



- Accesibilidad de la red actual de Cercanías de Madrid y la incidencia en la misma del Plan de Infraestructuras Ferroviarias de Cercanías para Madrid (2009-2015)
- Análisis cinemático del tiempo empleado por los trenes a su paso por limitaciones de velocidad
- Análisis de una vía con traviesas cuadro
- Diseño de Redes de Comunicaciones bajo las Restricciones Típicas de un Entorno Ferroviario
- Economía y Técnica, de la mano en las Telecomunicaciones Ferroviarias
- Suicidios y accesos a vía no autorizados en los ferrocarriles: análisis y medidas para su mitigación y prevención
- Tratamiento de consolidación de terraplén en el PK 208/100 a 208/200 de la línea Calatayud-Valencia mediante inyecciones de fracturación hidráulica con lechada estable de cemento, a través de tubos manguitos



Edita:



### Consejo asesor:

José Luis López Gómez  
Premio TALGO

Sergio Lopez Lara  
Premio TRIA Railway R&D

Andrés López Pita  
Aula y Premio COMSA

Eduard Rodés  
Director Escola Europea de Short Sea Shipping

Eduardo Romo Urroz  
Fundación Caminos de Hierro

Emilio Larrode Pellicer  
Universidad de Zaragoza

Ignasi Perat Benavides  
Master en Sistemas Ferroviarios y Tracción Eléctrica (UPC)

Julio Fuentes Losa  
Curso de Experto Universitario de Ingeniería Ferroviaria  
(UNED) y Congreso de Innovación Ferroviaria.

José Francisco Baños Pino  
Master en Transporte y Gestión Logística (Universidad de  
Oviedo)

José Cañizares Moyano  
Asociación Europea de Ferroviarios

### Consejo de redacción:

Pilar Lozano (Directora editorial, FFE)

Ángeles Tauler (FFE)

Alberto García (Renfe Operadora)

Yolanda del Val (FFE)

Antonio Berrios (ADIF)

J. Mariano Rodríguez (Secretario, FFE)

## Vía Libre Técnica - investigación ferroviaria

La revista *Vía Libre Técnica - investigación ferroviaria* es una publicación científica digital con versión impresa que pretende acoger los artículos que dan a conocer resultados de investigaciones, estudios o desarrollos relevantes en el ámbito del transporte en general y del ferrocarril en particular.

Pretende esta revista tener una utilidad práctica para el sector, cubriendo -al menos parcialmente- el vacío detectado entre las revistas divulgativas y las revistas académicas internacionales indexadas, éstas últimas al alcance de pocas personas y no orientadas (por su propia naturaleza) hacia el sector industrial. Con ello se espera poner a disposición de los actores y ejecutivos del sector la información relevante derivada de los estudios e investigaciones realizadas. También pretende servir de apoyo a los investigadores españoles, en especial a los jóvenes y a los que desarrollan su actividad en empresas, ofreciéndoles la posibilidad de dar a conocer sus trabajos. Los proyectos de investigación nacionales e internacionales disponen también, con la revista, de una plataforma de diseminación para facilitar la transferencia de resultados a la industria.

Los números regulares de la revista se publican con una periodicidad semestral, y también se publican (con numeración correlativa con los anteriores) números monográficos, con la producción de la convocatoria de un premio, un congreso, unas jornadas, o un proyecto de investigación.

La revisión de los artículos de los números ordinarios corresponde al Consejo Asesor de la revista, mientras que las de los números extraordinarios se entiende asumida por el jurado en el caso de los premios, por el comité científico del congreso o por el grupo de investigadores en el caso de proyectos. En cualquier caso en el número correspondiente se publican los nombres de los responsables.

Las opiniones expresadas en los artículos corresponden exclusivamente a sus autores, a los que pertenece la propiedad intelectual del trabajo.

Existen unas normas de admisión y de formato de los trabajos, accesibles en la página web:

<http://www.tecnica-vialibre.es/vltecnica/normaspub.asp>

La revista en formato digital puede ser descargada gratuitamente en:

<http://www.tecnica-vialibre.es/vltecnica/>

### Edita:

Fundación de los Ferrocarriles Españoles  
ISSN: 2174-0194

## SUMARIO

<b>Accesibilidad de la red actual de Cercanías de Madrid y la incidencia en la misma del Plan de Infraestructuras Ferroviarias de Cercanías para Madrid (2009-2015) .....</b>	<b>9</b>
<i>Eduardo Ramos García</i>	
<b>Análisis cinemático del tiempo empleado por los trenes a su paso por limitaciones de velocidad .....</b>	<b>43</b>
<i>José Gómez Castaño</i>	
<b>Análisis de una vía con traviesas cuadro .....</b>	<b>53</b>
<i>Fernando Romero Zaragüeta</i>	
<b>Diseño de Redes de Comunicaciones bajo las Restricciones Típicas de un Entorno Ferroviario .....</b>	<b>69</b>
<i>José Higuera Soler</i>	
<b>Economía y Técnica, de la mano en las Telecomunicaciones Ferroviarias .....</b>	<b>79</b>
<i>Víctor Andrés Martín Moreno</i>	
<b>Suicidios y accesos a vía no autorizados en los ferrocarriles: análisis y medidas para su mitigación y prevención .....</b>	<b>85</b>
<i>Ángeles Táuler Alcaraz; María del Mar Sacristán Martín; Sarah Whalley; Laura Lorenzo Carrascosa</i>	
<b>Tratamiento de consolidación de terraplén en el PK 208/100 a 208/200 de la línea Calatayud-Valencia mediante inyecciones de fracturación hidráulica con lechada estable de cemento, a través de tubos manguito .....</b>	<b>99</b>
<i>José Manuel López Moreno</i>	

## SUMMARY

### **Accessibility of the existing commuter network in Madrid and its influence on Madrid Commuter railway Infrastructure Plan (2009 -2015) .....**

9

*Eduardo Ramos García*

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.

### **Kinematic analysis of the time taken by trains passing through speed restrictions .....**

43

*José Gómez Castaño*

Abstract: This paper conducts an analysis of the kinematics involved during the passage of trains speed restrictions. We develop a general expression for calculating the time for different train types, taking into account the slope of the sections.

A comparison with the Technical Standard ADIF for use in model validation and quantification of the acceleration and deceleration values for the majority of trains as well as for various speeds.

keywords: Speed restriction, Kinematics.

