-metodológico.
- Analizar pormenorizadamente el Plan de Infraestructuras Ferroviarias, que permitirá la puesta en marcha de al menos 25 nuevas estaciones con los resultados que ello implica.
- Calcular la distancia media a las estaciones presentes y futuras, pues como en numerosos trabajos se ha observado, la accesibilidad peatonal a las redes de transporte público se convierte en el factor determinante a la hora de elegir el medio de transporte a utilizar para desplazarse.
- Calcular la media de minutos de recorrido desde cada estación al resto en el presente y en el futuro y sus diferencias.
- Evaluar el grado de vulnerabilidad de la red mediante la consideración hipotética del cierre de alguna estación.

Todo ello se realiza mediante un Sistema de Información Geográfica (GIS) que permite capturar, almacenar, manipular, analizar y presentar la información necesaria para conseguir los objetivos planteados. El software empleado es ArcGIS 10.0.

## **I.3. Estructura del trabajo**

La primera parte del trabajo comprende una introducción de los puntos de interés del presente estudio así como una breve presentación del tema principal que lo caracteriza. Además se especifican los objetivos concretos que se pretenden alcanzar.

El segundo apartado del trabajo, intenta en primer lugar enmarcar este proyecto dentro de los estudios previos que se han llevado a cabo sobre este tema con los



consiguientes problemas en la definición de “accesibilidad”. En segundo lugar, se efectúa un análisis de la red de Cercanías actual y del Plan de Infraestructuras Ferroviarias aprobado en el año 2009 que cambiará y mejorará la red extendiéndola a nuevos territorios. Este punto será importante para conocer posteriormente donde se realizarán los principales cambios en la accesibilidad y en qué medida afectarán dichos cambios a esos territorios.

Posteriormente en el tercer punto, se detalla la metodología acometida tanto para configurar la red como para realizar los análisis posteriores sobre la misma.

En el cuarto punto, se especifican ya los resultados obtenidos acompañados de una serie de mapas y tablas que facilitan la interpretación visual y espacial de los mismos.

Finalmente, se extraen una serie de conclusiones que nos ayudan a clarificar los principales puntos del presente trabajo y las posibles líneas de investigación futuras.



## II. ESTADO DE LA CUESTIÓN

### II.1. Marco teórico-metodológico

Históricamente, los cambios en las infraestructuras de transporte han producido una progresiva contracción del espacio en el sentido que los tiempos de viaje han sido acortados y los costes de transporte reducidos (Gutiérrez, 2001).

La era de la globalización en la que estamos insertos ha producido una estrecha relación entre las nuevas tecnologías y estos cambios en las infraestructuras de transporte. Ya en 1969, Janelle denomina “convergencia espacio-temporal” a la reducción de las distancias espaciales si éstas son medidas en unidades de tiempo, lo que años más tarde Harvey (1989) define como “compresión espacio-tiempo”. Pero estas definiciones no son homogéneas ni espacial ni tampoco socialmente, es decir, determinados espacios se ven beneficiados por la reducción de la distancia en tiempo mientras que otros espacios quedan marginados por dichos procesos (García, 2000).

Para entender las relaciones entre los espacios y los grupos sociales que habitan los mismos se propone la medida de la accesibilidad, concepto que cada vez se considera más importante tanto para analizar los espacios ya provistos de infraestructuras como para los nuevos que las necesitan y carecen de ellas.

La accesibilidad es un concepto ampliamente utilizado en estudios de transporte, sin embargo no es común encontrar una definición establecida de accesibilidad en la literatura científica (Chang et al., 2008). Por lo tanto, existen numerosos problemas a la hora de encontrar un criterio común en la definición de este elemento, ya que como Gould señaló en 1969 la accesibilidad es uno de esos términos comunes que todo el mundo utiliza hasta que se encuentra con el problema de medirlos y definirlos.

Uno de los pioneros en trabajar con este término fue W.G. Hansen que en 1959 define la accesibilidad como “el potencial de oportunidades para la interacción”, relacionando esta con la actividad. A partir de aquí numerosos autores trataron de proporcionar un término a este complejo concepto dando lugar a una clasificación que Jones propone en 1981 de dos grandes tipos de definiciones:

1. Aquellas que relacionan la accesibilidad únicamente con la distancia espacial, definiendo la accesibilidad de un punto como “la medida de la distancia entre este y el resto de los puntos del espacio o de la red”.
2. El otro gran tipo de definiciones es el que se encuentra vinculado con la definición que Hansen propone en 1959 arriba mencionada. En este sentido, se pueden destacar dos definiciones. Por un lado, la definición que Dalvi (1974) señala como “la facilidad con que una actividad puede ser realizada desde una localización usando un sistema particular de transportes”. Y por



otro, la formulada por Linneker y Spence en 1992 que la definen como un “intento de medir las oportunidades disponibles por la población y las empresas para alcanzar lugares donde puedan realizar actividades que les son importantes”.

Tomando como ejemplo esta última definición, será necesario tener en cuenta primeramente tres elementos:

1. El sistema de transportes considerado, pues no será lo mismo una red de transporte público que una de transporte privado. En nuestro caso, como ya se ha indicado, se toma como elemento de estudio la red de Cercanías de Madrid.
2. La impedancia considerada o lo que es lo mismo la resistencia al desplazamiento, cuyo elemento decisivo será la distancia espacial. En cualquier caso, la impedancia puede ser expresada en unidades de longitud (Keeble et al, 1988), unidades de tiempo que será la considerada en este estudio (Lutter et al., 1992; Bruinsma y Rietveld, 1993; Dundon-Smith y Gibb, 1994; Geertman y Ritsema van Eck, 1995; Gutiérrez y Urbano, 1996) o medida en coste económico del desplazamiento vinculada a la definición que Izquierdo (1994) hace del “coste generalizado del transporte” como la suma total de los costes empleados para superar una distancia.
3. Lo que se ha venido denominando como “*oportunidades disponibles*”, factor que tiene importancia si nuestra finalidad es desplazarnos a un determinado destino para realizar una actividad concreta en él. Es lo que Gutiérrez (1992) indica como el tipo de actividad en la que el usuario de la red quiere tomar parte.

Una vez definidos estos tres elementos clave, ya se pueden aplicar los diferentes índices de accesibilidad que han sido acuñados por distintos autores. El uso de un indicador ayuda a la identificación científica, cuantificación y clasificación de áreas con un valor variable de accesibilidad (Chang et al., 2008).

Aunque existen multitud de indicadores acuñados desde el primero propuesto por Hansen en 1959, la mayoría de ellos han combinado dos componentes para definir el valor accesibilidad: la impedancia del transporte y la atracción espacial (Martín et al., 2004).

Destacan entre ellos, sobre todo por ser mayoritariamente aplicada a entornos urbanos y metropolitanos, la selección propuesta por Gutiérrez y Gómez en 1999 que subrayan cinco índices fundamentales (*Tabla 1*): el *tiempo de acceso al centro urbano*, la *media no ponderada del coste de viaje*, la *media ponderada del coste de viaje*, el *potencial económico* y las *oportunidades de acceso*. En el presente trabajo se han aplicado estos tres últimos, los cuales definimos a continuación:



| Indicador                               | Formulación   | Variables utilizadas  | Características   |
|---|---|---|---|
| Tiempo de acceso al centro de la ciudad |   |   | Tiempo o coste de acceso entre un nodo determinado y el CBD.  |
| Medida del coste de viaje no ponderado  |   |   | Porcentaje del coste o tiempo de viaje no ponderado entre un nodo y todos los centroides de la red.   |
| Medida del coste de viaje ponderado     | $A_i = \frac{\sum_j (\tau_{ij} * M_j)}{\sum_j M_j}$ | <p><math>\tau_{ij}</math> = tiempo de viaje entre el nodo <math>i</math> y el nodo <math>j</math>.</p> <p><math>M_j</math> = masa (población o empleo) en el centro de destino <math>j</math>.</p>  | Al igual que el anterior mide el tiempo de viaje medio tomando en cuenta todas las relaciones, pero considerando también la importancia de cada uno de los núcleos en función de su masa. |
| Oportunidades de acceso                 |   |   | Actividad económica o población dentro de un determinado límite de coste o tiempo de desplazamiento.  |
| Potencial económico                     | $P_i = \sum_j \frac{M_j}{C_{ij}^a}$                 | <p><math>P_i</math> = Potencial económico del nodo <math>i</math>.</p> <p><math>M_i</math> = medida de la actividad económica en el centroide <math>j</math>.</p> <p><math>C_{ij}</math> = coste de transporte entre <math>i</math> y <math>j</math>.</p> <p><math>a</math> = parámetro que refleja el incremento de la fricción (o coste de desplazamiento) de la distancia.</p> | Pondera todas las relaciones según la utilidad del centroide de destino.  |

Tabla 1. Algunos indicadores de accesibilidad seleccionados por Gutiérrez, J. y Gómez, G. (1998).

- La *media ponderada del coste de viaje* o *coste potencial de transporte* se obtiene como resultado de calcular la media, ponderada por el peso de las masas (generalmente población o empleo) de cada uno de los nodos, del coste del viaje entre cada nodo y el resto de los nodos (García, 2000). Los resultados son fácilmente interpretables pues podemos transformarlos en representaciones geográficas que nos permitirán visualizar con una mayor claridad donde se han producido las mayores diferencias entre momentos temporales distintos.
- El *potencial económico* propuesto por Hansen es quizás el índice más empleado. Sus resultados son más difícilmente interpretables pues los resultados serán mayores cuanto mayores sean las masas de atracción de los diferentes nodos y menor sea la longitud que los aleja (García, 2000).
- El índice de las *oportunidades de acceso*, permite calcular el número de oportunidades disponibles desde un determinado nodo dentro de un intervalo de coste de transporte establecido a partir de dicho nodo. Sus resultados son igualmente de fácil interpretación ya que nos permite observar con claridad el efecto de la construcción de nuevas infraestructuras de transporte.



Quizás una de las cosas más importantes a la hora de elegir los indicadores de accesibilidad a aplicar en cualquier trabajo es que su resultado sea entendible y de fácil interpretación, pues como señalaron Geertman y Ritsema van Eck en 1995 “los indicadores de accesibilidad deben ser entendibles tanto para el público en general como para los tomadores de decisiones”.

Aunque existen numerosos estudios que aplican estos índices a las redes de carreteras (ya sean privadas o públicas) son menos los que utilizan estos elementos para explicar la accesibilidad en el entorno ferroviario. A pesar de ello, se pueden encontrar importantes trabajos realizados sobre la accesibilidad del ferrocarril de alta velocidad tan en alza en la actualidad. Claros ejemplos de ello son el trabajo de Gutiérrez en 1996 sobre la red del tren de alta velocidad europea y sus efectos en los patrones de accesibilidad, o el trabajo firmado por Chang y Lee en 2008 sobre los efectos del ferrocarril de alta velocidad sobre el área metropolitana de Seúl. Todos estos trabajos junto a otros han servido de gran aportación a este trabajo, que a la vez resulta innovador al tratar el concepto de accesibilidad sobre una red de transporte público ferroviario en un entorno urbano y metropolitano como es el caso de la Comunidad de Madrid y su red de Cercanías.

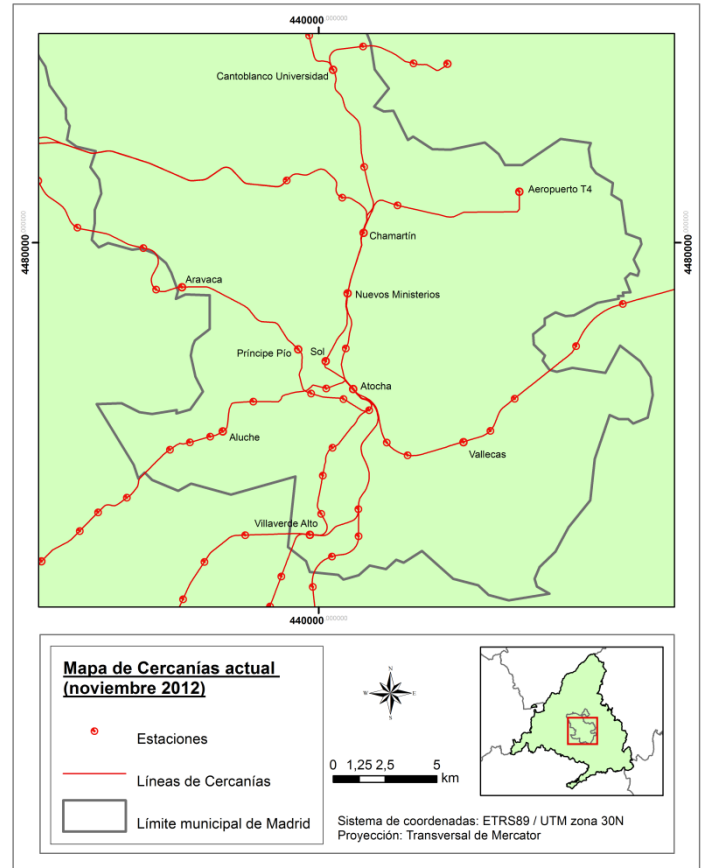
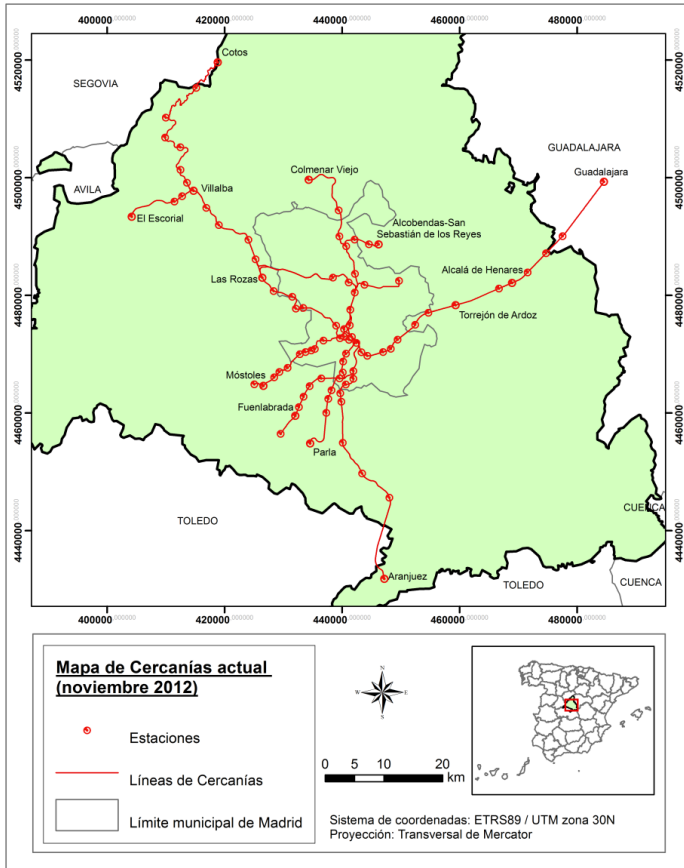
## **II. 2. Estado actual de la red de Cercanías de Madrid y el Plan de Infraestructuras Ferroviarias (2009-2015).**

Cercanías Madrid es el servicio ferroviario explotado por Renfe Operadora que conecta la ciudad de Madrid con su área metropolitana y las principales poblaciones de la Comunidad de Madrid sobre una infraestructura de ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias). La red actual cuenta con hasta diez líneas en funcionamiento, discurriendo por más de 370 km de vías férreas y 89 estaciones que aseguran la accesibilidad a casi un millón de viajeros diarios en los días laborables de mayor demanda.

Tal y como se puede observar en la *Figura 2*, la red actual alcanza por el norte importantes municipios de la sierra como Villalba o El Escorial, por el norte Colmenar Viejo, por el este Torrejón de Ardoz o Alcalá de Henares alcanzando la ciudad de Guadalajara ya en Castilla la Mancha, y por el sur localidades como Aranjuez, Parla, Fuenlabrada o Móstoles, todos ellos grandes y poblados municipios del área metropolitana de la ciudad de Madrid.

Si nos referimos a las estaciones enmarcadas dentro del límite municipal de la ciudad de Madrid (*Figura 3*), podemos destacar la estación de Atocha por la que pasan la totalidad de las líneas existentes o Chamartín por la que discurren las líneas que parten hacia el noroeste y noreste de la Comunidad. Además la estación de Sol situada en el centro neurálgico de la ciudad y abierta al público en junio de 2009, constituyó

uno de los proyectos más ambiciosos del transporte ferroviario de los últimos años, pues se construyó un nuevo túnel entre las estaciones de Atocha y Nuevos Ministerios y una impresionante bóveda para acoger una macroestación de Cercanías con correspondencia con tres líneas de metro.



**Figuras 1 y 2.** Mapas de la totalidad de la red de Cercanías y de la misma en la mayor parte del municipio de Madrid en la actualidad (noviembre de 2012). *Elaboración propia*

Para tener una idea clara de cada una de las líneas, a continuación se describe la denominación de cada una de ellas con su origen, su destino y algunas estaciones que atraviesa en su recorrido así como un mapa esquemático de la red (*Figura 5*), pues ello nos ayudará en adelante a la hora de identificar cualquier línea por su nombre:

- Línea C-1: Príncipe Pío – Atocha – Recoletos – Aeropuerto T4.
- Línea C-2: Guadalajara – Alcalá de Henares – Atocha – Chamartín.
- Línea C-3: Aranjuez – Atocha – Sol - Chamartín – El Escorial.
- Línea C-4: Parla – Atocha- Chamartín – Cantoblanco – Alcobendas San Sebastián de los Reyes.
- Línea C-4: Parla – Atocha- Chamartín – Cantoblanco – Colmenar Viejo.
- Línea C-5: Móstoles El Soto – Atocha – Fuenlabrada – Humanes.
- Línea C-7: Alcalá de Henares – Atocha – Chamartín – P. Pío – Atocha - Chamartín – Fuente de la Mora.

- Línea C-8: Atocha – Chamartín – Villalba – Cercedilla.
- Línea C-8: Atocha – Chamartín – Villalba – El Escorial.
- Línea C-9: Cercedilla – Cotos.
- Línea C-10: Villalba – Príncipe Pío – Atocha – Chamartín – Fuente de la Mora.



Figura 3. Mapa esquemático de la red de Cercanías de Madrid (noviembre de 2012). Fuente: Consorcio Regional de Transportes de Madrid

Si atendemos a la demanda, existe una tendencia creciente desde al menos el año 2004 según el Observatorio del Ferrocarril en España. Desde entonces, el número de viajeros subidos y bajados no ha parado de crecer hasta alcanzar los más de 233 millones de viajeros en el año 2011 en la totalidad de la red. Si atendemos a las estaciones que más viajeros acumulan (Tabla 2), Atocha, Nuevos Ministerios y Chamartín se sitúan entre 2009 y 2011 en los tres primeros puestos respectivamente, debido a que por ellas discurren la práctica totalidad de las líneas de Cercanías (en el caso de Atocha la totalidad). Además en Atocha y Chamartín se sitúan las dos principales estaciones de trenes de media y larga distancia del país y las tres cuentan con una buena conexión con otras redes de transporte público como el Metro de Madrid



o la red de autobuses urbanos. A todo ello, podemos agregar que son estaciones bastante céntricas y en sus alrededores se puede hallar una gran cantidad de oficinas y empleo en general.

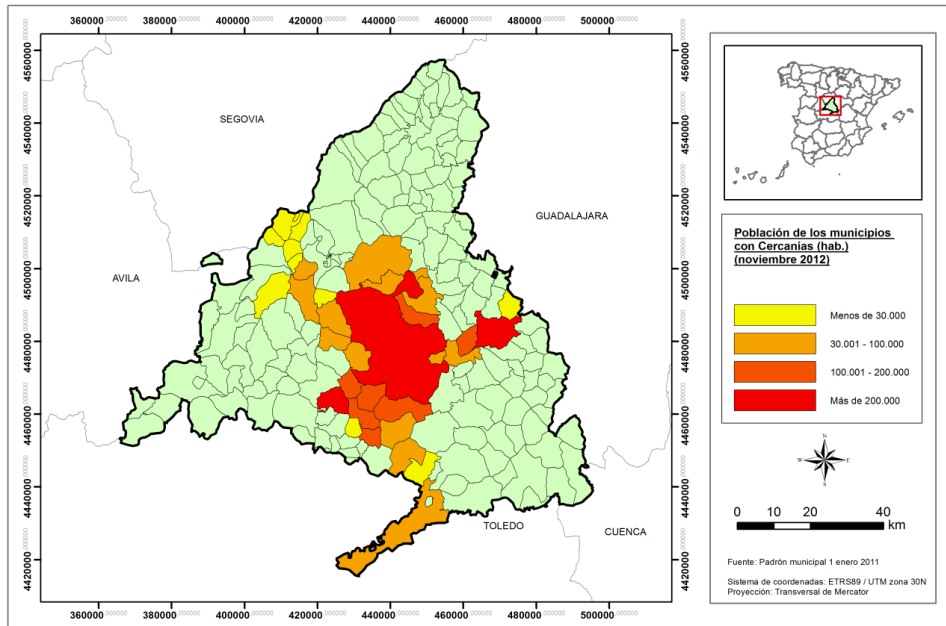
Destaca la aparición en el año 2010 de la estación de Sol en el cuarto puesto de la lista (con casi 15 millones de viajeros anuales). Esto se debe a su ubicación geográfica en el centro de Madrid que sirve tanto a turistas y madrileños como una estación para alcanzar el mismo núcleo de la ciudad. Otra estación importante es Méndez Álvaro, que alberga una de las principales estaciones de autobuses. En los siguientes puestos se pueden encontrar otras estaciones que reciben también gran cantidad de viajeros como Aluche, Parla o Fuenlabrada, debido a la gran cantidad de población que vive en los alrededores de estas estaciones.

Las 20 primeras estaciones de la red reúnen alrededor del 95% de los viajeros anuales entre 2009 y 2011, por lo que existe una fuerte concentración en la demanda lo que puede ayudar a la hora de tomar decisiones y priorizar unas estaciones sobre otras.

| 2009               |             | 2010               |             | 2011               |             |
|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
| Estación           | Viajeros    | Estación           | Viajeros    | Estación           | Viajeros    |
| Atocha             | 34.228.823  | Atocha             | 31.244.901  | Atocha             | 29.986.681  |
| Nuevos Ministerios | 29.094.748  | Nuevos Ministerios | 30.966.656  | Nuevos Ministerios | 29.480.908  |
| Chamartín          | 14.364.946  | Chamartín          | 14.973.019  | Chamartín          | 15.312.444  |
| Aluche             | 11.341.645  | Sol                | 14.320.677  | Sol                | 14.307.688  |
| Méndez Álvaro      | 10.963.572  | Méndez Álvaro      | 12.143.381  | Méndez Álvaro      | 12.835.301  |
| Fuenlabrada        | 10.177.682  | Parla              | 10.788.861  | Parla              | 10.769.210  |
| Móstoles           | 9.890.528   | Aluche             | 10.103.705  | Fuenlabrada        | 10.578.577  |
| Embajadores        | 9.593.333   | Fuenlabrada        | 9.964.948   | Aluche             | 10.051.275  |
| Parla              | 9.074.709   | Embajadores        | 8.618.364   | Embajadores        | 8.461.675   |
| Sol                | 8.462.919   | Móstoles           | 8.484.285   | Móstoles           | 8.300.553   |
| Alcalá Henares     | 8.349.344   | Recoletos          | 7.950.032   | Getafe             | 8.134.040   |
| Príncipe Pío       | 7.873.431   | Getafe             | 7.863.788   | Recoletos          | 7.999.737   |
| Leganés            | 7.863.692   | Alcalá Henares     | 7.643.440   | Leganés            | 7.744.179   |
| Recoletos          | 7.513.866   | Leganés            | 7.540.557   | Alcalá Henares     | 7.623.991   |
| Getafe             | 6.568.580   | Príncipe Pío       | 7.198.110   | Villaverde Alto    | 7.381.260   |
| Vallecas           | 6.447.941   | Villaverde Alto    | 7.009.680   | Príncipe Pío       | 7.245.095   |
| Coslada            | 6.372.933   | Villaverde Bajo    | 6.210.124   | Vallecas           | 6.429.174   |
| Villaverde Alto    | 6.148.259   | Coslada            | 6.089.696   | Villaverde Bajo    | 6.367.143   |
| Vicálvaro          | 5.939.279   | Cantoblanco        | 6.035.704   | Alcorcón           | 6.077.692   |
| Cantoblanco        | 5.895.290   | Entrevías          | 5.988.693   | Coslada            | 5.940.992   |
| 20 primeras        | 216.165.520 | 20 primeras        | 221.138.621 | 20 primeras        | 221.027.615 |
| Resto viajeros     | 8.832.480   | Resto viajeros     | 3.503.379   | Resto viajeros     | 12.654.385  |
| Total viajeros     | 224.998.000 | Total viajeros     | 224.642.000 | Total viajeros     | 233.682.000 |

**Tabla 2.** Tráfico de viajeros subidos y bajados entre 2009 y 2011 de las 20 primeras estaciones con más viajeros de la red de Cercanías de Madrid. Fuente: RENFE y ADIF. Elaboración propia

Por último, podemos destacar la amplia cobertura poblacional de la red de Cercanías actual al estar presente en 32 municipios de la Comunidad (*Figura 6*) que suman un total de 5.683.447 de habitantes según el Censo de Población del año 2011, lo que representa un 87,5% de la población total de la Comunidad de Madrid. De hecho, los 17 municipios de la Comunidad con más de 60.000 habitantes, exceptuando Rivas-Vaciamadrid, cuentan con una o varias estaciones de la red dentro de sus respectivos límites municipales.



*Figura 4. Población de los municipios con Cercanías (habitantes) en noviembre de 2012. Fuente: Padrón municipal a 1 de enero de 2011. Elaboración propia*

Sin embargo, los nuevos desarrollos urbanos de los municipios del área metropolitana, con expectativas de crecimiento importantes, plantearon la necesidad de ampliar la red. Este es el principal motivo que llevó a la Administración a presentar el 20 de mayo de 2009 el Plan de Infraestructuras Ferroviarias de Cercanías para Madrid. Aunque los objetivos de este Plan estaban fijados para el año 2015, debido a la crisis económica se ha pospuesto su puesta en marcha en alguno de sus puntos y, por tanto, su completa finalización para dicho año.

Los principales objetivos de este Plan, tal y como se especifican en su pliego, fueron los siguientes:

- Ampliación de la cobertura poblacional de la red.
- Mayor funcionalidad y capacidad de la red.
- Menores tiempos de viajes.
- La potenciación de la red como modo de transporte básico en la movilidad metropolitana.
- Mayor accesibilidad al centro de Madrid desde todos los corredores.



- Mayor calidad del servicio al reducir los transbordos entre líneas de Cercanías.
- Mejora de la conectividad con otros modos de transporte.
- Mayor calidad, fiabilidad y puntualidad de los servicios.
- Mejor accesibilidad a personas de movilidad reducida.
- Impulso a la sostenibilidad y a la mejora de la calidad de vida, el entorno urbano y el medio ambiente.

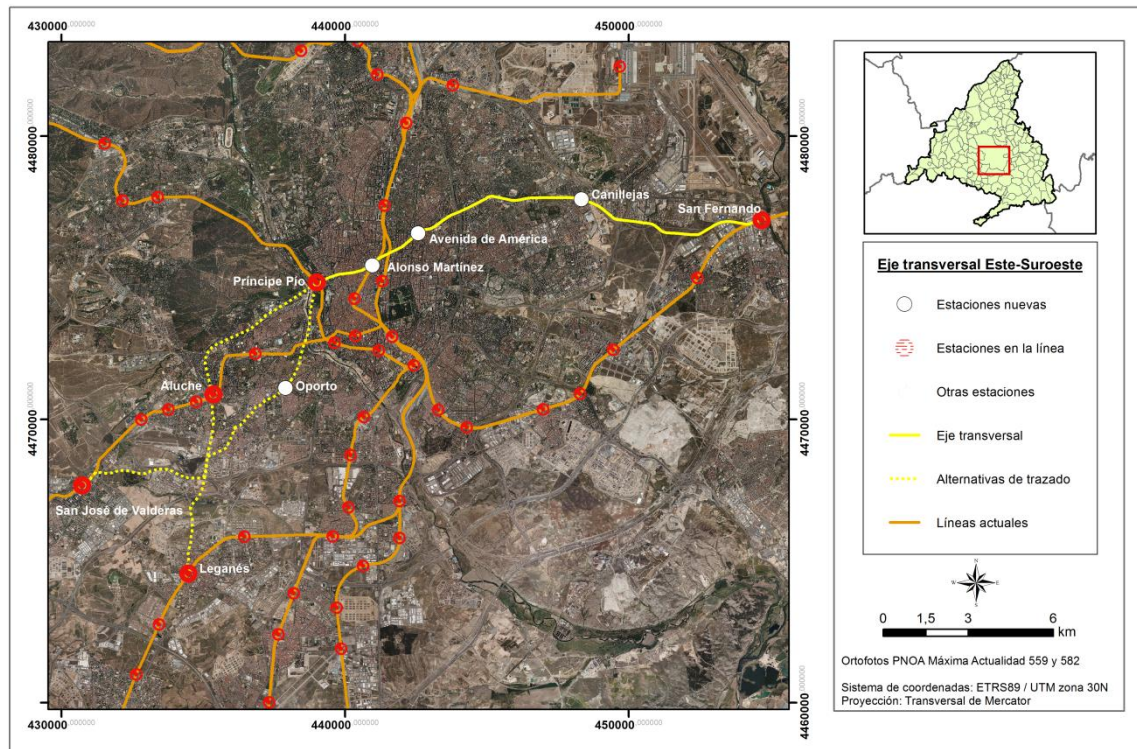
Para conseguir dichos objetivos se planificaron unas directrices y unos criterios de actuación:

- La penetración de líneas al interior de la ciudad de Madrid, mediante un eje transversal que facilitase el acceso directo de los viajeros a los destinos en el centro de Madrid.
- La prolongación de líneas a la corona metropolitana, para atender nuevos desarrollos y municipios con expectativas de crecimiento no servidos actualmente.
- Ampliaciones de la capacidad mediante el aumento del número de vías en algunas líneas con flujos importantes de mercancías, a fin de establecer una red independiente para uso de los Cercanías separada de otros tráficos.

Por lo tanto, las principales actuaciones del Plan, que a su vez tendrán significancia en este estudio, serán las siguientes:

## 1. CONSTRUCCIÓN DE UN EJE TRANSVERSAL ESTE-SUROESTE

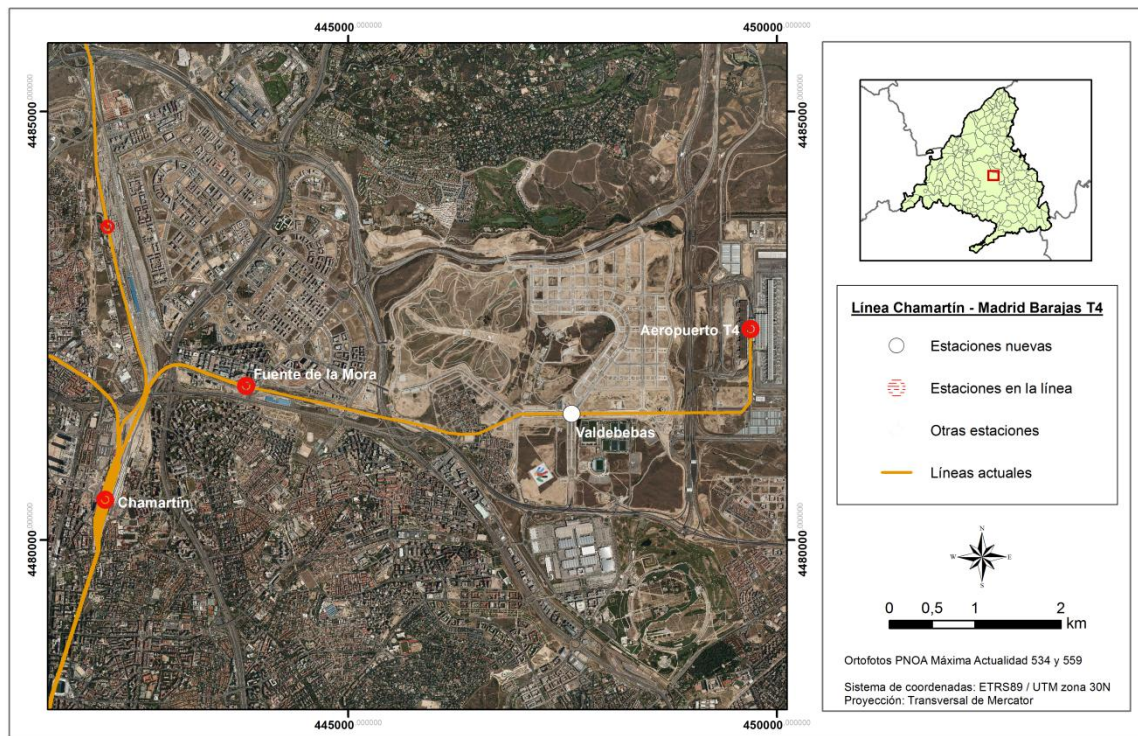
Con esta línea de actuación muy ambiciosa se pretende conectar el corredor del Henares con los corredores del Suroeste además de construir hasta cinco intercambiadores con el Metro de Madrid y situar estaciones en zonas de la ciudad que hasta ahora carecían de conexión directa con la red. Con ella se intenta dotar a estos corredores de una penetración rápida y directa con el centro de la ciudad y, asimismo, reducir los tiempos de viaje y aumentar la frecuencia de trenes para la elevada demanda que soportan estas zonas del área metropolitana. Ante la indecisión del trazado de este eje en el suroeste, se definen dos alternativas que serán tenidas en cuenta en este estudio: una, que partiendo de la estación de Príncipe Pío llegue a Leganés parando antes en la estación de Aluche; la otra, parte de la misma estación pero traza su recorrido hacia San José de Valderas no sin antes parar en la hasta ahora estación de Metro de Oporto (*Figura 5*).



**Figura 5.** Trazado del Eje Transversal Este - Suroeste. Fuente: Plan de Infraestructuras Ferroviarias de Cercanías para Madrid (2009-2015). Elaboración propia

## 2. LÍNEA CHAMARTÍN – MADRID BARAJAS T4

Con esta línea se permite la conexión a través de la red de Cercanías con el aeropuerto de Madrid, conectado éste con la estación de Chamartín en poco más de 10 minutos. Actualmente, dicha línea y dicha estación junto con la estación de Fuente de la Mora ya se encuentran abiertas al público desde septiembre y marzo de 2011 respectivamente, dado que tuvo un carácter prioritario en su construcción por la importancia de conectar el aeropuerto con el centro de la ciudad a través de esta red. Además de la estación en el aeropuerto y la de Fuente de la Mora se incorporaría a la red una nueva estación más, ubicada en uno de los nuevos desarrollos urbanos de la zona noreste de Madrid: Valdebebas (*Figura 6*).



**Figura 6.** Trazado de la línea Chamartín – Aeropuerto T4. Fuente: Plan de Infraestructuras Ferroviarias de Cercanías para Madrid (2009-2015). Elaboración propia

### 3. PROLONGACIÓN DE LA LÍNEA C-4 DE PARLA A TORREJÓN DE LA CALZADA/TORREJÓN DE VELASCO

Esta actuación supone conectar la estación central de Parla con sus cercanos municipios de Torrejón de la Calzada y Torrejón de Velasco con una estación intermedia junto al hospital de Parla (*Figura 7*).

### 4. PROLONGACIÓN DE LA LÍNEA C-5 DE HUMANES A GRIÑÓN E ILLESCAS

La actuación incluye la electrificación y duplicación de la vía ya existente, su adecuación a la red de Cercanías y la ubicación de tres nuevas estaciones: una en Griñón, otra en una situación intermedia entre Cubas de la Sagra, Casarrubuelos y Ugena y la última alcanzando la provincia de Toledo, en la localidad de Illescas. En total una prolongación de 15 km, todos ellos en superficie (*Figura 8*).

### 5. PROLONGACIÓN DE LA LÍNEA C-4 DE COLMENAR VIEJO A SOTO DEL REAL

Al igual que en la actuación anterior, se incluye la duplicación, electrificación y adecuación para su explotación de Cercanías de las vías existentes, incluyendo como propuesta dos estaciones en la localidad de Soto del Real (*Figura 9*).

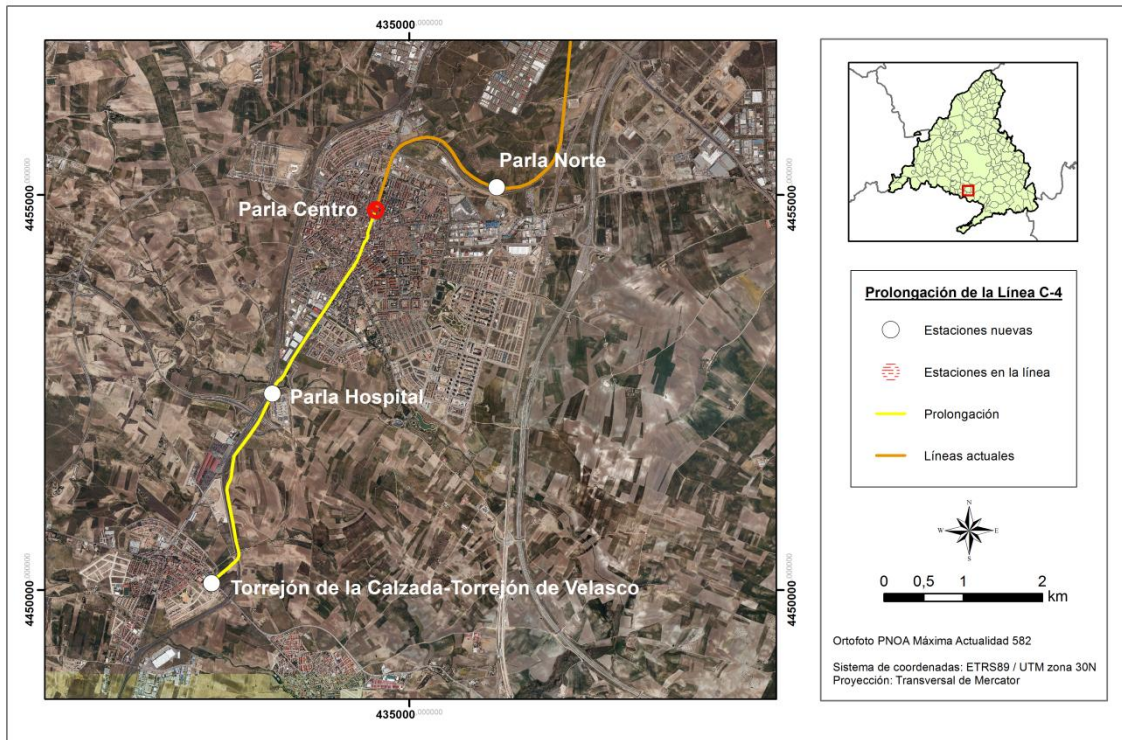
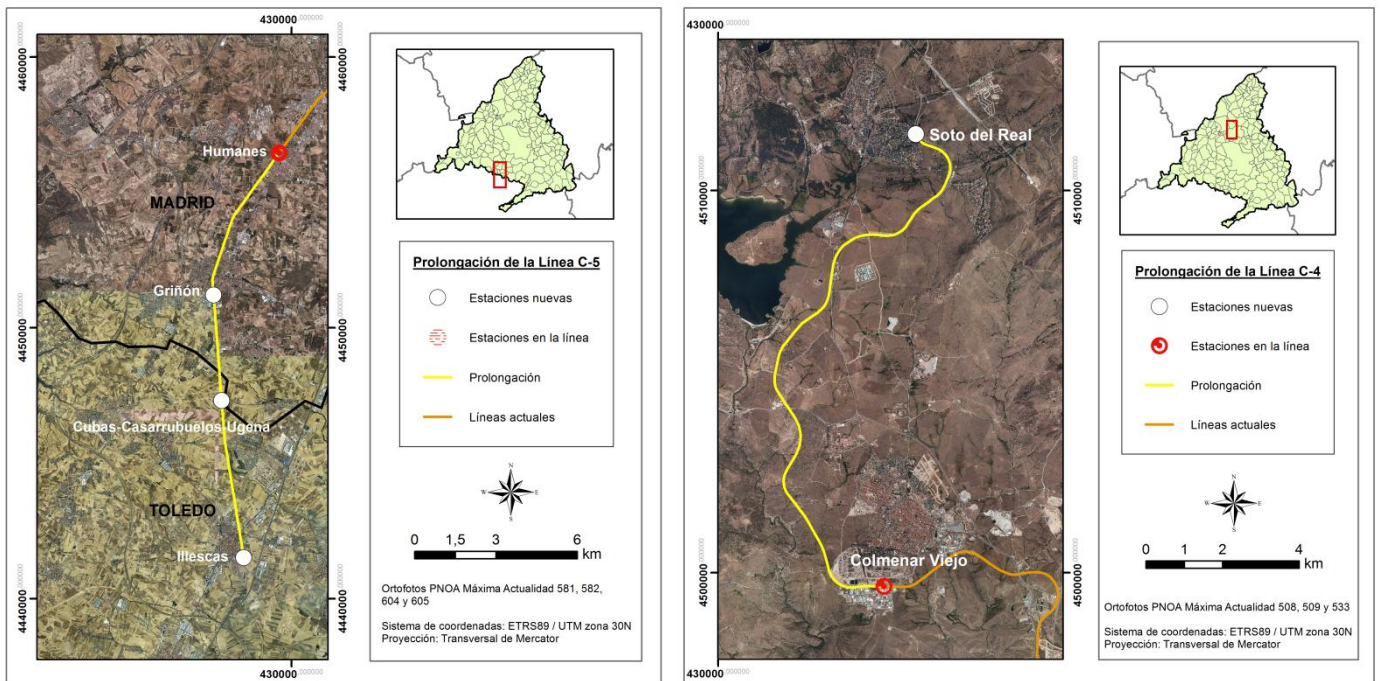