### **Analysis of a track with frame sleepers .....**

53

*Fernando Romero Zaragüeta*

Abstract: Over the last years, the need to improve the railway infrastructure has appeared in order to face the growing traffic loads that have to be supported. One of the objectives to obtain this improvement is to reduce the stress and pressure on the ballast layer. This is why a new type of sleepers was created by the end of 1990s, the frame sleepers. They consist of two sleepers placed longitudinally under the rails and joined to one another by two sleepers across them, thus adopting a rectangle or double H form. With this layout, a larger support area for the sleepers is gained, the loads are therefore better spread and the pressure level on the ballast and the platform is lower. Moreover, the configuration of the frame sleepers provides the track with a higher stiffness compared to tracks with standard sleepers. Nowadays, some sections in Austrian, Swiss and Italian rail lines are equipped with frame sleepers so as to carry out technical and economic investigation.

keywords: Frame sleepers, ballast, stresses, deflection, bending moment.

## **Communications Network Design under Constraints of Typical Railroad Environment .....**

69

*José Higuera Soler*

Abstract: A Telecommunications Network is a system essential to the overall architecture of a railway line. The distribution along the entire line of services associated with key elements for safe movement of trains such as railway signal transmission, the power management catenary, communications between train drivers and traffic controllers, or services necessary for the maintenance of the line, becoming indispensable. Such is the case that the loss of availability of any element in a telecommunications network of a railway line can lead to non-viability and hence the impossibility of movement of business machines. Without going into more detail on the types of services and their availability requirements, a number of characteristics associated with physical architecture of a railway line whose study can facilitate the optimization of the design of its telecommunications network.

In this paper, we study the aforementioned characteristics to establish certain design criteria applying these restrictions to the classic tools in the design of networks as graphs theory, so that after a short study graph model and the resources available, we can design a high availability network.

As a final conclusion, this article shows that the inclusion of rail environments restrictions to the classic tools of network design, we provide more effective models in the NP network optimization problem.

keywords: Telecommunications, design, networking, graph, reliability, costs, rail.

## **Economics and Technology, together in the Railway Telecommunications .....**

79

*Víctor Andrés Martín Moreno*

Abstract: Any decision about technology in the design of railway telecommunications network implies a change in the economic evolution of the investment. And vice versa, a change in the economic graphical involves a technological action executed. The article provides an overview of economic developments in a project according to their technological phases. Displays the extrapolation of a particular case that varies based on multiple factors like complexity, deadlines, schedules and the difficulties encountered.

keywords: Railway telecommunications, economics, technology, management, fiber optics, energy, data network, subsystems, analysis, planning, lab, aggregate, investment.



**Suicides and trespasses on railway property: analysis and prevention and mitigation measures** .....

85

*Ángeles Táuler Alcaraz; María del Mar Sacristán Martín; Sarah Whalley; Laura Lorenzo Carrascosa*

Abstract: The sociology of transport has focused primarily on urban planning, social aspects of demand and mobility studies. Our contribution to this discipline is through the study of social behaviour acted out within a railway environment and the consequences brought about these actions and behaviour. It is within this context that we examine the phenomena of suicides and trespasses on railway property and their impact on public health, as well as the cost to society of these acts.

We will analyze data from the European project RESTRAIL - Reduction of suicides and trespasses on railway property (2011). The aim of RESTRAIL is to study railway suicides and trespasses from a European perspective, with a view to reducing these incidents and their consequences through the development and implementation of effective measures and policies for the protection, deterrence or mitigation of this issue. This paper presents some preliminary research regarding railways suicides and trespass accidents in Spain and Europe.

keywords: Geographic Suicides, trespasses, social behavior, railways.

**Embankment compacting treatment in section 208/100 - 208/200 of the Calatayud-Valencia line by means of injections of hydraulic fracturing with stable cement grout through sleeve tubes** .....

99

*José Manuel López Moreno*

Abstract: The consolidation and stabilization of the embankment located in the railway line CALATAYUD-VALENCIA, at the section between P.K. 208/100 AND P.K. 208/200 (within BARRACAS – MASADAS BLANCAS sector) was assigned to AZVI as general contractor. The transit in this line includes trains for the transportation of passengers and freight. The latter, because of their lower frequency of actions, gave rise to sizeable deformations of the track, requiring frequent corrections of ballast thickness, for achieving its adequate levelling. The problem was solved using hydraulic fracture grouting, through sleeve pipes, that was performed by Obras y Proyectos Geotécnicos, S.L. (OPG), specialized firm subcontracted by AZVI. The control of the improvement achieved was effected by obtaining the values of Vs (velocity of shear waves) within the grouted volume of soil, using the cross-hole technique. All the values obtained for Vs were higher than 400 m/s.

It has to be pointed out, that the professional team of OPG in charge of the grouting improvement was the same that, through the use of the same technique had improved, in 2005, the transition zone to the southern abutment of the railway bridge over the Ebro river at Amposta (Tarragona). This job was part of the Spanish contribution to the European Supertrack Project, and it was carried out simultaneously with the railway traffic (passenger and freight trains) operating at its normal speed. The passenger trains included the Euromed, which operated at 200 km/h as the track structure (below the ballast layer) and the underlying embankment were being grouted down to a 7 m maximum depth, under the requirement of comfortable operation (movements of rail less than 3 mm in 5 m length).

keywords: Transition blocks, reinforced grouting, maintenance of cruising speeds, embankment, sleeve tube, train operation, train control, Barracas - Masadas Blancas.

## Accesibilidad de la red actual de Cercanías de Madrid y la incidencia en la misma del Plan de Infraestructuras Ferroviarias de Cercanías para Madrid (2009-2015)

### *Accessibility of the existing commuter network in Madrid and its influence on Madrid Commuter railway Infrastructure Plan (2009 -2015)*

Eduardo Ramos García (\*)

#### 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.

\* [edurg83@hotmail.com](mailto:edurg83@hotmail.com)

#### 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 Cercanias 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.*

## **1. Introducción**

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. Esto se realiza mediante un Sistema de Información Geográfica (GIS) que permite capturar, almacenar, manipular, analizar y presentar la información necesaria para conseguir el objetivo planteado. El software empleado es ArcGIS 10.0.



## **2. Estado de la cuestión**

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	$A_i = \frac{\sum_j (T_{ij} * M_j)}{\sum_j M_j}$	T <sub>ij</sub> = tiempo de viaje entre el nodo i y el nodo j M <sub>j</sub> = masa (población o empleo) en el centro de destino j	Al igual que el anterior mide el tiempo de viaje medio tomando en cuenta todas las relaciones, pero considerando también la importancia decada 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 <sub>i</sub> = Potencial económico del nodo i M <sub>i</sub> = medida de la actividad económica en el centroide j C <sub>ij</sub> = coste de transporte entre i y j a = parámetro que refleja el incremento de la fricción (o coste de desplazamiento) de la distancia	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.

Una vez introducido el tema, definido el principal objetivo 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.

### **3. Fuentes y metodología**

#### **3. 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 contempladas en el Plan, 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 de uno de los objetivos formulados. Esta metodología de análisis se desarrolla en una serie de operaciones que a continuación se detallan.

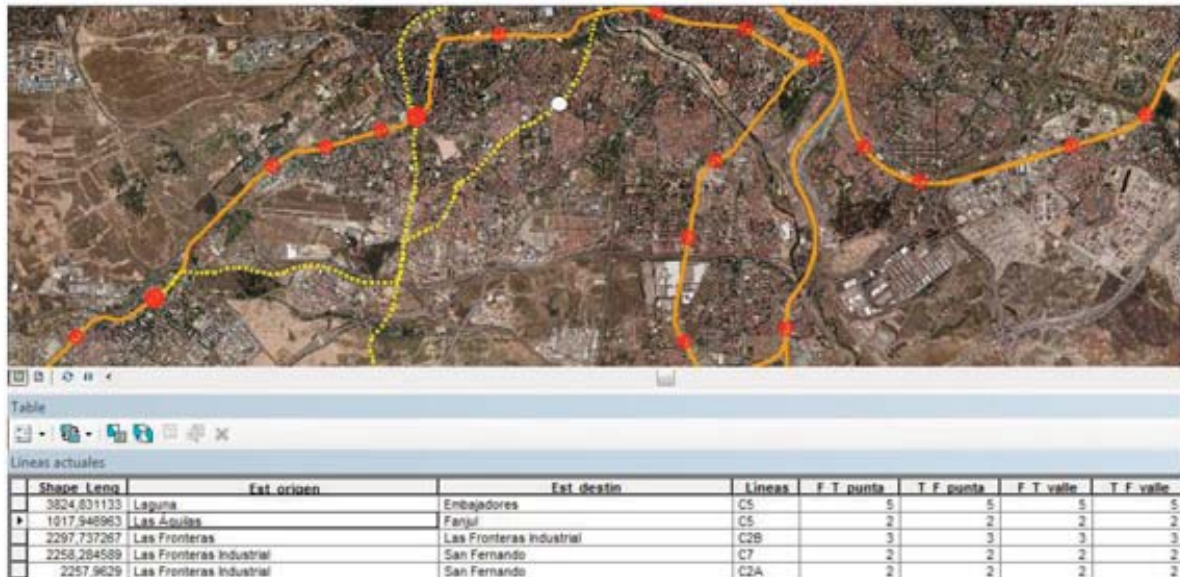
### 3.2. Metodología de análisis

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).

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 1*). 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.

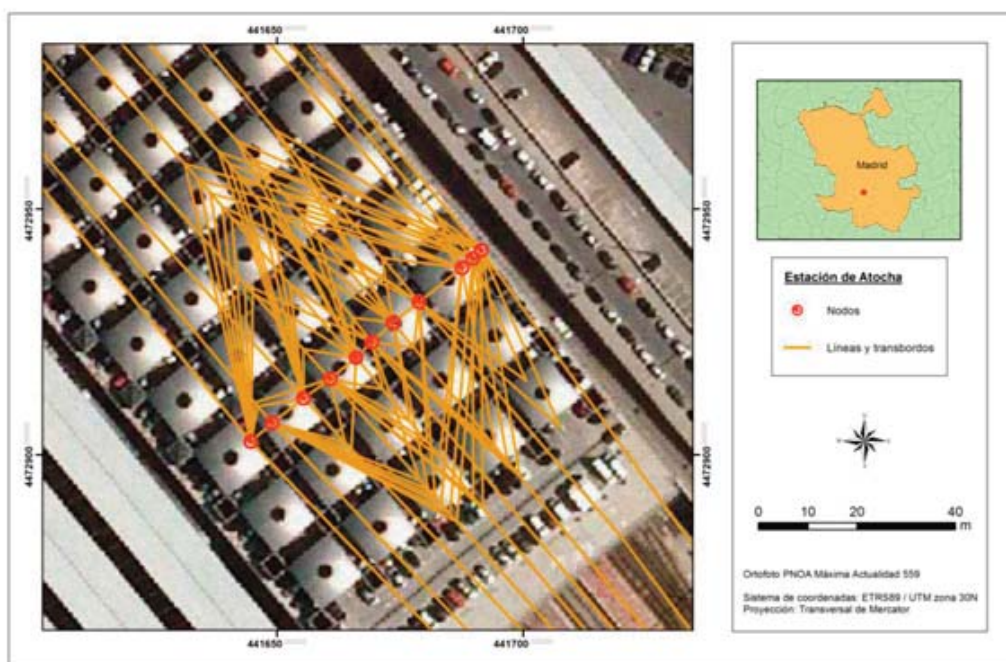




**Figura 1.** Captura de pantalla del software ArcGIS 10.0 en la que se muestran tanto los arcos creados como su base de datos de atributos con los minutos en ambas direcciones en hora punta y en hora valle.

*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 2*). Todos estos nodos estarán unidos por arcos en una relación de todos con todos, siendo estos los que porten la impedancia del tiempo.



**Figura 2.** 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

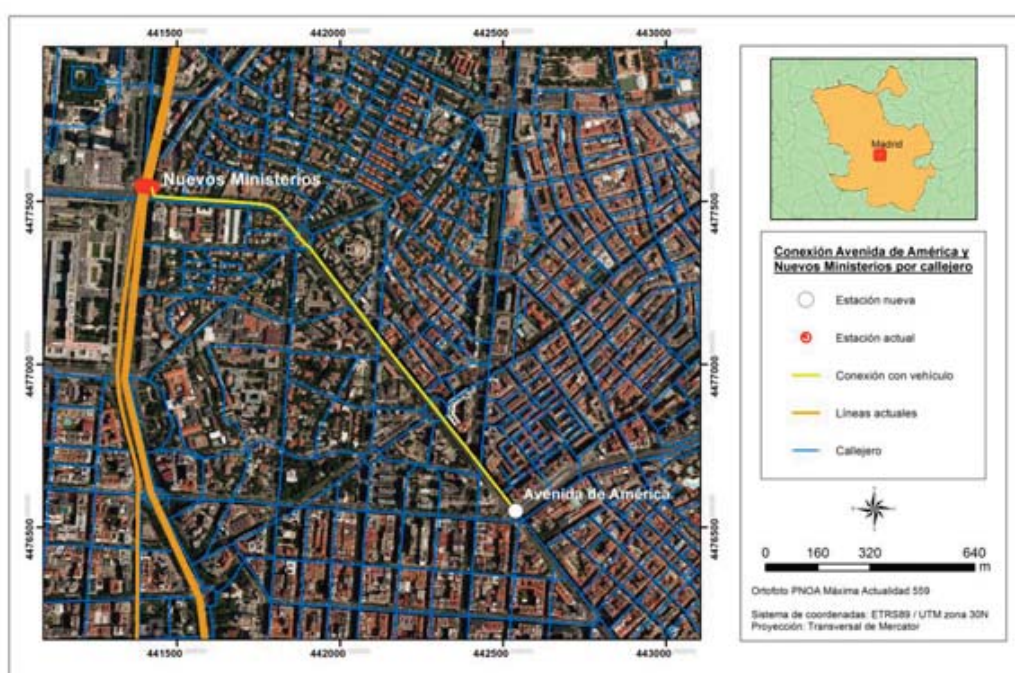
Para asignar los minutos a este tipo de arcos, se ha recurrido a Renfe donde se han consultado cada uno de los tiempos entre dos estaciones contiguas. Lo más característico es que algunos tiempos de recorrido son diferentes según la dirección, como por ejemplo el tiempo de recorrido entre Pitis y Pinar 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 3*).