Figura 7. Trazado de la Línea C-4: Parla – Torrejón de la Calzada/Torrejón de Velasco. Fuente: Plan de Infraestructuras Ferroviarias de Cercanías para Madrid (2009-2015). Elaboración propia



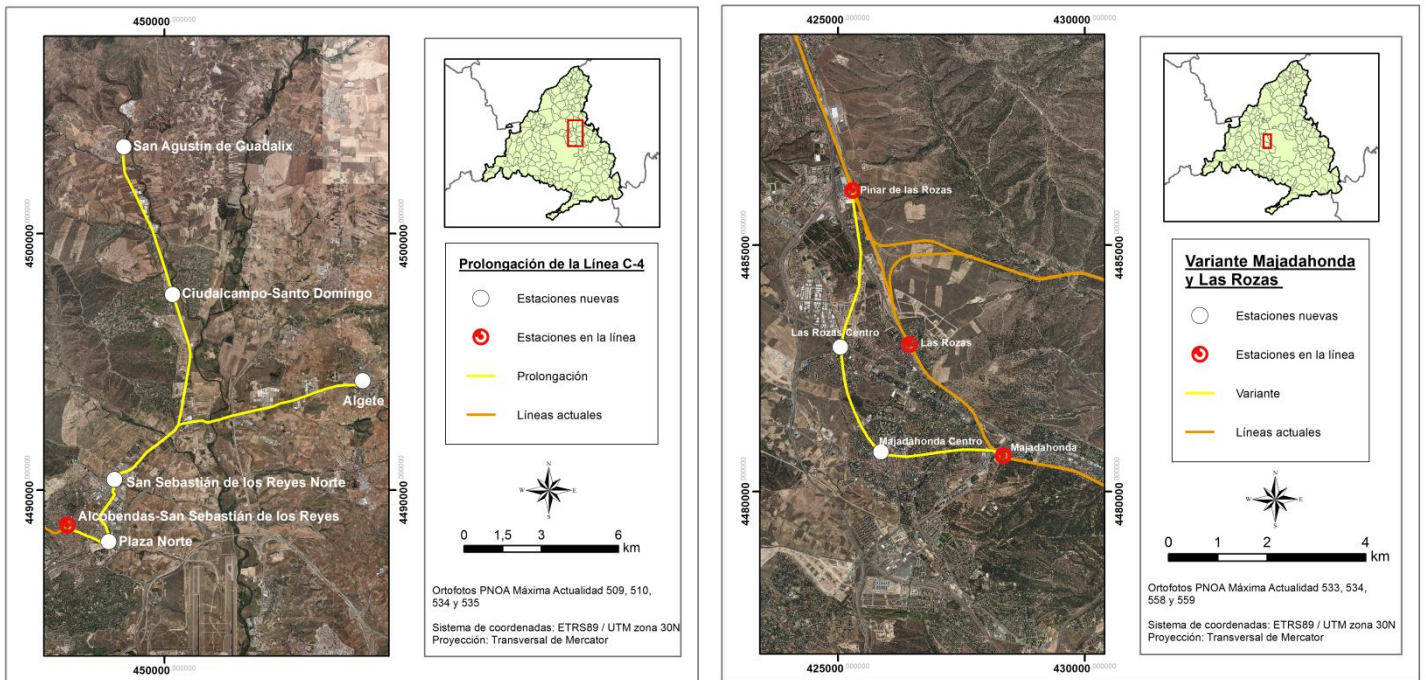
Figuras 8 y 9. Trazados de las Línea C-5: Humanes – Illescas y de la Línea C-4: Colmenar Viejo – Soto del Real. Fuente: Plan de Infraestructuras Ferroviarias de Cercanías para Madrid (2009-2015). Elaboración propia

## 6. PROLONGACIÓN DE LA LÍNEA C-4 DESDE ALCOBENDAS-SAN SEBASTIÁN DE LOS REYES A SAN AGUSTÍN DE GUADALIX Y ALGETE

Una de las actuaciones más costosas, pues conlleva el levantamiento de 25,1 km de vías a través de dos ramales: uno a San Agustín de Guadalix con una parada intermedia entre Ciudadcampo y Santo Domingo y el otro con destino Algete. Además, antes de bifurcarse en dos ramales, se incorporarían dos estaciones más junto al Centro Comercial Plaza Norte y en el norte de San Sebastián de los Reyes donde está planificada una nueva expansión urbana (*Figura 10*).

## 7. VARIANTE POR EL CENTRO URBANO DE MAJADAHONDA Y LAS ROZAS

Esta actuación tiene por objeto mejorar la accesibilidad de estos dos grandes municipios que en total aglutinan a casi 160.000 habitantes. Incluye una variante de la actual línea de Cercanías con dos estaciones nuevas, situadas en los centros urbanos de los respectivos municipios (*Figura 11*).



*Figuras 10 y 11. Trazados de las Línea C-4: Alcobendas/San Sebastián de los Reyes – Algete y San Agustín de Guadalix y de la variante por el centro urbano de Majadahonda y Las Rozas. Fuente: Plan de Infraestructuras Ferroviarias de Cercanías para Madrid (2009-2015). Elaboración propia*

## 8. OTRAS ACTUACIONES A DESARROLLAR POR LA COMUNIDAD DE MADRID

8.1. Variante de la línea C-2 en Torrejón de Ardoz (*Figura 12*). Incluye una variante subterránea con 3 estaciones en el citado núcleo, lo cual permitirá a los habitantes del corredor del Henares acceder a Madrid por tres caminos

diferentes: el actual hasta Atocha, la línea hasta Chamartín y por el eje transversal proyectado en este Plan desde la estación de San Fernando.

8.2. Nueva línea Majadahonda-Moncloa. Aprovechando la construcción de la variante por el centro urbano de Majadahonda desde un punto intermedio entre Aravaca y Príncipe Pío, la Comunidad deberá construir un ramal que parta hacia Moncloa. Esto permitirá conectar la población de estos núcleos del noroeste metropolitano con un nuevo destino en la ciudad de Madrid.

8.3. Preparación de la red de Cercanías para conectar Móstoles con Navalcarnero y su posible incorporación a la línea C-5 (Figura 13).

## 9. CONSTRUCCIÓN DE CINCO NUEVAS ESTACIONES SOBRE LÍNEAS YA EXISTENTES

9.1. Una en la línea C-2 en el barrio de Soto del Henares, en Torrejón de Ardoz.

9.2. Dos en la línea C-3, denominadas Parque Andalucía (junto al parque empresarial que lleva el mismo nombre en Getafe) y La Tenería (al norte del municipio de Pinto donde se prevé un nuevo desarrollo urbano).

9.3. Una en la línea C-4 en Parla Norte, donde se pretende el enlace futuro con el tranvía de Parla que también pronostica la apertura de una estación con el mismo nombre.

9.4. Una en la línea C-7 y C-8 en el madrileño barrio de Mirasierra, cuyo nombre será Costa Brava.

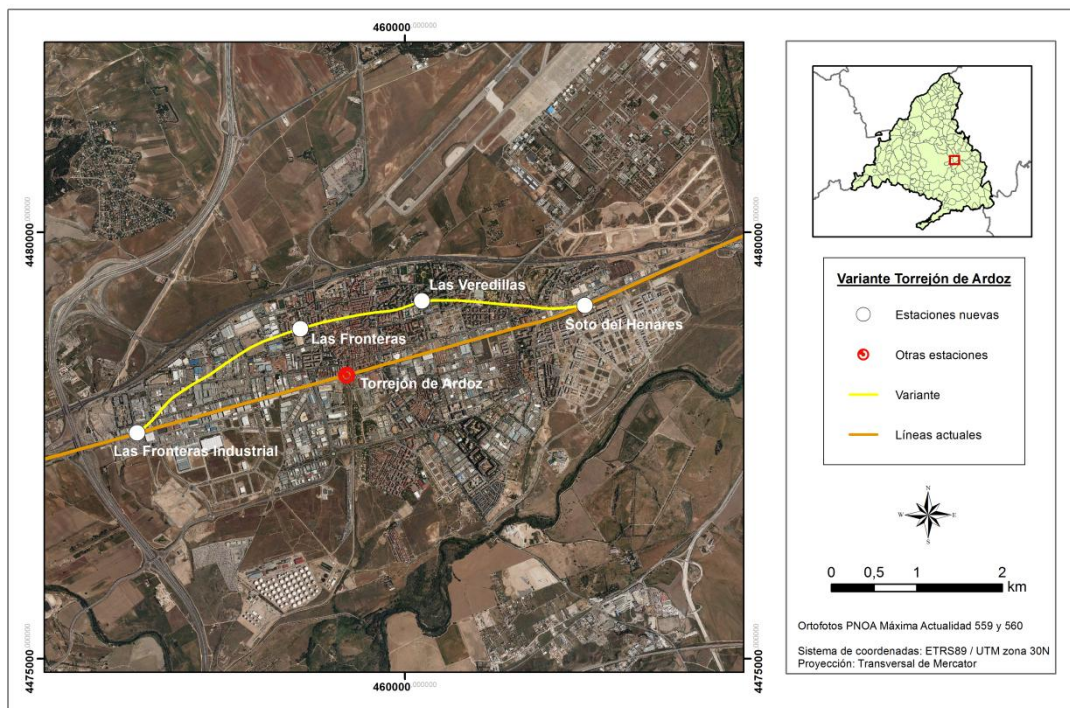


Figura 12. Trazado de la variante de Torrejón de Ardoz. Fuente: Plan de Infraestructuras Ferroviarias de Cercanías para Madrid (2009-2015). Elaboración propia

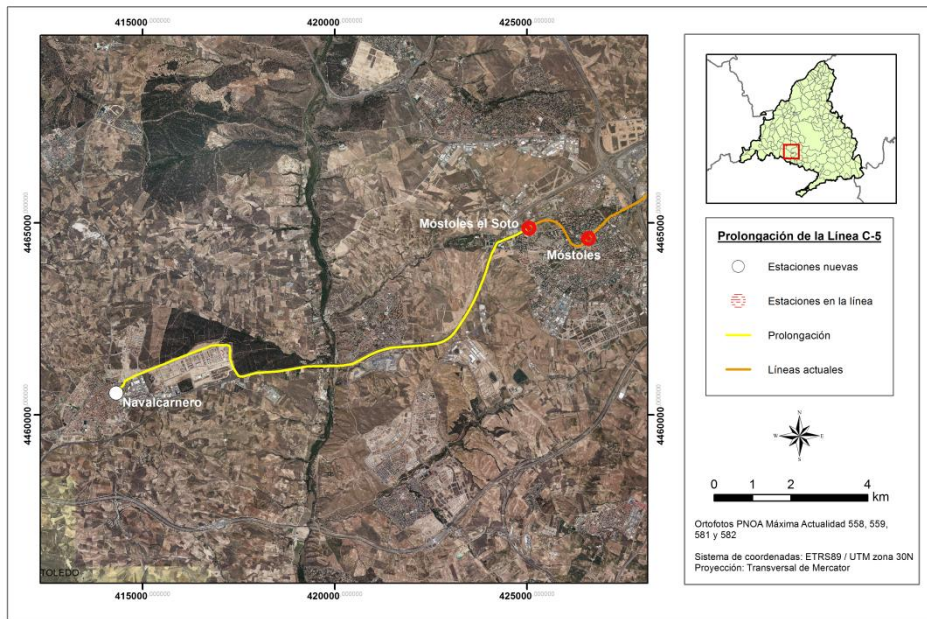
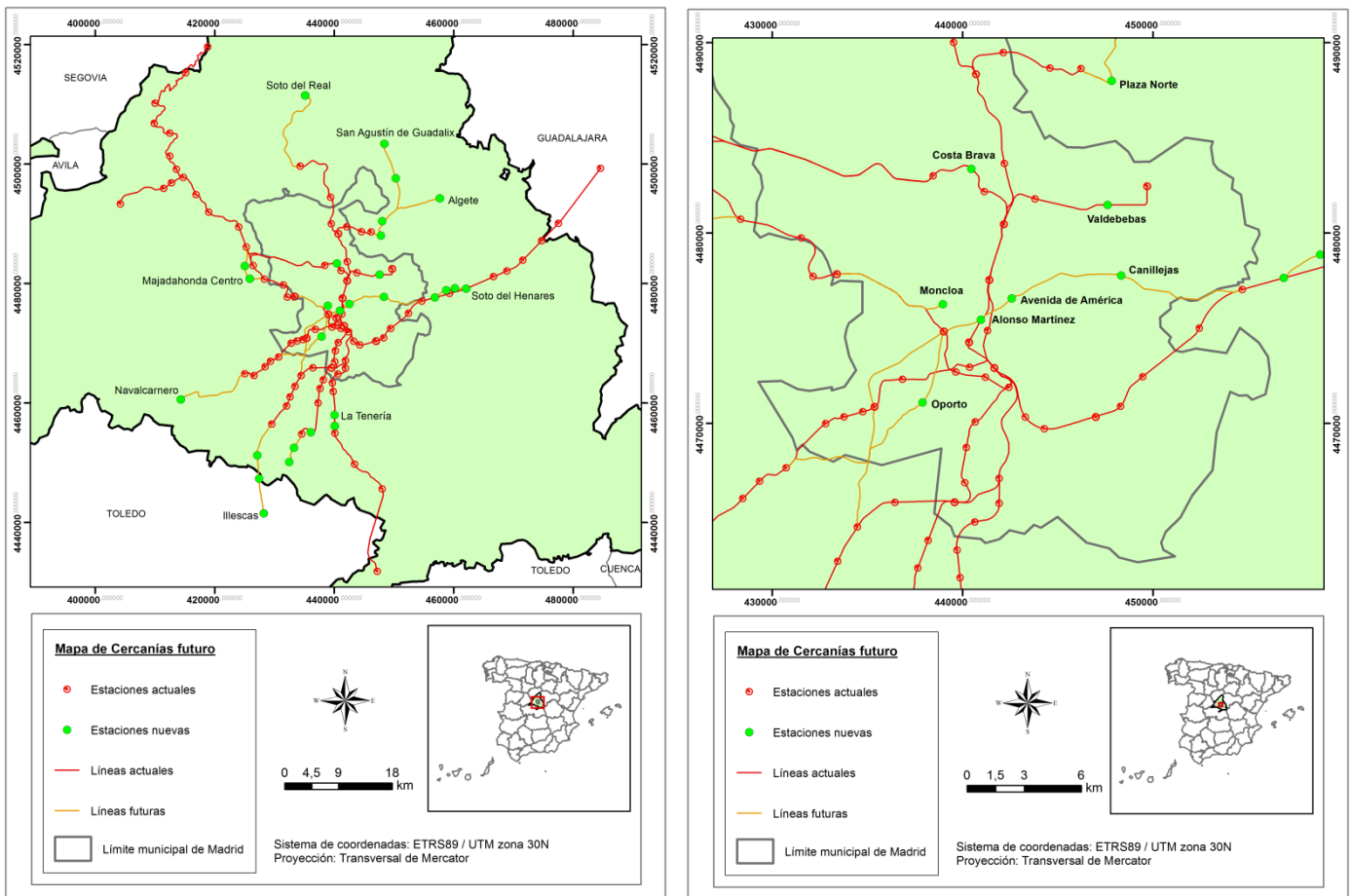


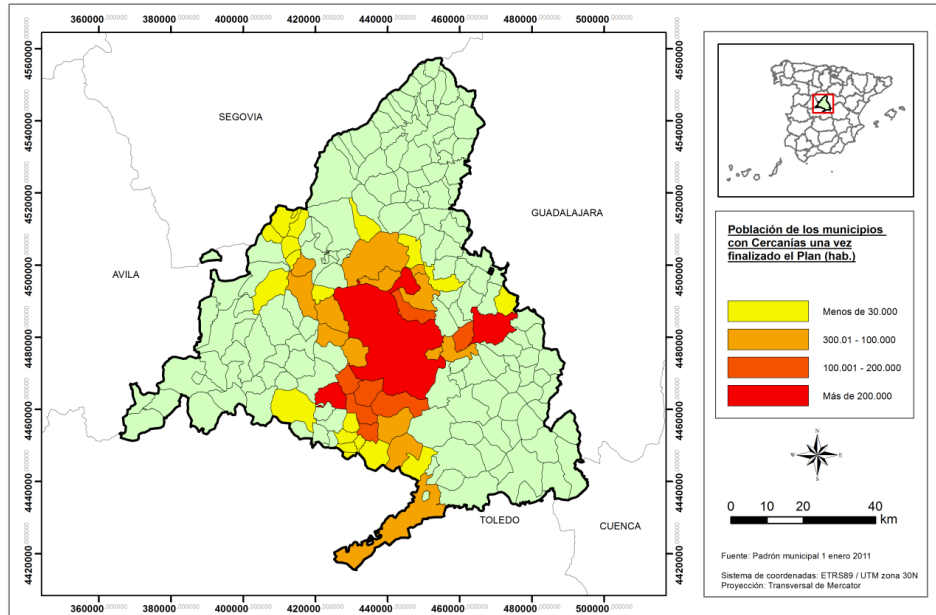
Figura 13. Trazado de la Línea C-5: Móstoles el Soto - Navalcarnero. Fuente: Plan de Infraestructuras Ferroviarias de Cercanías para Madrid (2009-2015). Elaboración propia



Figuras 14 y 15. Mapas de la totalidad de la red de Cercanías y de la misma en el municipio de Madrid en el futuro una vez terminado el Plan. Fuente: Plan de Infraestructuras Ferroviarias de Cercanías para Madrid (2009-2015). Elaboración propia

Una vez fijados los objetivos y las líneas de actuación, los resultados que se pretenden conseguir una vez finalizado el Plan y que más nos interesan para este proyecto son los siguientes:

- La extensión de la Red y la ampliación de la cobertura territorial. Quizás sea este el resultado más interesante, pues el número de municipios madrileños que se agregan a la lista de localidades con al menos una estación dentro de sus límites municipales son 9, siendo en total 41 municipios (*Figura 7*). Por lo tanto, la población cubierta se incrementa en más de 95.000 habitantes lo que supone un 89% de la población total de la Comunidad si tenemos en cuenta las cifras a fecha 1 de enero de 2011. Esto quiere decir que la población cubierta será aún mayor cuando finalice el Plan dado que los nuevos desarrollos urbanos estarán más avanzados.
- La reducción de los tiempos de viaje como consecuencia de la construcción del nuevo eje transversal que conectará la población de dos de los corredores más poblados del anillo metropolitano y reducirá la vulnerabilidad de la red.
- La construcción de al menos 25 nuevas estaciones, 20 sobre nuevas líneas y 5 sobre ya existentes. Todas ellas proveerán de acceso a la red de Cercanías no sólo a población que habita en el área metropolitana sino también a aquella que vive en zonas céntricas de la ciudad de Madrid.



**Figura 16.** Población de los municipios con Cercanías una vez finalizado el Plan (habitantes). Fuente: Padrón municipal a 1 de enero de 2011. Elaboración propia

Una vez introducido el tema, definido los objetivos y contextualizado el trabajo a realizar, el siguiente paso será precisar las fuentes de información empleadas así como concretar la metodología que se ha llevado a cabo para alcanzar unos resultados concluyentes.



### III. FUENTES Y METODOLOGÍA

#### III. 1. Datos de partida

En un análisis de este tipo es necesario contar con una red correctamente diseñada y perfectamente conectada para ejecutar complejos y extensos procesos de análisis sobre ella.

Para crear tanto la red del presente como la del futuro con todas las líneas prolongadas y las nuevas estaciones, nos hemos apoyado en la red inicial aportada por la Fundación de Ferrocarriles Españoles. También nos hemos servido tanto del pliego del Plan de Infraestructuras Ferroviarias de Cercanías para Madrid como de las ortofotos del PNOA Máxima Actualidad número 508, 532, 533, 534, 535, 536, 558, 559, 560, 581, 582 y 605. Todas ellas han sido obtenidas del centro de descargas que el Instituto Geográfico Nacional ofrece de manera gratuita a los usuarios para su uso no comercial. Además han sido necesarias las velocidades máximas por tramos extraídas de los Libres Horarios que ADIF establece anualmente.

Una vez diseñada la red en formato vectorial es necesario el empleo de otras capas y datos estadísticos que complementen la correcta explotación de dicha red. Estos son los siguientes:

- Capa vectorial del seccionado censal de la Comunidad de Madrid, obtenida del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid.
- Capa vectorial del callejero de la Comunidad con los ejes viales, extraída del Nomenclátor del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid.
- Población por secciones censales de la Comunidad de Madrid según el Censo de Población del año 2011 (6 de diciembre), Instituto Nacional de Estadística.
- Población por municipios de la Comunidad de Madrid según el mismo Censo de Población.
- Número de unidades locales por sección censal según el Directorio de Unidades de Actividad Económica (DUAE) del año 2009, Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid.