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.



**Figura 3.** Conexión por el callejero entre Avenida de América y Nuevos Ministerios.  
*Elaboración propia*

### 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 2*). 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. Así pues, 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 2.** 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:

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

Potencial económico: 
$$P_i = \sum_{j=1}^n \frac{M_j}{C_{ij}^a}$$

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 4*). 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 5).

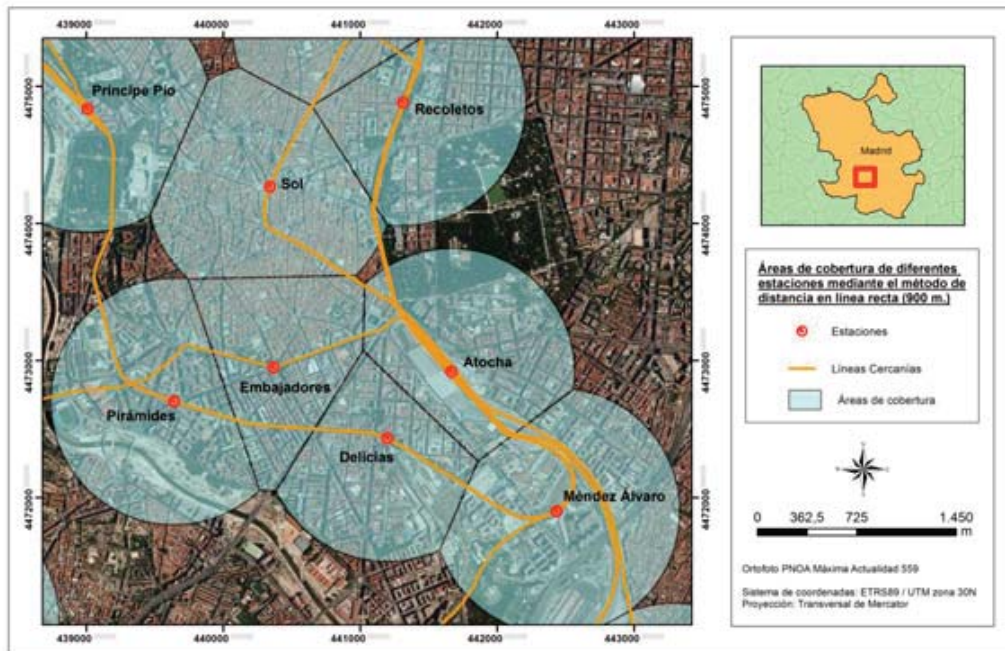


Figura 4. Áreas de cobertura de diferentes estaciones mediante el método de distancia en línea recta (900 metros). Elaboración propia

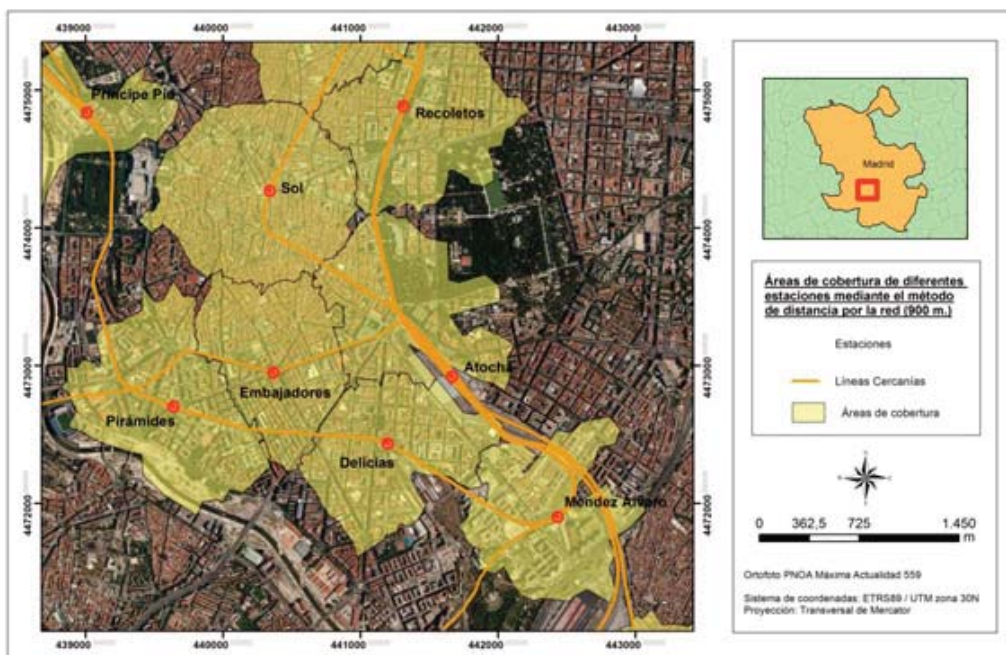


Figura 5. Áreas de cobertura de diferentes estaciones mediante el método de distancia por la red (900 metros). Elaboración propia



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.

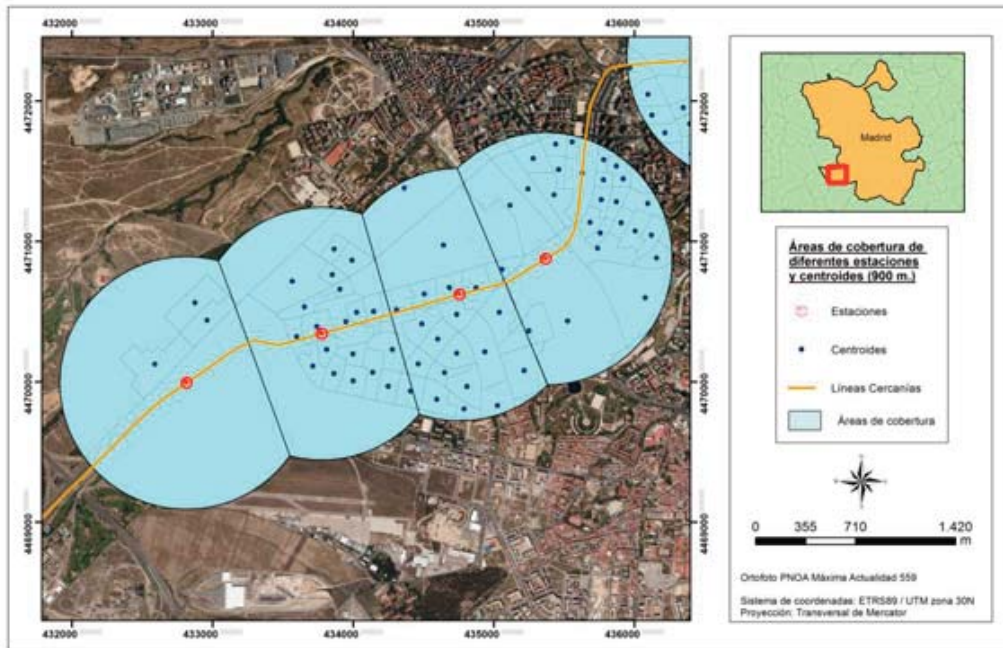
Finalmente, para averiguar la cantidad de población y empleo (variables estadísticas previamente incorporadas a la capa que contiene las secciones censales) que queda dentro de cada área de cobertura, se intersecan ambas capas y se utiliza el método de la ponderación areal o *areal weighting*. Este método 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 6*). 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 (%).

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.



**Figura 6.** Centroides de las secciones censales que quedan dentro de las áreas de cobertura de diferentes estaciones (900 metros). *Elaboración propia*

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.

#### 4. 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.

#### 4.1. 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 3*, 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 3. 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.

#### 4.2. Indicadores de accesibilidad

##### 4.2.1. 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.

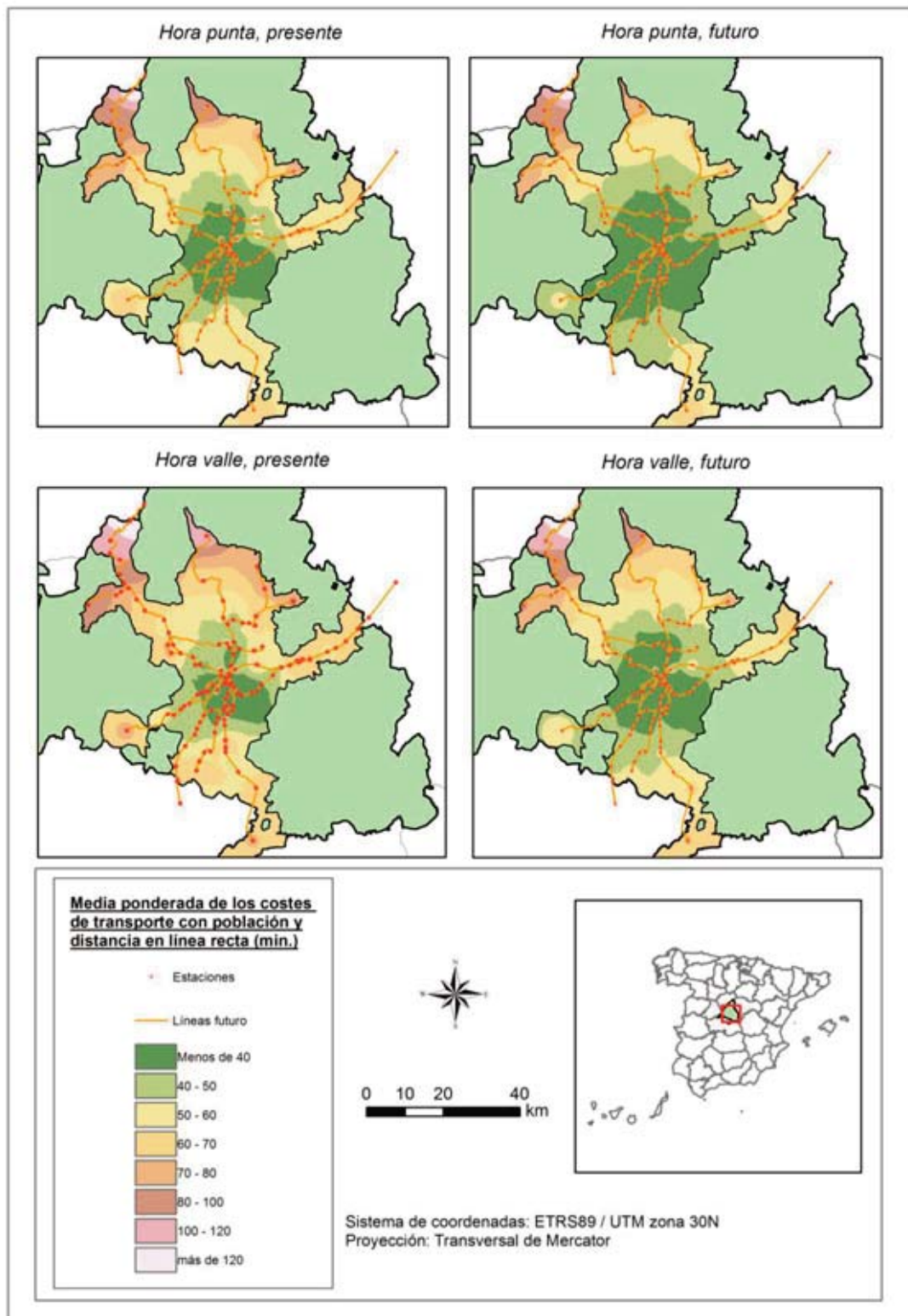
Para transformar los valores de accesibilidad a un mapa se ha utilizado el método de interpolación *IDW* con un tamaño de celdilla de 100 metros. Dicho esto, después de transferir los valores de accesibilidad de la *media ponderada de los costes de transporte* a los mapas podemos destacar algunos aspectos.