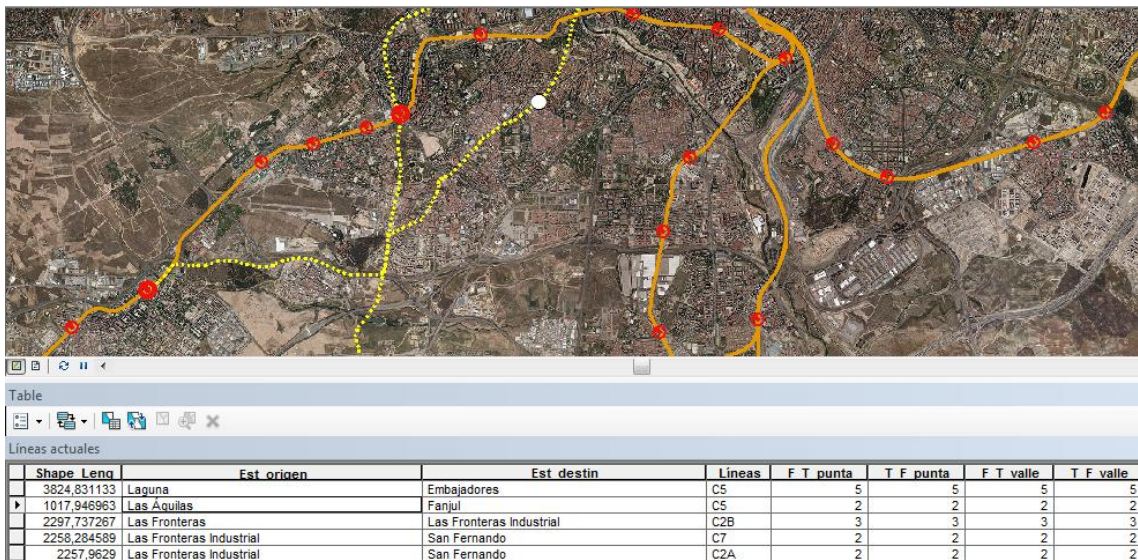
A partir de toda esta información podemos llevar a cabo una estudiada metodología a fin de obtener los cálculos propuestos en cada uno de los objetivos formulados. Esta metodología de análisis se desarrolla en una serie de operaciones que a continuación se detallan.

### III.2. Metodología de análisis

A la hora de realizar un trabajo de este tipo es fundamental mantener una metodología clara y estructurada de todo el proceso para llegar a los resultados deseados.

La primera tarea a realizar es diseñar una red bien conectada y cohesionada para llevar a cabo posteriormente un análisis consistente. Para ello, y sirviéndonos de la red aportada por la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, del citado Plan de Infraestructuras Ferroviarias y de las ortofotos anteriormente mencionadas, se han ubicado las estaciones tanto presentes como futuras en el lugar geográfico que corresponde. Dichas estaciones se han unido a través de arcos que serán los que posteriormente alojen el coste del desplazamiento (tiempo en minutos).

Como ya hemos mencionado y como se puede apreciar en todos los mapas anteriores, las estaciones han sido unidas por arcos de acuerdo a las líneas establecidas. Asimismo, la dirección de representación de los arcos (*from* → *to*; *to* → *from*) se ha tomado teniendo estrictamente en cuenta el orden que Renfe menciona a la hora de detallar las estaciones que componen cada línea (*Figura 17*). Esta dirección de representación se hace fundamental en una red de este tipo puesto que la duración del trayecto puede variar dependiendo del sentido del desplazamiento.

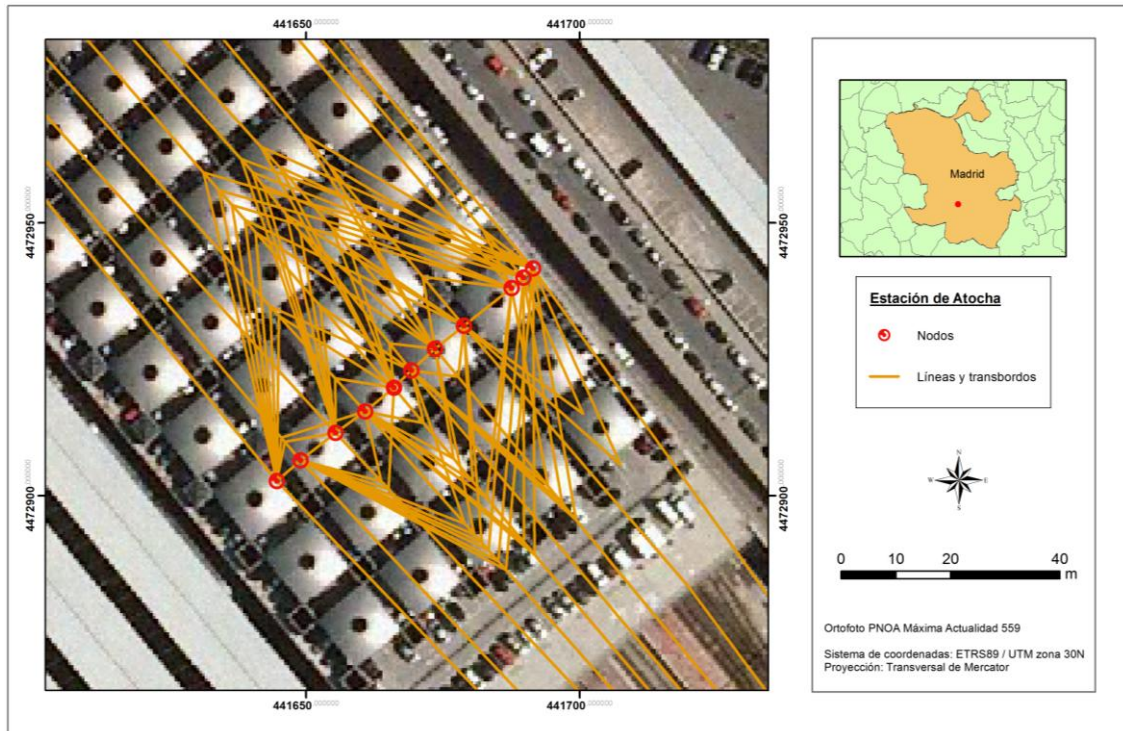


*Figura 17. Captura de pantalla del software ArcGIS 10.0 en la que se muestran tanto los arcos creados como su base de datos de atributos con los minutos en ambas direcciones en hora punta y en hora valle.*

*Elaboración propia*

Otro aspecto importante son los transbordos. Un viajero que se desplaza desde un origen puede necesitar tomar más de una línea pues carece de conexión directa con un destino concreto. Pero, ¿cómo simular esos transbordos en nuestra red? Se ha optado por establecer en cada estación tantos nodos como líneas pasen por ella. Es decir, si por Atocha discurren la totalidad de las líneas, esta estación contará con 10 nodos a los que

añadimos uno más por el carácter circular de la línea C-7 que atraviesa Atocha en dos ocasiones durante su recorrido (*Figura 18*). Todos estos nodos estarán unidos por arcos en una relación de todos con todos, siendo estos los que porten la impedancia del tiempo.



*Figura 18. Estación de Atocha con sus respectivas líneas y los arcos que simulan los transbordos.  
Elaboración propia*

Aunque tremendamente costosa debido a la cantidad de arcos nuevos que se producen, esta solución resulta la más adecuada debido también a que posteriormente se va a trabajar con una matriz que relaciona todos con todos para aplicar los indicadores de accesibilidad seleccionados.

Una vez diseñada la geometría, el siguiente paso resulta trascendental pues se trata de asignar la impedancia a cada arco. En este caso se ha considerado el tiempo en minutos como el coste que mide la resistencia al desplazamiento. Este coste se ha asignado a cada arco en función de la dirección del trazado de la línea y teniendo en cuenta dos horas: una caracterizada como hora punta (que podría ser alrededor de las 8:00 de la mañana) y otra como hora valle (alrededor de las 12:00). Asimismo, se ha contemplado igualmente el tipo de arco que es puesto que de ello dependerá la asignación de minutos, es decir, si es un arco que une dos estaciones actuales entre sí, si es un arco que une una estación nueva con una estación actual, si es un arco que une dos estaciones nuevas o si es un arco que une dos nodos de una misma estación, es decir, un arco que simula un transbordo. Veamos a continuación cada uno de estos casos:



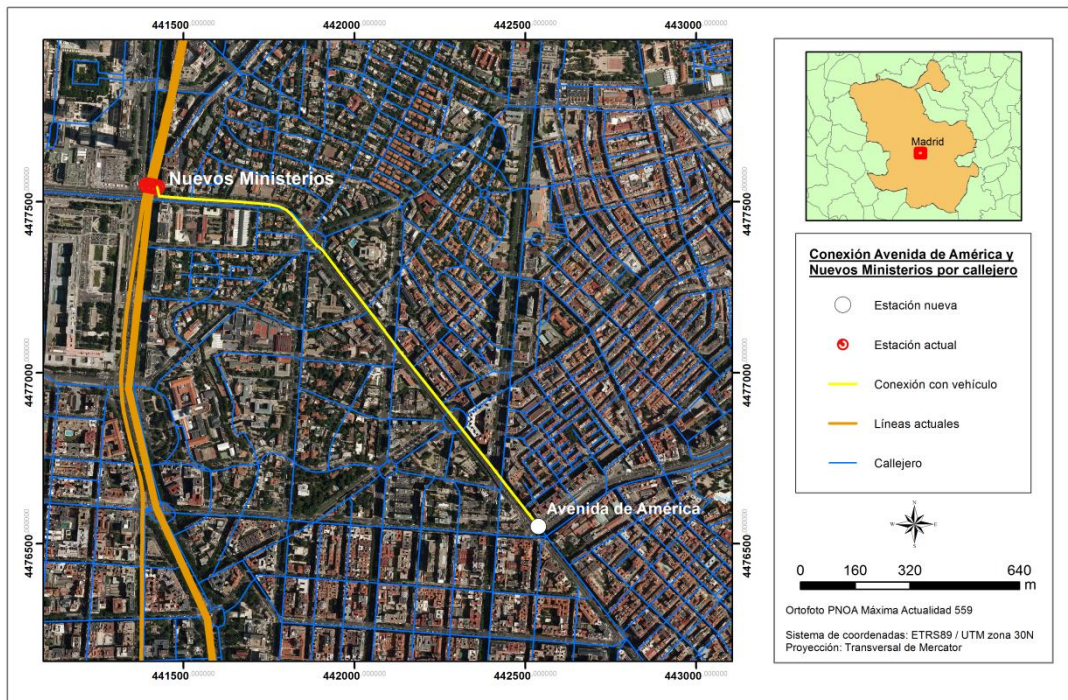
1. Arcos que unen dos estaciones actuales entre sí

Para asignar los minutos a este tipo de arcos, se ha recurrido a Renfe donde se han consultado cada uno de los tiempos entre dos estaciones contiguas. Lo más característico es que algunos tiempos de recorrido son diferentes según la dirección, como por ejemplo el tiempo de recorrido entre Pitis y Pinar de las Rozas en la línea C-8 es de 15 minutos mientras que en el sentido inverso por la misma línea es de 13 minutos. Así ocurre entre otras muchas estaciones, aunque las diferencias son casi imperceptibles pues son de apenas 1 o 2 minutos. Esto puede deberse al diferente desnivel de las vías o por el propio trazado de la misma en un sentido u otro. Igualmente se han detectado pequeñas diferencias de minutos entre líneas que hacen el mismo recorrido como por ejemplo el caso de la línea C-1 entre Chamartín y Fuente de la Mora que tarda 4 minutos mientras que el mismo trayecto en la línea C-10 dura 7 minutos. El motivo que justifica esto puede ser por el tipo de material (tipo de tren), pues unos permiten mayor velocidad que otros o mayor/menor grado de aceleración.

2. Arcos que unen una estación nueva con una estación actual

Dado que posteriormente se va a trabajar con dos matrices de coste (una presente y otra futura) para medir la accesibilidad en los dos momentos temporales, es importante contar con las nuevas estaciones en las dos redes para que estas puedan ser comparadas.

Por un lado, en la red presente se ha decidido unir cada estación nueva con la estación actual más cercana a través de la red del callejero de la Comunidad de Madrid (que contiene también las velocidades máximas permitidas en cada arco). Con ello se simula el desplazamiento en vehículo privado a la estación actual más próxima y se obtiene un camino mínimo con la suma de los minutos de cada uno de los arcos que utiliza para llegar al destino; minutos que previamente se han obtenido al multiplicar la distancia de cada arco en km por su respectiva velocidad (en km/h). Posteriormente, a cada camino se ha añadido una penalización media de 10 minutos que representa tanto el tiempo de aparcamiento como el tiempo de detención en caso de atasco. Así pues, se pone como ejemplo la estación de Avenida de América que se une a la estación de Nuevos Ministerios en la red actual por ser ésta la estación más cercana a ella por la red viaria (*Figura 19*).



**Figura 19.** Conexión por el callejero entre Avenida de América y Nuevos Ministerios. *Elaboración propia*

Por otro lado, en la red futura las nuevas estaciones son empalmadas a las actuales por medio de los arcos futuros proyectados. El problema es que no se puede saber exactamente la duración del recorrido. Dado que contamos con la distancia en km de cada arco, se ha estimado su velocidad realizando una correspondencia con tramos ya presentes en la red actual. Por ejemplo, entre la estación de Parla y Parla Hospital el tramo es mayoritariamente subterráneo por lo que se ha tomado como muestra el tramo construido entre Atocha y Sol (con una velocidad máxima de 80 km/h) por ser el subterráneo más moderno y el de cualidades similares a los que se construirán en un futuro. Otro ejemplo es el tramo entre Humanes y Griñón cuya velocidad máxima se ha estimado en 100 km/h, similar a los últimos tramos actuales de la línea C-5 por ser totalmente en superficie y por su trazado parecido. Si la estación nueva se encuentra entre dos actuales (como es el caso de la estación Costa Brava o La Tenería), se divide por la mitad el tiempo de recorrido entre ellas y se añade 1 minuto a cada tramo (puesto que dicho tramo queda fraccionado en dos al ubicarse la nueva estación) que representa el tiempo de desaceleración y el tiempo de parada del tren en la nueva estación.

### 3. Arcos que une dos estaciones nuevas

La metodología empleada para estimar la duración de estos trayectos es la misma explicada unas líneas más arriba. Ejemplo de ello son las variantes de Torrejón y de Majadahonda-Las Rozas que toman como arco con velocidad similar el que se encuentra entre Atocha y Sol.



#### 4. Arcos que unen nodos de una misma estación, es decir, que simulan transbordos

Para asignar los minutos a este tipo de arcos se ha consultado la frecuencia en día laborable de las líneas tanto en hora punta como en hora valle (*Tabla 3*). De este modo se ha dividido dicha frecuencia por la mitad, lo que simula el tiempo medio de espera de un viajero que hace un transbordo en una estación determinada para llegar a su destino con el cual no tiene conexión directa. De este modo, al hacer la matriz de coste los tiempos se acumulan si se hace un cambio de línea.

| Línea                                      | Frecuencia de los trenes (minutos) |            |
|--|------------------------------------|------------|
|  | Hora punta                         | Hora valle |
| C-1: Príncipe Pío - Aeropuerto T4          | 15                                 | 15         |
| C-2: Guadalajara - Chamartín               | 6                                  | 10         |
| C-3: Aranjuez - El Escorial                | 7                                  | 15         |
| C-4: Parla - Alcobendas/S.S. de los Reyes  | 6                                  | 10         |
| C-4: Parla - Colmenar Viejo                | 6                                  | 10         |
| C-5: Móstoles el Soto - Humanes            | 2                                  | 5          |
| C-7: Alcalá de Henares - Fuente de la Mora | 6                                  | 15         |
| C-8: Atocha - El Escorial                  | 15                                 | 15         |
| C-8: Atocha - Cercedilla                   | 15                                 | 30         |
| C-9: Cercedilla - Cotos*                   | 15                                 | 15         |
| C-10: Villalba - Fuente de la Mora         | 7                                  | 15         |

**Tabla 3.** Mitad de las frecuencias de cada línea en día laborable. Fuente: RENFE. Elaboración propia

Como se aprecia en esta tabla, la línea que posee la mayor frecuencia de paso es la línea C-5 pues es la que a su vez posee un mayor volumen de pasajeros diarios. En el extremo opuesto estaría la línea C-9 que tan sólo posee 4 trenes diarios en ambos sentidos, pero se ha determinado establecer los 15 minutos de espera en primer lugar porque los usuarios que la utilizan conocen a la perfección los horarios de paso y no suelen esperar más de ese tiempo y, en segundo lugar, para no desvirtuar los resultados.

Una vez ajustados los tiempos en cada uno de los arcos se procede a construir las dos redes (la presente y la futura) tomando el tiempo en minutos como valor de impedancia. Construidas las redes, ya podemos realizar las dos matrices de coste (presente y futura) a través del módulo de redes que ArcGIS 10.0 nos ofrece. El resultado son dos tablas con 52.441 y 56.276 filas respectivamente, que aluden a la suma total de todas las combinaciones posibles entre todos los nodos presentes. Dado que el número de combinaciones entre una estación y otra depende del número de nodos que cada una comprende (por ejemplo la relación entre Parla y Atocha nos ofrece hasta 22 combinaciones posibles pues Parla posee 2 nodos en su estación y Atocha 11) es necesario efectuar una simplificación sobre cada una de las matrices, de forma que la



relación entre una estación y otra quede reducida a una sola combinación que comprenda el número mínimo de minutos de recorrido tanto en hora punta como en hora valle.

Como ya disponemos de cada una de las matrices simplificadas, el siguiente paso es aplicar sobre las mismas las fórmulas de dos de los indicadores de accesibilidad que hemos decidido aplicar en este trabajo y que son las siguientes:

$$1. \text{ Media ponderada de los costes de transporte: } L_i = \frac{\sum_{j=1}^n C_{ij} M_j}{\sum_{j=1}^n M_j}$$

$$2. \text{ Potencial económico: } P_i = \sum_{j=1}^n \frac{M_j}{C_{ij}^\alpha}$$

donde:

$L_i$  es la localización del nodo  $i$  con respecto a los centros económicos considerados.

$C_{ij}$  es el coste a través de la red entre los nodos  $i$  y  $j$  y (puede ser tiempo, distancia o coste económico).

$M_j$  es la masa (población, empleo, renta...) del centro económico en destino.

$\alpha$  es el valor del exponente, que en este caso se ha utilizado un exponente de 2, ya que un valor relativamente elevado da considerablemente más peso a las relaciones sobre distancias cortas las cuales tienen una gran importancia en los espacios metropolitanos como es este que nos concierne.

Mientras que el primer indicador calcula la accesibilidad de un nodo a través de la media ponderada del coste de transporte entre ese nodo y todos los nodos de la red (en minutos), el segundo mide la accesibilidad de un nodo dado en una red de forma proporcional a la interacción espacial entre ese nodo y los demás nodos de la red.

Una primera característica del primer indicador es que los pesos en cada una de las relaciones no varían con el coste de transporte, no considera el *distance decay* (caída



de las interacciones espaciales con la distancia). En el *potencial económico*, el grado de oportunidades entre dos áreas está positivamente relacionado con la capacidad de atracción de las áreas y negativamente relacionado con la impedancia entre las áreas (Linneker y Spence, 1992).

Tal y como podemos observar en ambas fórmulas, es fundamental contar con la masa del centro económico en destino, ya sea población, empleo o cualquier otro indicador que nos permita calcular los índices de accesibilidad propuestos.

Una de las grandes ventajas que nos ofrecen los Sistemas de Información Geográfica es el cálculo de áreas de cobertura o servicio desde un nodo determinado. Esta será la forma en la que se calcule tanto la población como el empleo (en unidades locales) cubierto en un radio de distancia desde cada estación, puesto que son estas variables las que han sido consideradas en este estudio. Debido a que en nuestras redes cada estación posee tantos nodos como líneas que pasan por ella, es necesario llevar a cabo una simplificación de dichos nodos para que finalmente cada estación quede reducida a uno solo. A partir de aquí, es posible el cálculo del área de cobertura de cada estación mediante dos formas diferentes: distancia en línea recta y distancia por la red.

El área de cobertura con distancia en línea recta se determina empleando un *buffer* desde cada nodo (con una distancia determinada) intersecado con el área de influencia o *Polígono de Thiessen* de cada uno de ellos (*Figura 20*). La distancia fijada para el cálculo del área de cobertura ha sido 900 metros. Se ha estudiado en numerosos trabajos que la accesibilidad peatonal a las redes de transporte público (en nuestro caso, la red de Cercanías) se convierte en el factor determinante a la hora de elegir el medio de transporte a utilizar para desplazarse. Algunos autores han trabajado mucho en el umbral máximo de distancia entre la vivienda y la estación más próxima (Hsiao et al., 1997; Murray, 2001; Zhao et al., 2003) y la mayoría fija esta distancia en los 400 metros, aunque ésta varía dependiendo de la zona y del medio de transporte utilizado.

El motivo que justifica la elección del umbral de 900 metros en este trabajo reside en el tiempo que tarda en recorrerse. Se considera que una persona de mediana edad camina a 4,5 km/hora, por lo que tarda aproximadamente 15 minutos en recorrer esta distancia. A partir de ella el peatón puede establecer una barrera psicológica, por lo que posiblemente tomará un medio de transporte para llegar a la estación más próxima en lugar de ir caminando.

Por otro lado, el área de cobertura teniendo en cuenta la distancia por la red resulta un método mucho más aproximado a la realidad, pues los peatones utilizan la estructura de la red viaria para acceder a las estaciones no pudiéndose desplazar en línea recta (García et al., 2008). Para ello se toma la red del callejero de la Comunidad y se establece la misma distancia que en el anterior método con objeto de ser comparados (*Figura 21*).

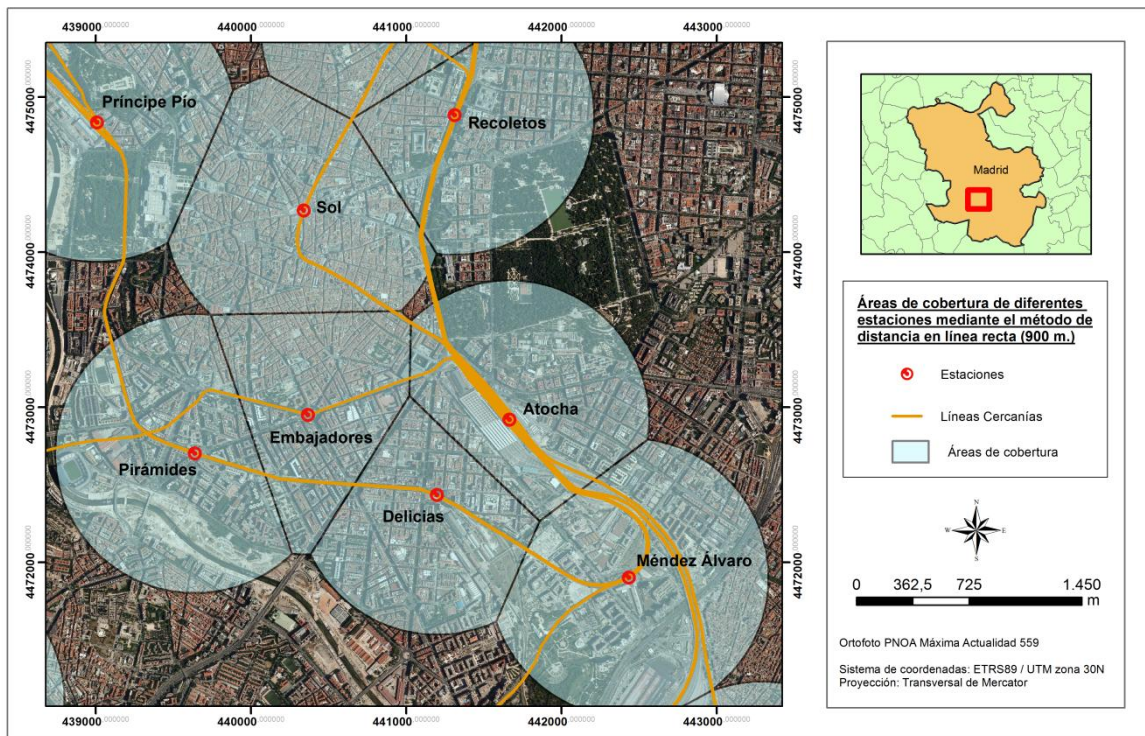


Figura 20. Áreas de cobertura de diferentes estaciones mediante el método de distancia en línea recta (900 metros). Elaboración propia

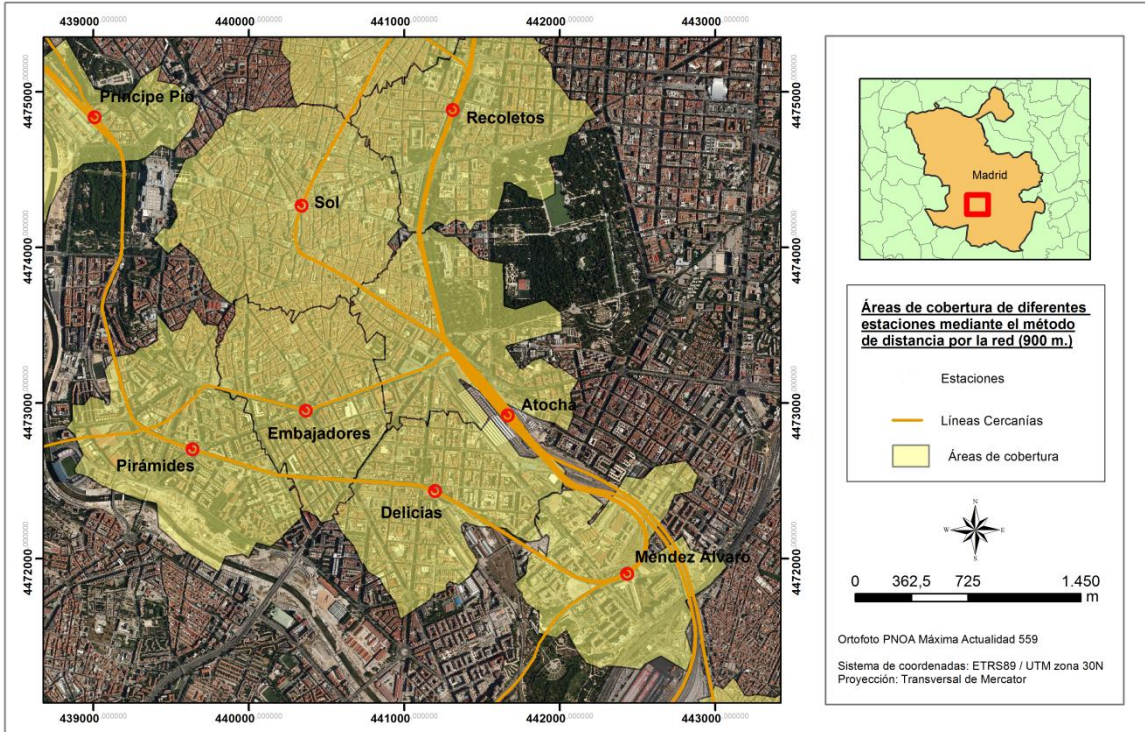


Figura 21. Áreas de cobertura de diferentes estaciones mediante el método de distancia por la red (900 metros). Elaboración propia



Ambos métodos de cálculo han sido considerados, y aunque la distancia por la red se perfila como el método más adecuado para la mayoría de los estudios por las razones expuestas se ha decidido tener tan sólo en cuenta el método de la distancia en línea recta en la aplicación de los indicadores de accesibilidad. El motivo que justifica esta decisión es que tras testar ambos métodos, se llega a la conclusión de que la red de Callejero utilizada para este trabajo resulta incompleta sobre todo en aquellos espacios que en el futuro crecerán como nuevos desarrollos urbanos con un viario perfectamente estructurado que no figura en la red de callejero actual.

Finalmente, para averiguar la cantidad de población y empleo (variables estadísticas previamente incorporadas a la capa que contiene las secciones censales) que queda dentro de cada área de cobertura, se intersecan ambas capas y se utiliza el método de la ponderación areal o *areal weighting*. Este método consiste en que cuando una sección censal queda completamente dentro del área cobertura, se asigna su total población y empleo a dicha área, pero cuando una sección queda fragmentada por el límite del área de cobertura se asigna su población y empleo de manera proporcional a la superficie de la sección que quede dentro de ella.

Otro método para calcular la población y el empleo que cubre una determinada estación, se fundamenta en transformar cada polígono de las secciones censales en un punto (localizado en su centroide). Esta capa de puntos resultante se superpone nuevamente a la de las áreas de influencia basadas en la distancia en línea recta (creada anteriormente) y mediante un resumen se puede obtener la cantidad de población y empleo que existe en el radio de distancia fijado (900 metros) (*Figura 22*). Este método tan sólo se tendrá en cuenta para calcular la población y empleo totales cubiertos tanto en el presente como en el futuro, pero no se va a emplear como “masa del centro económico de destino” en los indicadores de accesibilidad.

Una vez que se poseen el coste o impedancia (el tiempo en minutos en este caso) y la masa (población y empleo), se pueden aplicar sobre cada una de las tablas de las matrices las fórmulas anteriormente expuestas. Mediante una serie de operaciones matemáticas entre tablas, se obtiene finalmente un valor de accesibilidad para cada una de las estaciones referente a cada uno de los indicadores mediante el método de distancia en línea recta. Este valor variará en hora punta y en hora valle y dependiendo de si se ha empleado como masa ponderada la población o el empleo. Además todo ello será comparado entre presente y futuro, calculando las diferencias tanto en valores absolutos como en valores relativos (%).

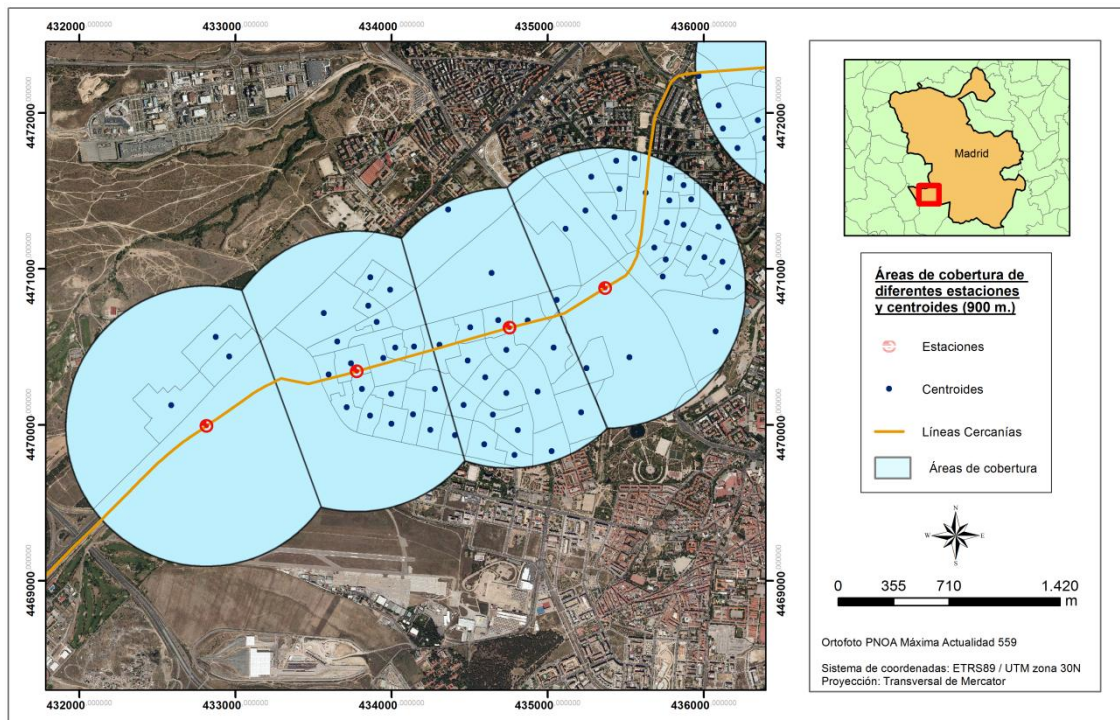


Figura 22. Centroides de las secciones censales que quedan dentro de las áreas de cobertura de diferentes estaciones (900 metros). Elaboración propia

Asimismo, para conseguir una representación geográfica de los resultados y lograr una mejor interpretación se extrapola esta información numérica de las estaciones al territorio municipal de las localidades con al menos una estación dentro de sus límites. Para ello se utiliza el método de interpolación basado en la media ponderada por el inverso de la distancia o *Inverse Distance Weighted (IDW)*. Este método parte de la asunción de que las cosas que están más cercanas en el espacio son más parecidas que aquellas que están lejos. Por lo tanto, este método da mayor peso a aquellos puntos muestra más cercanos y este peso va disminuyendo a medida que nos vamos alejando de ellos. El resultado es una superficie raster en la que cada celdilla posee un valor, en nuestro caso de accesibilidad. De esta forma se consiguen mapas muy representativos que ayudan a clarificar la información contenida en las extensas tablas.

El tercer índice propuesto en este estudio es el de *oportunidades de acceso*, el cual permite calcular el número de oportunidades disponibles desde un determinado nodo dentro de un intervalo de coste de transporte establecido a partir de dicho nodo. En este caso se ha optado por calcular tanto la población como el empleo en intervalos de 10 minutos desde y hacia las cuatro estaciones que aglutinaron mayor tráfico de viajeros en el año 2011, que fueron Atocha, Nuevos Ministerios, Chamartín y Sol. Este cálculo se efectúa tanto para la red con las estaciones actuales como para la red futura con objeto de equiparar los datos resultantes.



Igualmente se pretende estimar la distancia media hacia cada estación, pues como han confirmado numerosos teóricos la probabilidad de uso del transporte público está estrechamente relacionada con la distancia a la estación o parada más cercana. Para ello se han considerado los centroides de cada una de las secciones censales (anteriormente obtenidos) como los puntos de origen y la distancia en línea recta el recorrido hacia la estación o punto de destino. Se tiene tan sólo en cuenta la distancia formulada desde todos los centroides de cualquier sección censal de la Comunidad a la estación más próxima. Sus diferencias entre el presente y el futuro pondrán de manifiesto las mejoras que se producirán una vez finalizado el Plan.

Por último, se evalúa el tiempo medio desde cada estación al resto tanto en hora punta como en hora valle para el presente y para el futuro. Esto nos permitirá conectar con el grado de vulnerabilidad de la red pues el tiempo medio de recorrido se vería fuertemente aumentado en caso de bloquear ciertas estaciones o tramos, lo cual también se trata en el presente trabajo.

Una vez detallado el extenso y complejo proceso metodológico que se ha puesto en marcha, se procede a evaluar los resultados obtenidos.



## IV. RESULTADOS

Los resultados que a continuación se exponen son fruto de una exhaustiva preparación del material con que se parte así como de una estudiada metodología de análisis que se acaba de detallar.

### IV.1. Cobertura general de la red

Si tenemos en cuenta los datos de población y empleo (en unidades locales) del año 2011 de la Comunidad de Madrid, podemos calcular la cantidad total de ambas variables que queda a menos de 900 metros de cada estación tanto en el presente como en el futuro utilizando el método de la distancia en línea recta y el que emplea la distancia por la red del callejero. Los resultados futuros son orientativos ya que previsiblemente serán mayores que los expresados en la *Tabla 4*, debido a los nuevos desarrollos urbanos que se localizarán en las cercanías de algunas de las nuevas estaciones.

| Variables                 | Distancia en línea recta |           | Distancia por la red |           |
|---------------------------|--------------------------|-----------|----------------------|-----------|
|                           | Presente                 | Futuro    | Presente             | Futuro    |
| Población                 | 1.933.458                | 2.415.077 | 1.260.277            | 1.608.457 |
| Empleo (unidades locales) | 77.275                   | 107.836   | 53.565               | 77.605    |

**Tabla 4.** Población y empleo totales a menos de 900 metros de las estaciones actuales y futuras según los métodos de distancia en línea recta y distancia por la red. *Elaboración propia*

Como se aprecia en la tabla, según ambos métodos la cantidad de población y empleo creciente entre la actualidad y el futuro es significativa. Mientras que la población crece alrededor de un 25%, el empleo todavía más situando su incremento en torno al 40-45%. Esto puede poner de manifiesto la ubicación de determinadas estaciones nuevas en lugares con un gran número de empleos y empresas en sus inmediaciones.

Además, mientras que la población y el empleo representan un 30% del total de toda la Comunidad según el método de distancia en línea recta, este porcentaje aumenta si nos vamos al futuro donde supone en ambos casos casi un 40% del total. En cambio si tenemos en cuenta el otro método, la población y el empleo significan un 20% del total de sus respectivas variables mientras que en el futuro son de entre un 25 y un 30%.

La comparación de los resultados tras la aplicación de ambos métodos, pone de manifiesto la desconfianza del segundo (distancia por la red) ya que sus valores parecen excesivamente bajos y por lo tanto no muy fiables. Es por ello que en este trabajo se emplea únicamente el método de la distancia en línea recta en los indicadores de accesibilidad seleccionados.



Dado que la población y el empleo están estrechamente relacionados con la demanda potencial de viajeros se estima un aumento considerable del tráfico actual y, por lo tanto, un incremento de los beneficios que permitirán amortizar las obras realizadas durante este Plan.

## I.V.2. Indicadores de accesibilidad

### IV.2.1. Media ponderada de los costes de transporte

Este primer indicador de accesibilidad que tiene en cuenta tanto el coste de recorrer la distancia entre dos puntos como la masa del centro económico en el destino, da como resultado unos valores bajos (en minutos) allí donde la accesibilidad es mayor y valores más altos cuanto peor sea el grado de accesibilidad.

Para transformar los valores de accesibilidad a un mapa se ha utilizado el método de interpolación *IDW* con un tamaño de celdilla de 100 metros. Dicho esto, después de transferir los valores de accesibilidad de la *media ponderada de los costes de transporte* a los mapas podemos destacar algunos aspectos.

En primer lugar, resultan evidentes dos aspectos tanto si tenemos en cuenta la población (*Figura 23*) como el empleo (*Figura 24*) en hora punta y en hora valle: por un lado, la mayor accesibilidad se concentra en el municipio de Madrid pues en él se ubican estaciones como Atocha, Nuevos Ministerios o Chamartín por las que discurren la práctica totalidad de las líneas y que también concentran una gran cantidad de viajeros por la población y empleo que existe en sus inmediaciones; por el otro lado, se manifiesta un aumento de la accesibilidad entre el presente y el futuro en la mayoría de las estaciones que completan la red de Cercanías.

Así si atendemos a la población, la práctica totalidad de las estaciones que se ubican dentro del municipio de Madrid se encuentran dentro del primer intervalo fijado (menos de 40) en el futuro. Destacan por el notable incremento de sus valores, estaciones como Valdebebas (aumento de 18 puntos), Oporto (13 puntos) o Moncloa (8 puntos). Por el contrario, estaciones como Avenida de América reduce su accesibilidad puesto que en el presente se comunica por vehículo privado con Nuevos Ministerios (estación por la que discurren casi todas las líneas actuales) y en el futuro aunque conectada con el eje transversal necesita de transbordos para comunicarse con el resto de las líneas.

Por otro lado, si nos referimos al empleo como variable utilizada como masa del destino (*Figura 24*), la tendencia es similar aunque la mancha que representa el primer intervalo de valores (menos de 40) se extiende algo más por el territorio debido a la mayor descentralización de esta variable en el espacio. La mayor parte de las estaciones

que se construirán en el futuro incrementan su accesibilidad de manera notable, salvo excepciones como Avenida de América por las razones anteriormente explicadas.