En primer lugar, resultan evidentes dos aspectos tanto si tenemos en cuenta la población (*Figura 7*) como el empleo (*Figura 8*) 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.

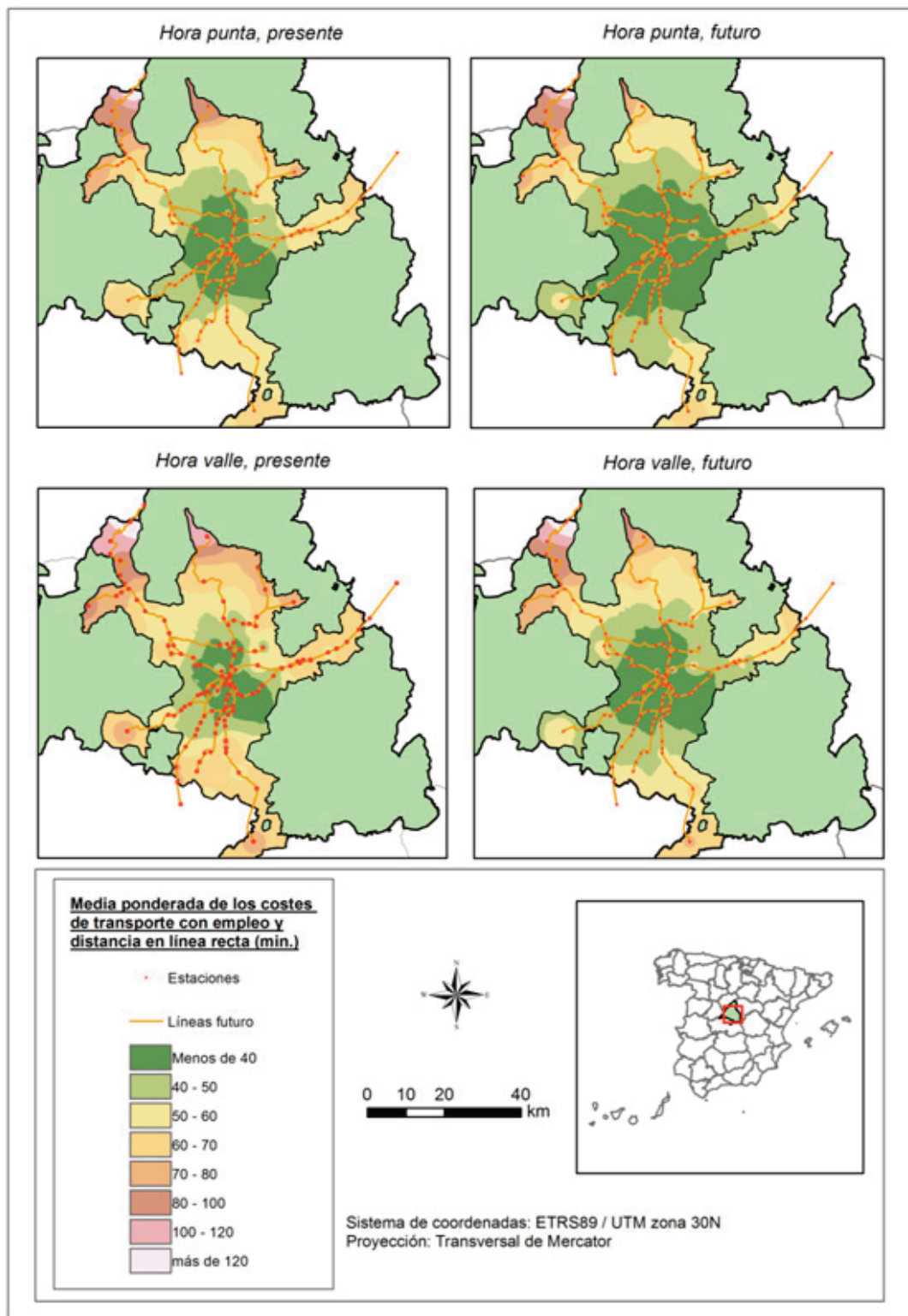
Por otro lado, si nos referimos al empleo como variable utilizada como masa del destino (*Figura 8*), la tendencia es similar aunque la mancha que representa el primer intervalo de valores (menos de 40) se extiende algo más por el territorio debido a la mayor descentralización de esta variable en el 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 7.** Media ponderada de los costes de transporte teniendo en cuenta la población y el método de distancia en línea recta (minutos). Elaboración propia





**Figura 8.** 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

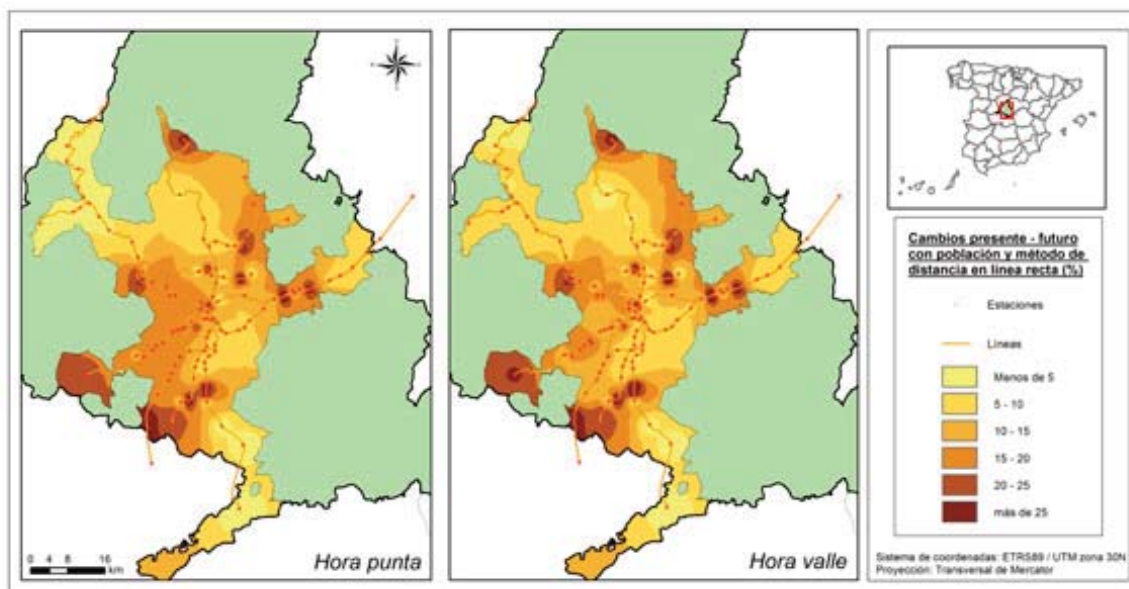
Asimismo, lo más efectivo para determinar donde se concentran las principales diferencias de accesibilidad entre presente y futuro son los mapas que muestran el porcentaje de cambio.