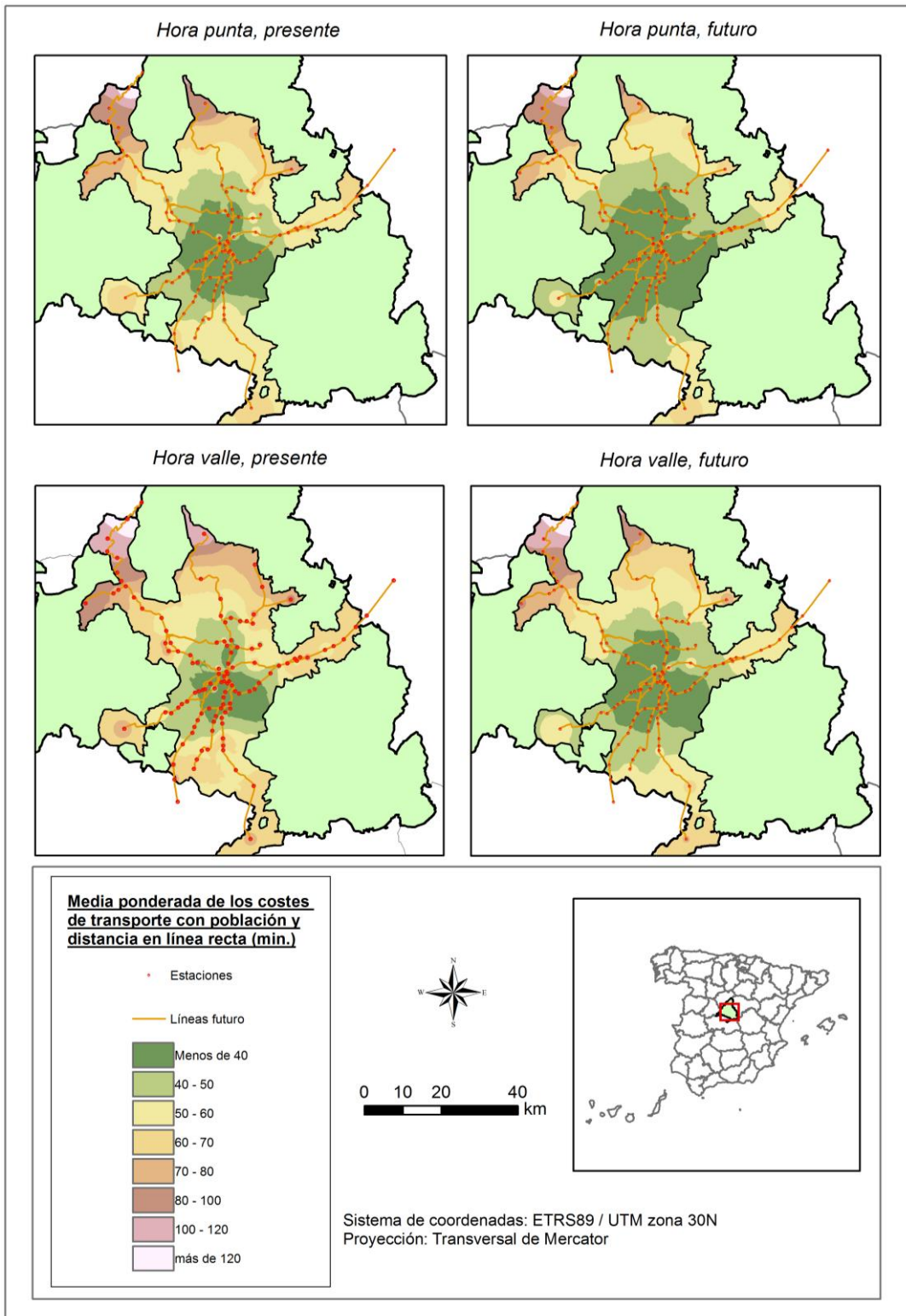
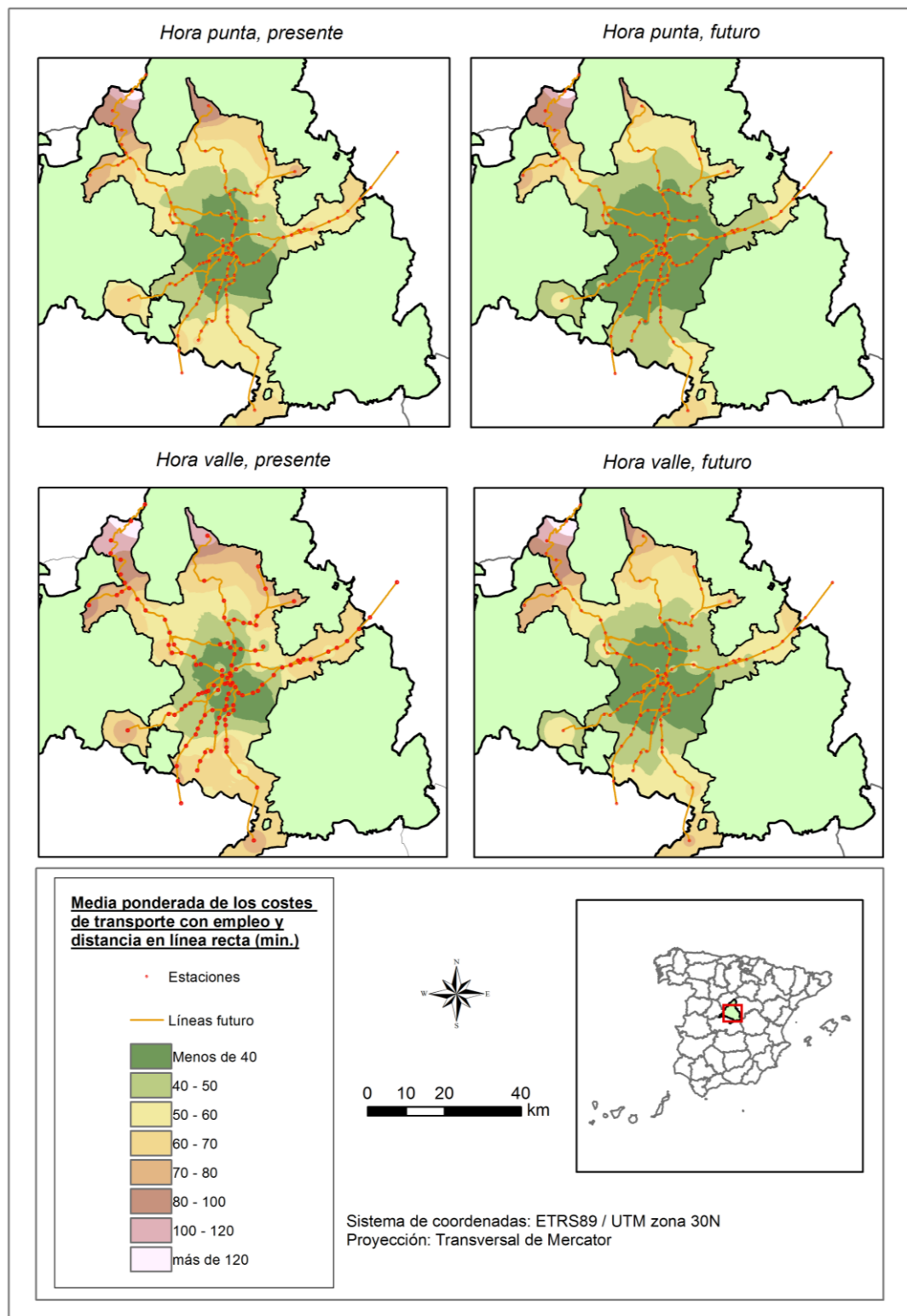


Figura 23. Media ponderada de los costes de transporte teniendo en cuenta la población y el método de distancia en línea recta (minutos). Elaboración propia



**Figura 24.** Media ponderada de los costes de transporte teniendo en cuenta el empleo (unidades locales) y el método de distancia en línea recta (minutos). *Elaboración propia*

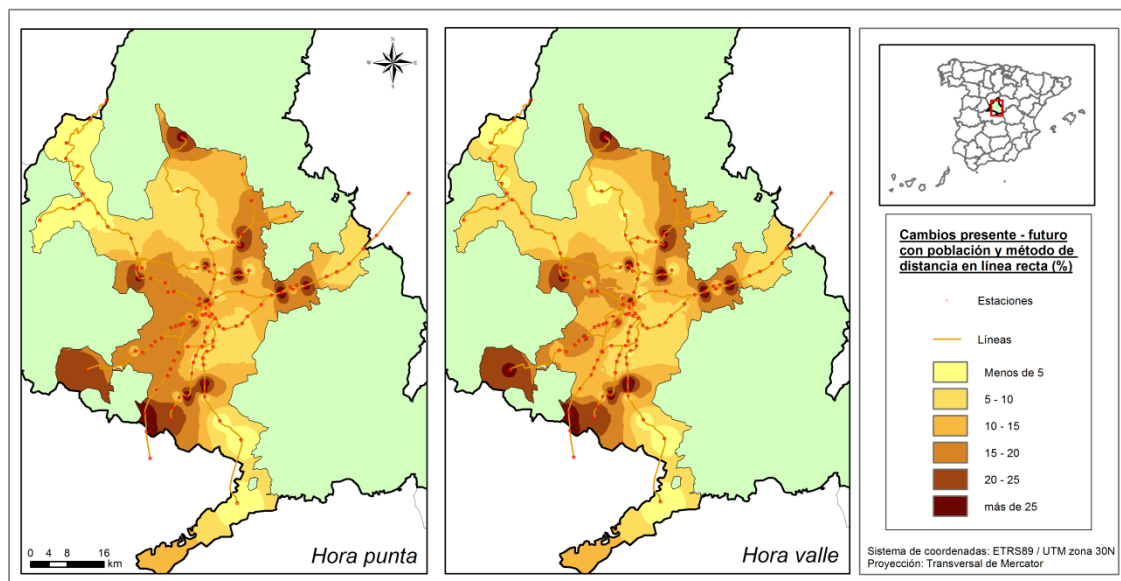
Asimismo, lo más efectivo para determinar donde se concentran las principales diferencias de accesibilidad entre presente y futuro son los mapas que muestran el porcentaje de cambio.

De esta manera se adivina que logicamente, los cambios más importantes de accesibilidad se producen allí donde en el futuro se situarán nuevas estaciones.

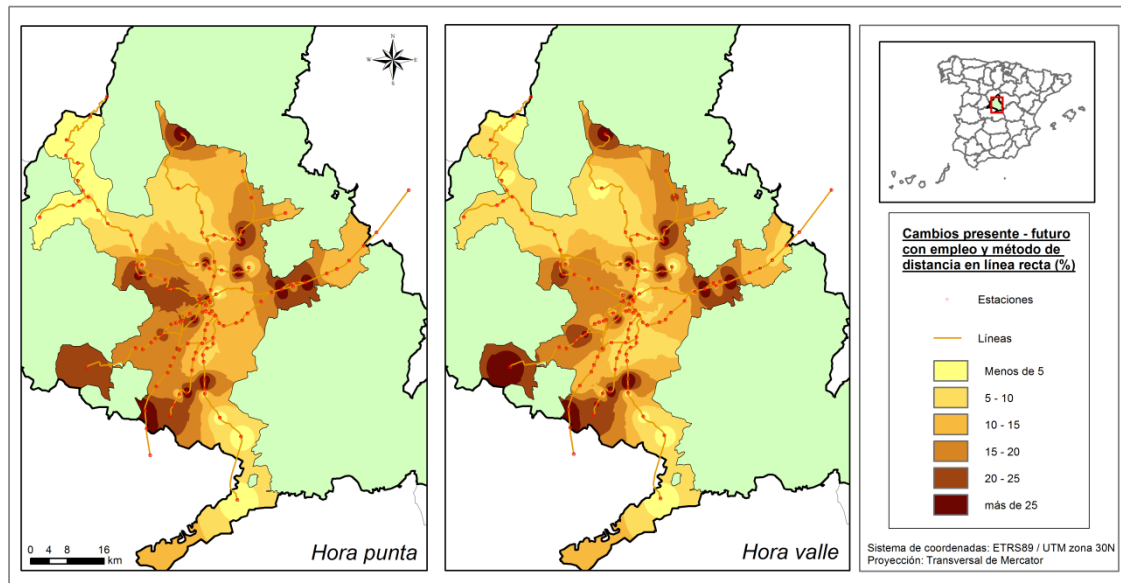
Si tenemos en cuenta la población (*Figura 25*), se observan aumentos de casi un 40% en estaciones como Soto del Real, las estaciones de las variantes de Las Rozas-Majadahonda y de Torrejón de Ardoz, Navalcarnero, Griñón, Parla Norte o la Tenería. Dentro de la capital, el incremento más importante es el que tiene lugar en la estación de Alonso Martínez que posee el máximo de porcentaje de cambio entre ambos momentos temporales (42%). También podemos destacar los valores de Costa Brava (33%), Valdebebas (32%) u Oporto (28%).

En cuanto al empleo (*Figura 26*), los incrementos en la hora valle son algo mayores en comparación con los de la hora punta situándose en las mismas estaciones arriba descritas.

En el extremo opuesto, se pueden encontrar estaciones con incrementos cercanos a 0, es decir, que apenas se modifica su índice de accesibilidad como Parla Centro, Pinto, Pitis o Aeropuerto T4. Todas ellas situadas en líneas donde se construirán nuevas estaciones entre estas y las que existen en el centro de la red incrementando el tiempo de recorrido y, por tanto, empeorando su accesibilidad. Todo ello pone de manifiesto la necesidad en el futuro del aumento del tráfico de trenes que circulen por las líneas donde se encuentren estas estaciones.



*Figura 25. Cambios entre presente y futuro de la Media ponderada de los costes de transporte (minutos) teniendo en cuenta la población y el método de distancia en línea recta (%). Elaboración propia*



**Figura 26.** Cambios entre presente y futuro de la Media ponderada de los costes de transporte (minutos) teniendo en cuenta el empleo (unidades locales) y el método de distancia en línea recta (%). Elaboración propia

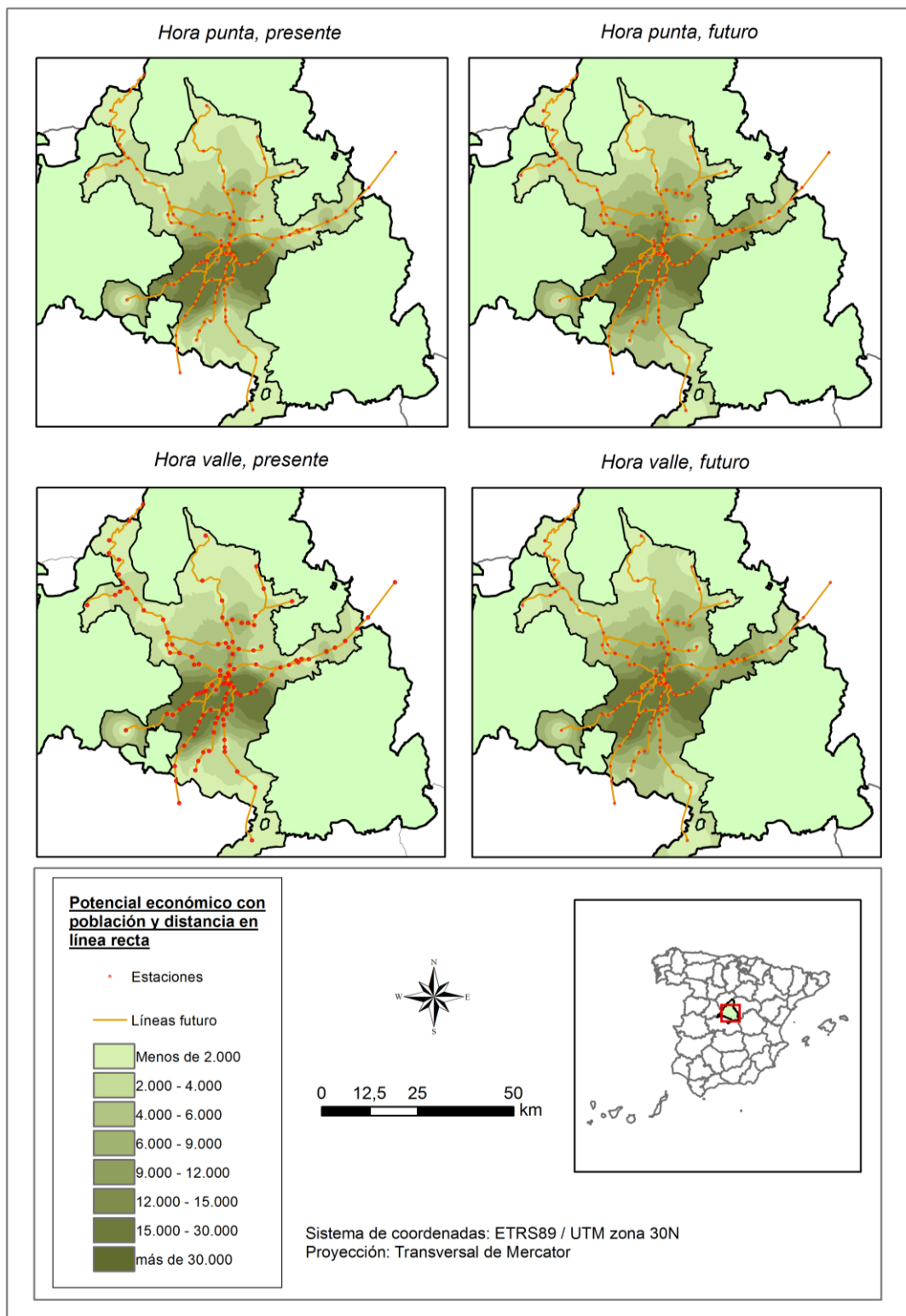
#### IV.2.2. Potencial económico

Este indicador es ampliamente utilizado en estudios de accesibilidad (Harris, 1954; Keeble et al., 1988; Linneker and Spence, 1992, Smith and Gibb, 1993; Spence and Linneker, 1994). Acorde a este modelo, el nivel de accesibilidad entre un origen  $i$  y un destino  $j$  está positivamente relacionado con la masa del destino e inversamente proporcional a la distancia entre ambos nodos (Gutiérrez, 2001).

Por lo tanto, este índice da valores más elevados allí donde existe un alto nivel de accesibilidad y valores más bajos donde la masa del destino no es relevante y la distancia entre estaciones es mayor, siendo así su nivel de accesibilidad peor.

Si tenemos en cuenta la población como variable que define la masa del destino (Figura 27), tanto en hora punta como en hora valle podemos observar un incremento generalizado en los valores de accesibilidad en la parte central de la red entre el presente y el futuro. Asimismo, la mancha que contiene los valores más altos, a diferencia del indicador anterior, se extiende hacia al suroeste de la Comunidad debido a la existencia de municipios altamente poblados como Alcorcón, Leganés o Fuenlabrada y debido también a que la distancia entre estaciones es menor que en otros puntos de la red.

Por otro lado, la accesibilidad se va reduciendo a medida que nos separamos del centro y a medida que las estaciones están más alejadas entre sí en cuanto a distancia espacial se refiere.



**Figura 27.** Potencial económico teniendo en cuenta la población y el método de distancia en línea recta.  
*Elaboración propia*

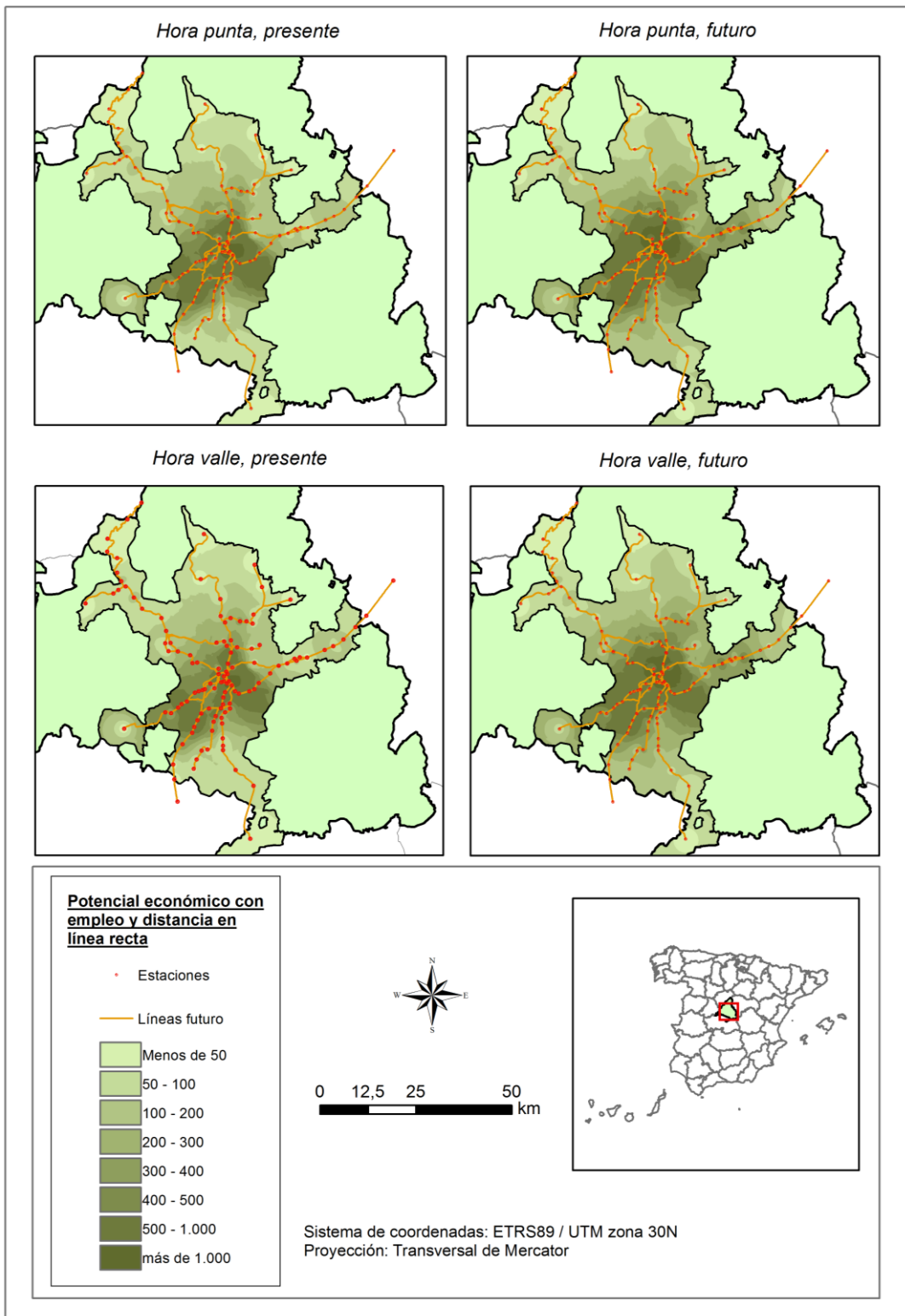
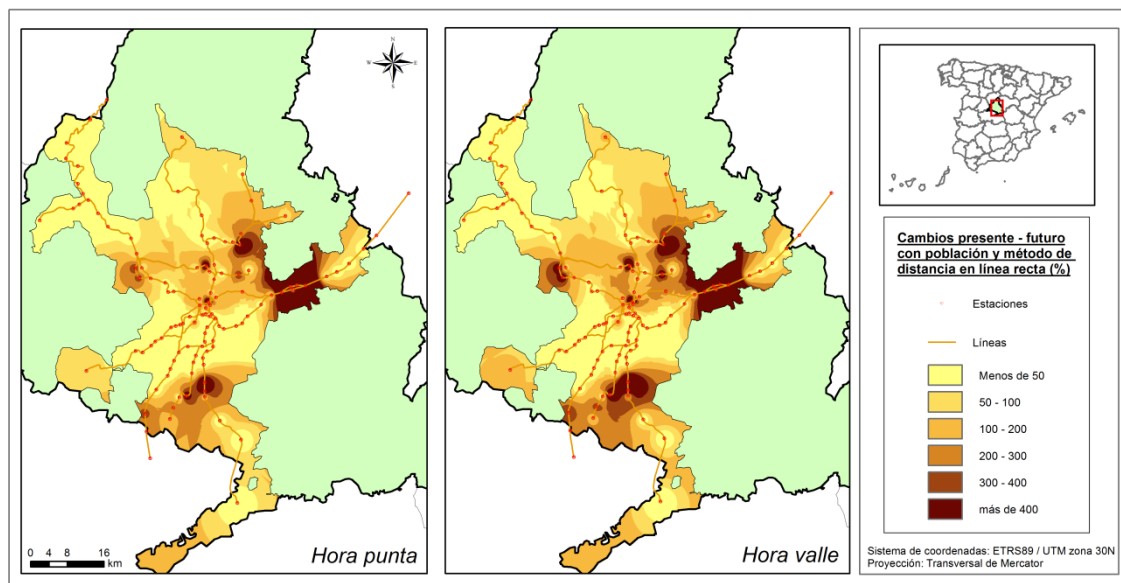


Figura 28. Potencial económico teniendo en cuenta el empleo (unidades locales) y el método de distancia en línea recta. Elaboración propia

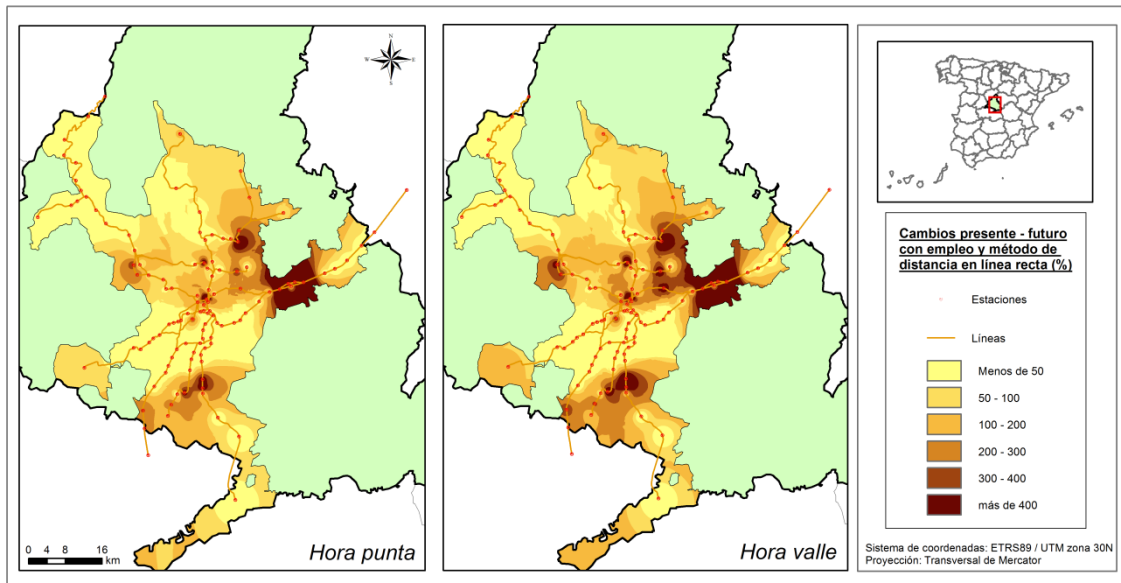
Si tomamos como referencia el empleo como variable que caracteriza la masa del destino (*Figura 28*), los valores más altos (tanto en hora punta como en hora valle) se aglutinan en las estaciones más céntricas del municipio de Madrid como Atocha o Sol y expandiéndose algo más en el futuro. Valores algo menores se extienden igualmente por el suroeste de la Comunidad y por el norte de la capital en estaciones como Fuencarral y Ramón y Cajal, debido a la cantidad de empleo al que dan servicio.

Si se atiende a los cambios acaecidos entre los dos momentos temporales, la tendencia es similar tanto en la población (*Figura 29*) como en el empleo (*Figura 30*), a diferencia del indicador anterior donde existían ligeras diferencias entre ambas variables utilizadas. Esto es debido a que el coste en minutos ha sido elevado a un exponente de 2, primando esto sobre la masa del destino ya sea población o empleo y causando mayor trascendencia de cambio allí donde se construyen nuevas estaciones más cercanas entre sí.

Destacan con los porcentajes de cambio más elevados las estaciones que se sitúan en la variante de Torrejón, debido a la cercanía entre las mismas. También las estaciones de la Tenería (cercana a Pinto), Plaza Norte, Costa Brava o Alonso Martínez, que una vez más posee el máximo de porcentaje de cambio tanto en población como en empleo debido al gran volumen de ambos que soporta y debido también a su proximidad con otras estaciones céntricas como Sol con la que se conecta en el futuro. También presentan grandes diferencias entre la actualidad y el futuro, aunque en menor medida, las estaciones de Parla Norte y las que se ubican en la variante de Las Rozas-Majadahonda. Por lo tanto, parece que la práctica totalidad de las nuevas estaciones que se construirán en el futuro mejoran su accesibilidad.



*Figura 29. Cambios entre presente y futuro del Potencial económico teniendo en cuenta la población y el método de distancia en línea recta (%). Elaboración propia*



**Figura 30.** Cambios entre presente y futuro del Potencial económico teniendo en cuenta el empleo (unidades locales) y el método de distancia en línea recta (%). *Elaboración propia*

En el extremo opuesto, destacan estaciones como Parla Centro o Humanes, cuyo cambio es nulo con respecto al futuro debido a la presencia de nuevas estaciones en sus líneas. Además, otras estaciones como Atocha o Méndez Álvaro pierden también accesibilidad por la aparición del nuevo eje transversal este-suroeste que no conectará directamente con estas estaciones tan concurridas.

#### IV.2.3. Oportunidades de acceso

Como ya indicamos anteriormente, el índice de las *oportunidades de acceso* permite calcular el número de oportunidades disponibles desde un determinado nodo dentro de un intervalo de coste de transporte establecido a partir de dicho nodo.

En este trabajo se han considerado las 4 estaciones que acumularon más tráfico de viajeros en el año 2011 y que son por este orden Atocha, Nuevos Ministerios, Chamartín y Sol. A partir de la población y unidades locales (empleo) que existen a menos de 900 metros de las estaciones (teniendo en cuenta el método de la distancia en línea recta), se han establecido intervalos de 10 minutos y se ha calculado la cantidad total de cada una de estas dos variables dentro de esos intervalos hacia y desde las estaciones señaladas (*Tabla 5*). Además dentro del primer intervalo de minutos se ha incluido tanto la población como el empleo que abarca cada estación.



|              | HACIA ATOCHA             |               |                  |                | DESDE ATOCHA             |               |                  |                |
|--------------|--------------------------|---------------|------------------|----------------|--------------------------|---------------|------------------|----------------|
|              | Red actual               |               | Red futura       |                | Red actual               |               | Red futura       |                |
| Minutos      | Población                | Empleo        | Población        | Empleo         | Población                | Empleo        | Población        | Empleo         |
| Menos de 10  | 572.657                  | 34.125        | 627.808          | 41.681         | 608.963                  | 35.122        | 664.114          | 42.408         |
| 10 - 20      | 691.244                  | 21.018        | 790.482          | 24.472         | 655.659                  | 20.154        | 754.897          | 23.608         |
| 20 - 30      | 415.685                  | 13.962        | 481.489          | 18.570         | 414.964                  | 13.829        | 526.292          | 19.485         |
| 30 - 40      | 190.340                  | 6.221         | 350.620          | 11.740         | 189.968                  | 6.113         | 377.813          | 18.962         |
| más de 40    | 63.532                   | 1.949         | 164.678          | 11.373         | 63.968                   | 2.057         | 91.961           | 3.103          |
| <b>Total</b> | <b>1.933.458</b>         | <b>77.275</b> | <b>2.415.077</b> | <b>107.836</b> | <b>1.933.458</b>         | <b>77.275</b> | <b>2.415.077</b> | <b>107.836</b> |
|              | HACIA NUEVOS MINISTERIOS |               |                  |                | DESDE NUEVOS MINISTERIOS |               |                  |                |
|              | Red actual               |               | Red futura       |                | Red actual               |               | Red futura       |                |
| Minutos      | Población                | Empleo        | Población        | Empleo         | Población                | Empleo        | Población        | Empleo         |
| Menos de 10  | 282.797                  | 26.195        | 355.003          | 34.007         | 325.655                  | 28.789        | 397.861          | 36.601         |
| 10 - 20      | 554.852                  | 17.919        | 637.756          | 21.153         | 601.368                  | 17.319        | 684.272          | 20.553         |
| 20 - 30      | 618.796                  | 17.412        | 360.590          | 18.325         | 613.506                  | 18.076        | 625.386          | 19.050         |
| 30 - 40      | 347.766                  | 12.039        | 499.124          | 19.386         | 267.682                  | 9.400         | 434.391          | 17.160         |
| más de 40    | 129.247                  | 3.710         | 292.604          | 14.965         | 125.247                  | 3.691         | 273.167          | 14.472         |
| <b>Total</b> | <b>1.933.458</b>         | <b>77.275</b> | <b>2.415.077</b> | <b>107.836</b> | <b>1.933.458</b>         | <b>77.275</b> | <b>2.415.077</b> | <b>107.836</b> |
|              | HACIA CHAMARTÍN          |               |                  |                | DESDE CHAMARTÍN          |               |                  |                |
|              | Red actual               |               | Red futura       |                | Red actual               |               | Red futura       |                |
| Minutos      | Población                | Empleo        | Población        | Empleo         | Población                | Empleo        | Población        | Empleo         |
| Menos de 10  | 250.845                  | 24.330        | 323.772          | 32.178         | 250.845                  | 24.330        | 323.772          | 32.178         |
| 10 - 20      | 409.832                  | 14.767        | 409.832          | 14.767         | 478.083                  | 16.572        | 560.266          | 19.770         |
| 20 - 30      | 588.088                  | 16.667        | 682.065          | 20.778         | 673.333                  | 19.256        | 685.127          | 20.169         |
| 30 - 40      | 551.864                  | 17.720        | 658.110          | 24.164         | 386.286                  | 12.783        | 519.198          | 20.028         |
| más de 40    | 132.829                  | 3.791         | 341.298          | 15.949         | 144.911                  | 4.334         | 326.714          | 15.691         |
| <b>Total</b> | <b>1.933.458</b>         | <b>77.275</b> | <b>2.415.077</b> | <b>107.836</b> | <b>1.933.458</b>         | <b>77.275</b> | <b>2.415.077</b> | <b>107.836</b> |
|              | HACIA SOL                |               |                  |                | DESDE SOL                |               |                  |                |
|              | Red actual               |               | Red futura       |                | Red actual               |               | Red futura       |                |
| Minutos      | Población                | Empleo        | Población        | Empleo         | Población                | Empleo        | Población        | Empleo         |
| Menos de 10  | 175.547                  | 18.758        | 230.698          | 26.314         | 310.770                  | 24.698        | 365.921          | 32.254         |
| 10 - 20      | 791.137                  | 28.875        | 890.375          | 32.329         | 770.897                  | 24.877        | 870.135          | 28.331         |
| 20 - 30      | 601.294                  | 16.586        | 654.967          | 21.388         | 641.718                  | 20.403        | 694.670          | 25.169         |
| 30 - 40      | 232.873                  | 9.320         | 319.966          | 12.205         | 75.437                   | 3.472         | 190.273          | 7.204          |
| más de 40    | 132.607                  | 3.736         | 319.071          | 15.600         | 134.636                  | 3.825         | 294.078          | 14.878         |
| <b>Total</b> | <b>1.933.458</b>         | <b>77.275</b> | <b>2.415.077</b> | <b>107.836</b> | <b>1.933.458</b>         | <b>77.275</b> | <b>2.415.077</b> | <b>107.836</b> |

*Tabla 5. Población y empleo totales situados a menos de 900 m. de las diferentes estaciones de la red actual y de la red futura desde y hacia las estaciones de Atocha, Nuevos Ministerios, Chamartín y Sol, mediante el método de distancia en línea recta. Elaboración propia*

Si atendemos a lo descrito en relación a la estación de Atocha, podemos comprobar su centralidad en la red puesto que concentra la mayor parte de la población y el empleo en los dos primeros intervalos (menos de 20 minutos), siendo en la red presente la población un 65% del total y el empleo un 71% respectivamente si tenemos



en cuenta la dirección hacia Atocha. Además los datos de empleo van reduciéndose a medida que la cantidad de minutos es mayor, lo cual pone de manifiesto su carácter articulador como estación por la que discurren todas las líneas actuales.

Si nos referimos al futuro los datos absolutos son aún mayores, debido a la incorporación de nuevas estaciones a la red, pero el porcentaje tanto de población como de empleo cubierto en los dos primeros intervalos se reducen al 58% y al 61% respectivamente por su pérdida parcial de centralidad.

La estación de Nuevos Ministerios se encuentra algo menos céntrica en la red a pesar de que por ella transcurren la totalidad de las líneas excepto una, la C-5. Esto se denota en los datos de población cubierta, pues la mayor parte de ella se incluye entre el segundo y el tercer intervalo de tiempo (de 10 a 30 minutos) y no en el primero. Por el contrario, el empleo se muestra mucho más constante ya que un tercio se concentra a menos de 10 minutos, reduciéndose a medida que aumenta el tiempo. Todo esto concierne a la red actual pero ¿y en la red futura? La cantidad de población cubierta en el intervalo de 30-40 minutos incrementa notablemente en el futuro al igual que los valores correspondientes al empleo. Esto pone de manifiesto un aumento de ambas variables en la zona sur de la Comunidad (por donde se extiende en parte la red tras el Plan), ya que la estación de Nuevos Ministerios se ubica en el centro-norte de la ciudad de Madrid.

Lo mismo ocurre con la estación de Chamartín, aunque también en el presente puesto que dicha estación se sitúa aún más al norte de la ciudad. La mayor parte de la población se emplaza ya entre los 20 y los 40 minutos tanto en el presente como en el futuro. Por otro lado, el empleo se acumula en el presente en los primeros intervalos debido a la capacidad de acumulación de oficinas que esta área de la ciudad de Madrid posee. Aunque ligeramente, esta tendencia varía en el futuro ya que aunque el mayor porcentaje se asienta en el primer intervalo (menos de 10 minutos), el empleo crece marcadamente en intervalos temporales mayores y por tanto en otras zonas de la Comunidad más alejadas.

A pesar de que la estación de Sol resulta ser la más céntrica de las estaciones en el ámbito espacial de la ciudad, no lo es en la red de Cercanías ya que por ella circulan tan sólo 3 de las 10 líneas existentes en la actualidad. Ello se demuestra en que la mayor parte de la población y el empleo se centralizan entre los 10 y los 30 minutos. La tendencia es muy parecida en el futuro, aunque con incrementos en todos los intervalos debido a la aparición de las nuevas estaciones.

Por último, es destacable que en todos los casos, es decir, en las 4 estaciones los datos tanto de población como de empleo son mayores en los primeros intervalos en la dirección *desde* (*from* → *to*). Esto puede ser debido a que la entrada a estas grandes estaciones por las que circulan varias líneas es más trabajosa y, por tanto, más lenta que la salida (dirección *hacia* o *to* → *from*).



### IV.3. Distancia media a las estaciones

Como anteriormente se ha hecho referencia, la distancia que existe entre la vivienda o el trabajo del viajero y la estación más próxima resulta un hecho fundamental a la hora de elegir el medio de transporte. Es por ello que aquí se exige una comparación entre el momento actual y el futuro del recorrido en minutos a la estación más próxima.

Al tener en cuenta la distancia en línea recta entre todos los centroides de las secciones censales que conforman la Comunidad de Madrid y las estaciones más cercanas, se puede realizar una media que es de 2.746 metros en el presente. Una vez finalizado el Plan citado y terminadas y abiertas las estaciones propuestas, esta distancia se reducirá a 2.258 metros, por lo que la disminución de casi 500 metros resulta fundamental y significativa de la mejora que el mencionado Plan efectúa sobre la accesibilidad de todo el territorio madrileño.

### IV.4. Tiempo medio de recorrido desde cada estación

El tiempo medio de recorrido (en minutos) desde cada estación se convierte en un indicador más de la accesibilidad y de los cambios que en la misma se pueden producir en el futuro.

De esta manera, se ha realizado un listado por estaciones con el tiempo medio de recorrido a las demás estaciones en hora punta en el presente, en el futuro y sus cambios tanto en valores absolutos como en valores relativos (*Tabla 6, Anexo 1*).

Los menores tiempos de recorrido tanto en el presente como en el futuro son los que corresponden por orden a las estaciones de Atocha, Nuevos Ministerios, Sol, Recoletos y Chamartín, todas ellas caracterizadas por su posición relativamente céntrica en la red y por la presencia de al menos tres líneas. Por detrás se sitúan estaciones muy próximas a Atocha con al menos también dos líneas como Méndez Álvaro, Asamblea de Madrid-Entrevías, Delicias o Villaverde Bajo. En el lado opuesto de la lista, encontramos en el presente estaciones situadas en las proximidades de la sierra como Cotos, Cercedilla, Collado Mediano o El Escorial y también otras ubicadas en los extremos de ciertas prolongaciones futuras como Soto del Real o Navalcarnero. Esto último cambia si nos referimos al futuro pues estas “estaciones extremo” mejoran sus niveles de accesibilidad y por tanto reducen sus tiempos medios de recorrido.

Si atendemos a los niveles de cambio, la totalidad de las estaciones de la red sufren una mejora en la accesibilidad pues el número de minutos de recorrido disminuye en todos los casos. La única excepción es la estación de Avenida de América que al estar conectada en el presente (aunque sea por vehículo privado) con la estación de Nuevos Ministerios reduce sus tiempos al poseer esta última mejores conexiones con



casi todas las líneas que el eje transversal proyectado en el futuro en el que se incluiría esta estación.

Las diferencias más significativas en cuanto a porcentaje se refiere, tienen lugar allí donde se construirán nuevas estaciones, por ejemplo Las Fronteras Industrial (30,62%), Soto del Real (28,94%), Parque Andalucía (27,92%) o Valdebebas (27,86%). En el extremo opuesto, encontramos estaciones como Pinto (0,45%), Valdemoro (1,66%), Aranjuez (1,74%) o Fuente de la Mora (2,02%).

Este tiempo medio de recorrido se encuentra estrechamente vinculado con la centralidad de determinadas estaciones. Además este tiempo se modificaría notablemente en el caso de cierre de determinados tramos o estaciones. Por este motivo, puede resultar interesante la simulación de alguno de estos bloqueos para comprobar el grado de vulnerabilidad presente y futuro de la red de Cercanías que aquí nos incumbe.

Se puede tomar como ejemplo el bloqueo del tramo comprendido entre las estaciones de Príncipe Pío y Pirámides. En el presente resultaría que los viajeros que aprovechan las estaciones ubicadas en Aravaca, Pozuelo, Majadahonda y Las Rozas y que desean conectar directamente con Atocha a través de Príncipe Pío-Pirámides-Delicias-Méndez Álvaro-Atocha, deberían entrar o salir por el norte de la ciudad de Madrid, lo que supondría un aumento considerable en el tiempo de recorrido. Esto se evitaría en el futuro con la implantación del eje transversal, pues éste tendrá una estación en Príncipe Pío que conectará con otras estaciones de la red evitando el bloqueo en dicha estación, provocando una disminución de los tiempos de trayecto y salvando así la congestión que se producen en ciertos tramos y estaciones en la actualidad.

Otro ejemplo que reduciría la vulnerabilidad actual de la red lo podemos encontrar en la futura variante de Majadahonda-Las Rozas. Si se produjera un cierre de la estación de Las Rozas y de sus tramos adjuntos, la totalidad de las líneas que discurren por ellos en la actualidad quedarían obstruidas, dejando a todos los usuarios de las estaciones anteriores sin conexión con las principales estaciones de Madrid y viceversa. En el futuro esta situación cambiaría ya que aunque se produjera el hipotético cierre, los usuarios podrían continuar su viaje atravesando la variante planteada. Lo mismo sucedería en el caso de la estación de Torrejón de Ardoz, ya que los viajeros procedentes de Guadalajara podrían alcanzar las estaciones de la capital a través de la variante formulada por el centro del municipio de Torrejón y viceversa.