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 9), 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%).

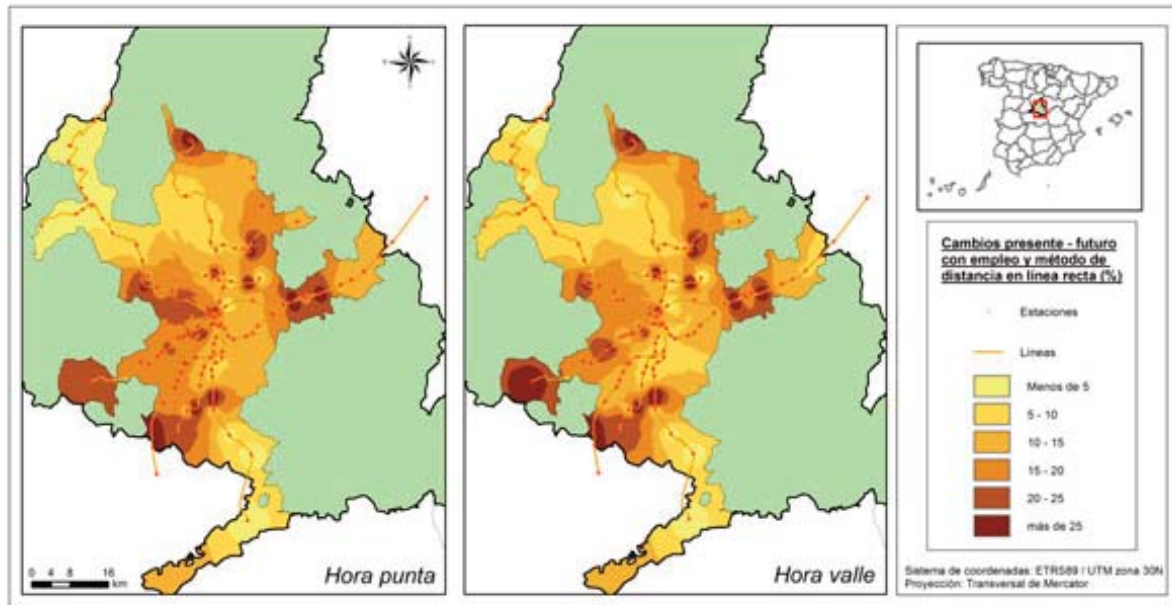
En cuanto al empleo (Figura 10), los incrementos en la hora valle son algo mayores en comparación con los de la hora punta situándose en las mismas estaciones arriba descritas.

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 9.** 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 10.** 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

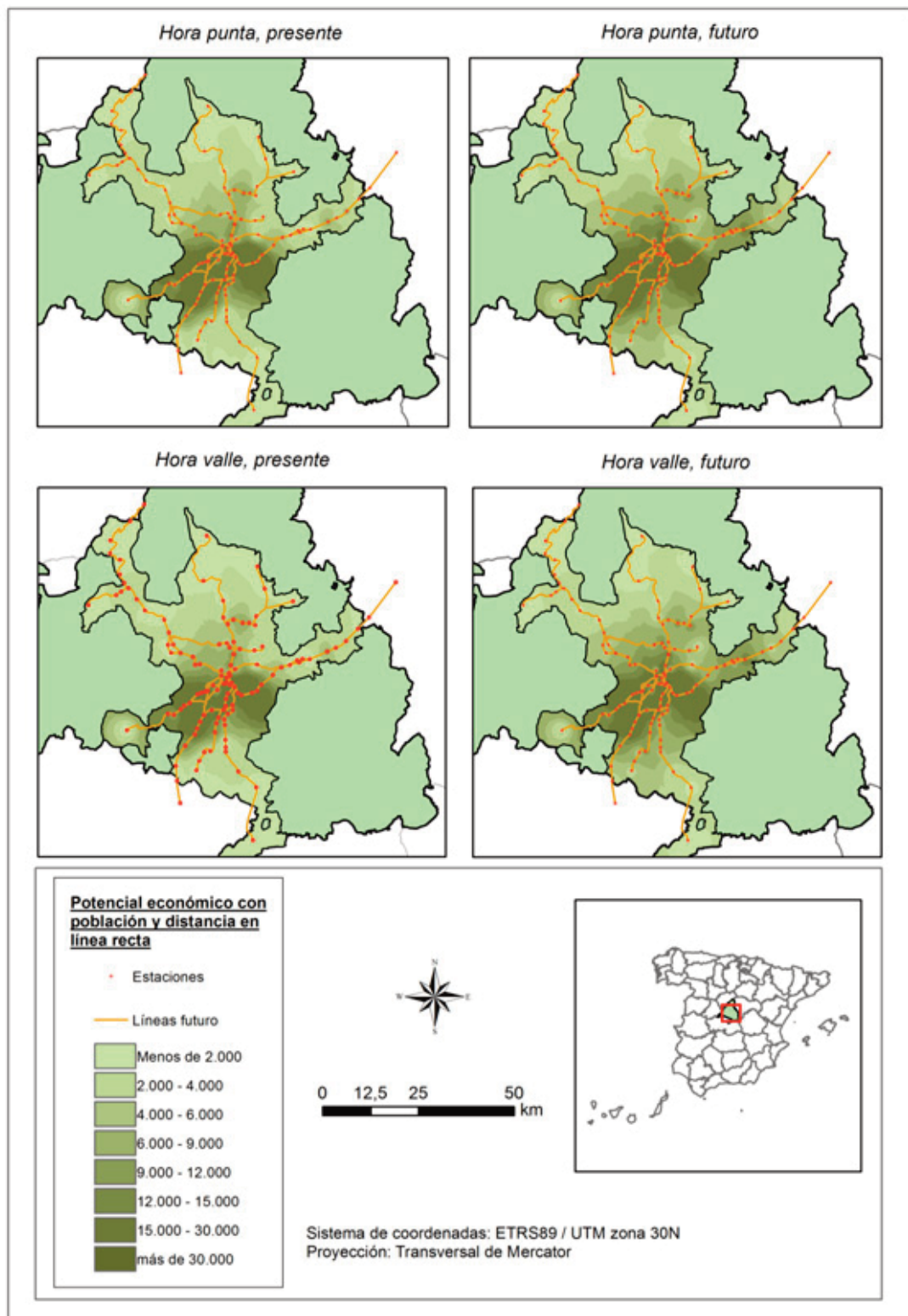
#### 4.2.2. Potencial económico

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 11), 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 11.** Potencial económico teniendo en cuenta la población y el método de distancia en línea recta.  
Elaboración propia