Con estos ejemplos se pone de manifiesto que la red futura será menos vulnerable a las posibles e imprevisibles incidencias que puedan ocurrir sobre ella.



## V. CONCLUSIONES

La accesibilidad entendida como la facilidad o dificultad de alcanzar un destino desde uno o varios orígenes determinados entraña una serie de aspectos a veces confusos de definir debido a la falta de unicidad metodológica a la hora de su aplicación práctica (García, 2000).

Aunque son numerosos los trabajos que utilizan la accesibilidad como instrumento para estudios de demanda de redes de transporte privado, son menos los que emplean dicho instrumento para redes de transporte público y muy pocos los que lo aplican sobre redes ferroviarias de carácter local como la que aquí nos incumbe.

Este trabajo pretende abordar estrictamente este tema mediante su aplicación sobre la red de Cercanías de Madrid. Además, aprovechando el Plan de Infraestructuras Ferroviarias proyectado en el año 2009, se procura determinar y cuantificar tanto los valores de accesibilidad actuales como los futuros, una vez articulado y finalizado dicho Plan.

Para alcanzar unos resultados lógicos y coherentes, ha sido necesaria la construcción de una red perfectamente cohesionada, lo cual se ha llevado a cabo mediante un dilatado e innovador proceso metodológico. Una vez trazada esta red, ha sido posible aplicar los diferentes indicadores que han evidenciado diferencias en sus resultados. Los dos primeros (*media ponderada de los costes de transporte* y el *potencial económico*) poseen una tendencia similar puesto que los mayores incrementos de accesibilidad entre presente y futuro corresponden a las nuevas estaciones, siendo el segundo el que aporta mayor preponderancia a aquellas estaciones más próximas entre sí. El tercer indicador, el de *oportunidades de acceso*, nos aporta una información distinta puesto que sólo se aplica a unas cuantas estaciones, en este caso a las cuatro con mayor tráfico de viajeros, de la cual se puede extraer tanto la centralidad en la red de la estación de Atocha como la importancia de Nuevos Ministerios o incluso de Chamartín en cuanto a empleo se refiere.

Lo que sí parece evidente es que la red tras el Plan aumenta en cobertura (tanto en población como en empleo) ya que alcanza nuevos municipios que hasta ahora carecían de acceso directo a la red, lo cual repercute también en la distancia media a la estación más cercana que se reduce marcadamente. Además la diversificación de la red en nuevas estaciones y sobre todo en nuevas líneas disminuye los tiempos de recorrido y provoca la descentralización de la red sobre determinadas estaciones que en la actualidad concentran la mayoría de las líneas. Esto último se muestra conectado con la vulnerabilidad de la red, pues igualmente se rebajará en el futuro.



Todos estos resultados manifiestan una clara mejoría entre la red presente y la futura que se revelará mucho más diversificada, más cohesionada y por lo tanto más accesible.

Este trabajo abre la puerta a nuevas líneas de investigación, centradas por ejemplo en el estudio en 3-D de la accesibilidad en las estaciones como grandes edificaciones por las que se debe acceder para tomar la línea deseada (Thill et al, 2011).

Con todo ello, la accesibilidad es modelada y usada para explicar y predecir las pautas del desarrollo urbano (Helling, 1996), lo que nos permite analizar tanto el efecto de una estación sobre un nuevo espacio urbano o los efectos sobre la nueva estación ubicada en un espacio urbano ya consolidado. Esta es la razón por la que la medida de la accesibilidad debe emplearse como un potente instrumento de investigación y planificación y, en definitiva, de análisis territorial.



## BIBLIOGRAFÍA

- BRUINSMA, F.R. y RIETVELD, P. (1993). *Urban agglomeration in European infrastructure networks*. *Urban Studies* 30, pp. 919-934.
- CHANG, J. y LEE, J.H. (2008). *Accessibility Analysis of Korean High-speed Rail: A Case Study of the Seoul Metropolitan Area*. *Transport Reviews*, Vol. 28, 1, pp. 87-103.
- DALVI, M.Q. (1978). *Behavioral modeling accessibility, mobility and need: concepts and measurement*. En Hensher, D. et al, *Behavioral Travel Modeling*. London: Croom Helm.
- DUNDON-SMITH, D.M. y GIBB, R.A. (1994). *The Channel Tunnel and regional economic development*. *Journal of Transport Geography* 2 (3), pp. 178-189.
- GARCÍA, J.C. (2000). *La medida de la accesibilidad*. *Revista Estudios de Construcción, Transportes y Comunicaciones*, 88, pp. 95-110.
- GARCÍA, J.C., CARDOZO, O. y GUTIÉRREZ, J. (2008). *Sistemas de información geográfica como herramientas en la estimación de las entradas en las estaciones de Metro de Madrid*. En: Hernández, L. y Parreño, J. M. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica para el Desarrollo Territorial*. Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la ULPGC, pp. 56-69.
- GEERTMAN, S.C.M. y RITSEMA VAN ECK, J.R. (1995). *GIS and models of accessibility potential: an application in planning*. *International Journal of Geographical Information Systems* 9 (1), pp. 67-80.
- GOULD, P. (1969). *Spatial Diffusion Commission of College Geography*. Association of American Geographers, Washington, DC.
- GUTIÉRREZ, J. (1992). *Movilidad en Madrid: la configuración espacial de los flujos*. *Economía y Sociedad*, nº 6, pp. 99-122.
- 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., GONZÁLEZ, R. y GÓMEZ, G. (1996). *The European high-speed train network: predicted effects on accessibility patterns*. *Journal of Transport Geography* 4 (4), pp. 227-238.
- GUTIÉRREZ, J. y URBANO, P. (1996). *Accessibility in the European Union: the impact of the Transeuropean road network*. *Journal of Transport Geography* 4 (1), pp. 15-25.



GUTIÉRREZ, J. y GÓMEZ, G. (1999). *The impact of orbital motorways on intrametropolitan accessibility: The case of the Madrid M-40*. Journal of Transport Geography (Pergamon Press), vol. 7, 1999.

HANSEN, W.G. (1959). *How Accessibility Shapes Land-Use*. Journal of the American Institute of Planners, vol. 5, pp. 76-106.

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

HARVEY, D. (1989). *The condition of postmodernity: an enquiry into the origins of cultural change*. Nueva York, Basil Blackwell.

HELLING, A. (1996). *Why we should care about intra-metropolitan accessibility and how we measure it*. Paper presented at the Research Conference *Spatial Technologies, Geographic Information and the City*. (National Center for Geographic Information and analysis), Washington.

HSIAO S., LU J., STERLING J. y WEATHERFORD M. (1997). *Use of Geographic Information Systems for analysis of transit pedestrian access*. Transportation Research Record, 1604, pp. 50-59.

IZQUIERDO, R. (1996). *Transportes: un enfoque integral*. Servicio de publicaciones del Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puerto.

JANELLE, D.G. (1969). *Spatial reorganization: a model and concept*. Annals of the Association of American Geographers, 59, pp. 348-364.

JONES, S.R. (1981). *Accessibility measures: a literature review*. Department of the Environment Department of Transport. TRRL Laboratory Report 967.

KEEBLE, D., OFFORD, J. y WALKER, S. (1988). *Peripheral Regions in a Community of Twelve*. Office for official Publications of the European Communities, Brussels/Luxembourg.

LINNEKER, B.J. y SPENCE, N.A. (1992). *Accessibility measures compared in an analysis of the impact of the M25 London Orbital Motorway on Britain*. Environment and Planning A, 24, 1137-1154.

LUTTER, H., PÜTZ, T. y SPANGENBERG, M. (1992). *Accessibility and Peripherality of Community Regions: The Role of Road Long Distance Railway and Airport Networks*. Commission of the European Communities, Brussels.

MARTÍN, J., GUTIÉRREZ, J. y ROMÁN, C. (2004). *Data envelopment analysis (DEA) index to measure the accessibility impacts of new infrastructure investments: the*



case of the high-speed train corridor Madrid-Barcelona-French border. *Regional Studies*, 38, pp. 697-712.

MURRAY, A.T. (2001). *Strategic analysis of public transport coverage*. *Socio-Economic Planning Sciences*, 35, pp. 175-188.

SMITH, D.M. y GIBB, R.A. (1993). *The regional impact of the Channel Tunnel. A return to potencial analysis*. *Geoforum* 24 (2), pp. 183-192.

SPENCE, N., LINNEKER, B. (1994). *Evolution of the motorway network and changing levels of accessibility in Great Britain*. *Journal of Transport Geography* 2 (4), pp. 247-264.

THILL, J.C., HONG, T. y ZHOU, Y. (2011). *Traveling in the three-dimensional city: applications in route planning accessibility assessment, location analysis and beyond*. *Journal of Transport Geography* 19, pp. 405-421.

ZHAO F., CHOW L.F., LI M.T., GAN A. y UBAKA I. (2003). *Forecasting transit walk accessibility: a regression model alternative to the buffer method*. *Transportation Research Board Annual Meeting*.



## Anexo I.

| NOMBRE                                | PRESENTE | FUTURO | CAMBIO | CAMBIO (%) |
|---------------------------------------|----------|--------|--------|------------|
| Aeropuerto T4                         | 53,18    | 49,98  | 3,20   | 2,60       |
| Alcalá de Henares                     | 66,27    | 62,45  | 3,82   | 3,34       |
| Alcalá de Henares-Universidad         | 70,83    | 66,51  | 4,33   | 4,13       |
| Alcobendas-San Sebastián de los Reyes | 53,76    | 50,85  | 2,91   | 2,50       |
| Alcorcón                              | 56,59    | 47,87  | 8,72   | 10,55      |
| Algete                                | 81,72    | 72,15  | 9,58   | 9,09       |
| Alonso Martínez                       | 50,52    | 32,13  | 18,39  | 24,75      |
| Alpedrete                             | 79,57    | 77,11  | 2,45   | 3,35       |
| Aluche                                | 46,82    | 38,25  | 8,57   | 7,78       |
| Aranjuez                              | 76,77    | 74,99  | 1,77   | 1,74       |
| Aravaca                               | 45,46    | 38,09  | 7,36   | 7,46       |
| Asamblea de Madrid-Entrevías          | 39,37    | 36,00  | 3,37   | 2,97       |
| Atocha                                | 32,98    | 29,78  | 3,21   | 3,09       |
| Avenida de América                    | 66,89    | 67,77  | -0,88  | -4,29      |
| Canillejas                            | 64,15    | 59,84  | 4,31   | 7,08       |
| Cantoblanco Universidad               | 46,94    | 43,59  | 3,35   | 2,94       |
| Cercedilla                            | 92,67    | 89,99  | 2,68   | 4,15       |
| Chamartín                             | 36,78    | 33,51  | 3,28   | 2,95       |
| Ciempozuelos                          | 67,85    | 66,08  | 1,77   | 1,74       |
| Ciudalcampo-Santo Domingo             | 76,77    | 64,25  | 12,52  | 15,91      |
| Collado Mediano                       | 85,10    | 81,73  | 3,36   | 5,65       |
| Colmenar Viejo                        | 68,80    | 65,73  | 3,07   | 2,58       |
| Coslada                               | 50,73    | 46,89  | 3,84   | 3,45       |
| Costa Brava                           | 57,16    | 39,04  | 18,11  | 26,90      |
| Cotos                                 | 150,30   | 146,96 | 3,35   | 4,32       |
| Cuatro Vientos                        | 52,03    | 44,53  | 7,51   | 3,68       |
| Cubas-Casarrubuelos-Ugena             | 81,50    | 58,80  | 22,69  | 23,94      |
| Delicias                              | 39,91    | 36,42  | 3,49   | 3,79       |
| Doce de Octubre                       | 42,97    | 38,72  | 4,24   | 3,16       |
| El Barrial-Centro Comercial Pozuelo   | 47,75    | 41,13  | 6,62   | 6,79       |
| El Casar                              | 50,93    | 47,32  | 3,61   | 2,80       |
| El Escorial                           | 78,95    | 76,19  | 2,76   | 4,48       |
| El Goloso                             | 56,84    | 53,14  | 3,71   | 3,28       |
| El Pozo                               | 41,59    | 38,03  | 3,55   | 3,16       |
| Embajadores                           | 40,31    | 36,63  | 3,68   | 2,77       |
| Fanjul                                | 48,52    | 41,07  | 7,45   | 3,38       |
| Fuencarral                            | 42,49    | 39,09  | 3,41   | 2,99       |
| Fuenlabrada                           | 57,01    | 49,23  | 7,78   | 6,12       |
| Fuente de la Mora                     | 44,64    | 42,09  | 2,55   | 2,02       |
| Galapagar-La Navata                   | 61,16    | 58,09  | 3,08   | 3,95       |
| Getafe Centro                         | 47,08    | 43,41  | 3,67   | 2,74       |



| NOMBRE                     | PRESENTE | FUTURO | CAMBIO | CAMBIO (%) |
|----------------------------|----------|--------|--------|------------|
| Getafe Industrial          | 53,10    | 49,98  | 3,12   | 2,97       |
| Getafe-Sector Tres         | 49,82    | 46,17  | 3,65   | 2,72       |
| Griñón                     | 78,52    | 54,91  | 23,61  | 24,99      |
| Humanes                    | 59,21    | 52,05  | 7,16   | 5,55       |
| La Garena                  | 63,53    | 59,64  | 3,89   | 3,49       |
| La Serna                   | 55,13    | 47,39  | 7,74   | 6,04       |
| La Tenería                 | 74,97    | 54,54  | 20,42  | 27,67      |
| Laguna                     | 43,86    | 39,33  | 4,53   | 3,39       |
| Las Águilas                | 50,26    | 42,78  | 7,48   | 3,65       |
| Las Fronteras              | 71,07    | 60,14  | 10,93  | 9,45       |
| Las Fronteras Industrial   | 76,03    | 51,61  | 24,41  | 30,62      |
| Las Margaritas Universidad | 45,28    | 41,59  | 3,69   | 2,76       |
| Las Matas                  | 55,00    | 52,09  | 2,91   | 3,65       |
| Las Retamas                | 59,44    | 50,71  | 8,74   | 8,50       |
| Las Rozas                  | 51,58    | 46,89  | 4,69   | 6,55       |
| Las Rozas Centro           | 67,97    | 52,58  | 15,39  | 19,58      |
| Las Veredillas             | 73,05    | 61,86  | 11,19  | 9,87       |
| Las Zorreras               | 73,05    | 70,24  | 2,81   | 4,41       |
| Leganés                    | 50,56    | 41,90  | 8,66   | 6,40       |
| Los Molinos                | 88,85    | 85,49  | 3,36   | 5,68       |
| Los Negrales               | 75,90    | 72,53  | 3,37   | 4,30       |
| Móstoles                   | 61,33    | 52,59  | 8,74   | 8,31       |
| Móstoles el Soto           | 63,63    | 55,52  | 8,11   | 7,66       |
| Majadahonda                | 51,68    | 45,86  | 5,82   | 7,32       |
| Majadahonda Centro         | 68,09    | 50,77  | 17,32  | 23,13      |
| Meco                       | 74,66    | 70,34  | 4,32   | 4,13       |
| Moncloa                    | 60,57    | 48,73  | 11,84  | 13,60      |
| Méndez Álvaro              | 38,27    | 34,88  | 3,39   | 3,06       |
| Navalcarnero               | 83,00    | 66,42  | 16,58  | 21,54      |
| Nuevos Ministerios         | 35,60    | 31,91  | 3,70   | 3,42       |
| Oporto                     | 57,11    | 42,20  | 14,91  | 15,56      |
| Orcasitas                  | 44,15    | 39,88  | 4,27   | 3,32       |
| Parla Centro               | 55,15    | 52,80  | 2,34   | 1,41       |
| Parla Hospital             | 71,33    | 56,70  | 14,63  | 17,73      |
| Parla Norte                | 70,34    | 49,93  | 20,41  | 23,34      |
| Parque Andalucía           | 73,33    | 52,70  | 20,63  | 27,92      |
| Parque Polvoranca          | 52,37    | 44,67  | 7,69   | 5,99       |
| Pinar de las Rozas         | 52,09    | 48,33  | 3,76   | 3,24       |
| Pinto                      | 57,67    | 56,42  | 1,25   | 0,45       |
| Pirámides                  | 40,84    | 36,33  | 4,51   | 4,36       |
| Pitis                      | 43,07    | 40,83  | 2,24   | 2,21       |
| Plaza Norte                | 73,79    | 53,62  | 20,17  | 23,60      |
| Pozuelo                    | 46,44    | 39,29  | 7,15   | 7,34       |



| NOMBRE                                     | PRESENTE | FUTURO | CAMBIO | CAMBIO (%) |
|--|----------|--------|--------|------------|
| Príncipe Pío                               | 42,47    | 35,25  | 7,22   | 7,82       |
| Puente Alcocer                             | 45,19    | 40,88  | 4,31   | 3,35       |
| Puerto de Navacerrada                      | 133,44   | 130,09 | 3,35   | 4,32       |
| Ramón y Cajal                              | 40,84    | 37,83  | 3,02   | 2,97       |
| Recoletos                                  | 36,63    | 33,04  | 3,59   | 3,34       |
| San Agustín de Guadalix                    | 79,74    | 69,21  | 10,53  | 13,89      |
| San Cristóbal de los Ángeles               | 45,77    | 42,15  | 3,62   | 2,80       |
| San Cristóbal Industrial                   | 48,32    | 44,71  | 3,61   | 2,80       |
| San Fernando                               | 54,01    | 50,04  | 3,97   | 3,62       |
| San José de Valderas                       | 54,75    | 45,16  | 9,58   | 13,35      |
| San Sebastián de los Reyes Norte           | 75,77    | 57,38  | 18,39  | 21,83      |
| San Yago                                   | 71,14    | 68,31  | 2,83   | 3,78       |
| Santa Eugenia                              | 46,23    | 42,56  | 3,67   | 3,28       |
| Sol  | 36,35    | 32,78  | 3,57   | 3,57       |
| Soto del Henares                           | 75,03    | 55,91  | 19,12  | 24,45      |
| Soto del Real                              | 104,04   | 78,62  | 25,42  | 28,94      |
| Torrejón de Ardoz                          | 56,91    | 53,44  | 3,47   | 3,07       |
| Torrejón de la Calzada-Torrejón de Velasco | 73,31    | 59,67  | 13,64  | 16,57      |
| Torrelodones                               | 57,99    | 55,12  | 2,87   | 3,64       |
| Tres Cantos                                | 60,67    | 56,97  | 3,70   | 3,27       |
| Universidad Pontificia de Comillas         | 49,24    | 45,53  | 3,71   | 3,26       |
| Valdebebas                                 | 66,13    | 45,97  | 20,16  | 27,86      |
| ValdelasFuentes                            | 52,85    | 49,15  | 3,71   | 3,28       |
| Valdemoro                                  | 62,98    | 61,21  | 1,78   | 1,66       |
| Vallecas                                   | 44,62    | 40,98  | 3,64   | 3,24       |
| Vicálvaro                                  | 47,63    | 43,89  | 3,74   | 3,34       |
| Villalba                                   | 66,39    | 63,53  | 2,86   | 3,98       |
| Villaverde Alto                            | 42,41    | 38,40  | 4,01   | 3,15       |
| Villaverde Bajo                            | 40,05    | 36,78  | 3,28   | 2,96       |
| Zarzaquemada                               | 48,84    | 42,98  | 5,86   | 4,69       |

**Tabla 6.** Duración media del trayecto (en minutos) entre una estación y las demás en hora punta en el presente, en el futuro y las diferencias en valores absolutos y valores relativos entre ambos momentos temporales. *Elaboración propia*



## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo parte de mi interés como geógrafo para vincular el territorio con la población que en él habita mediante los medios de transporte. Por ello quisiera agradecer a todos los profesores y compañeros que han formado parte del Máster en Tecnologías de la Información Geográfica por transmitirme sus conocimientos, sin los cuales no habría podido realizar el presente trabajo. En concreto, me gustaría dar las gracias a mi profesor y tutor Juan Carlos García Palomares por prestarme su saber y su ayuda siempre que se lo he requerido.

También quisiera dar las gracias a la Fundación de los Ferrocarriles Españoles y a todas las personas que en ella desarrollan su actividad, por permitirme trabajar a su lado, por dejar inmiscuirme en cierto modo en sus proyectos y por suministrarme la información que en cada momento he necesitado. Incluyo por supuesto entre esas personas a Miguel Jiménez por ofrecerse para ser mi tutor de las prácticas efectuadas en la citada Fundación.

Por último, no me gustaría dejar de reconocer el talento de Verónica García González, la cual me ha facilitado la fotografía que figura en la portada. Igualmente necesito dar las gracias a Ana por ayudarme siempre que se lo pedido, a Rubén por su apoyo incondicional y por supuesto al resto de amigos y familia por su ánimo y su paciencia en los momentos difíciles.