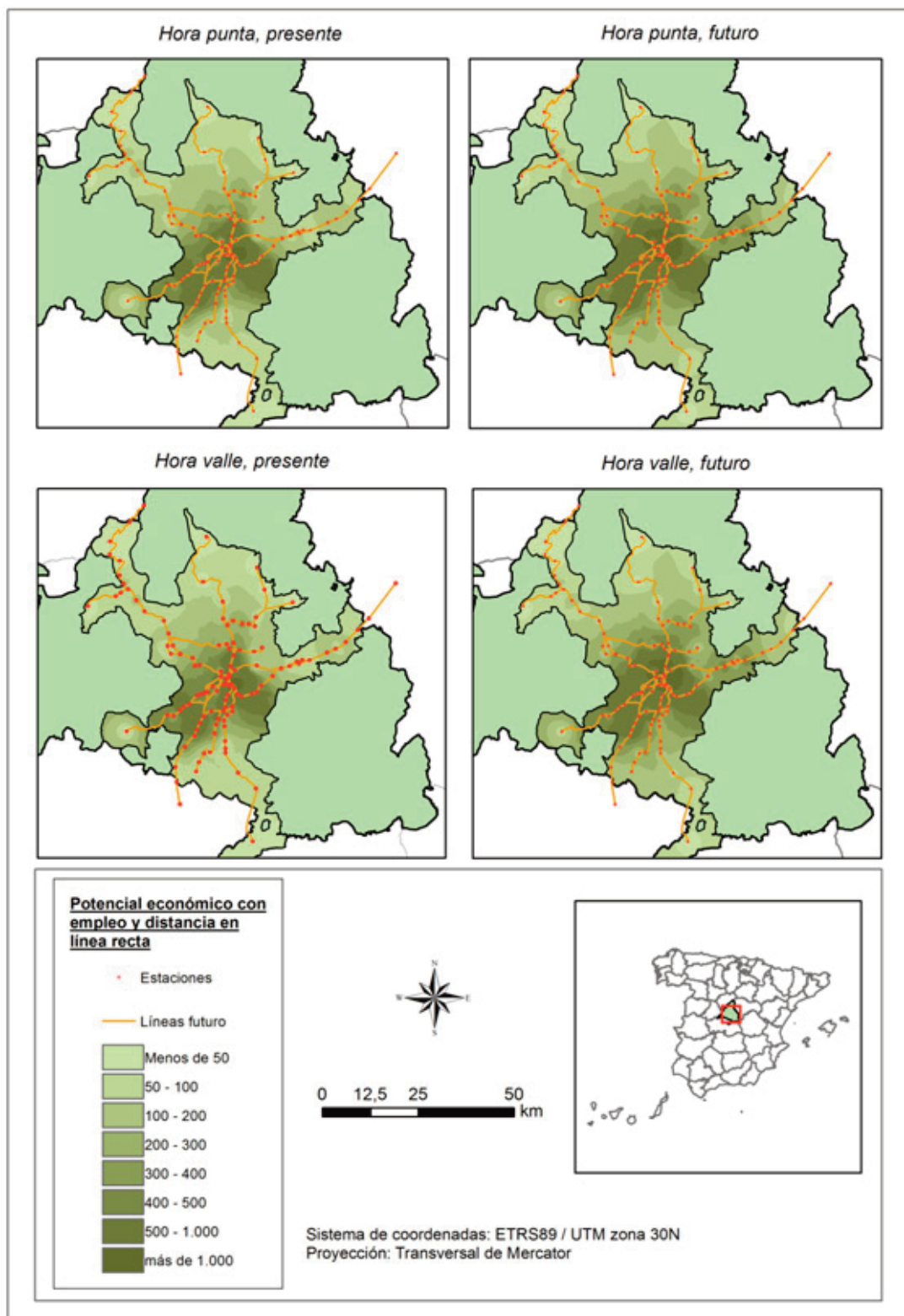
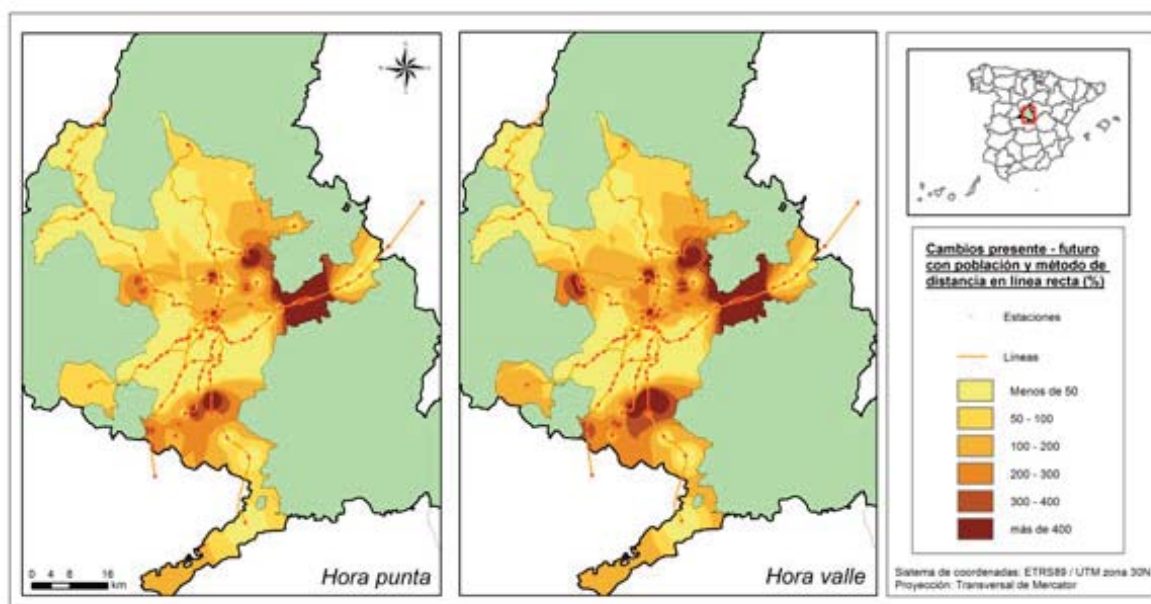


Figura 12. Potencial económico teniendo en cuenta el empleo (unidades locales) y el método de distancia en línea recta. Elaboración propia

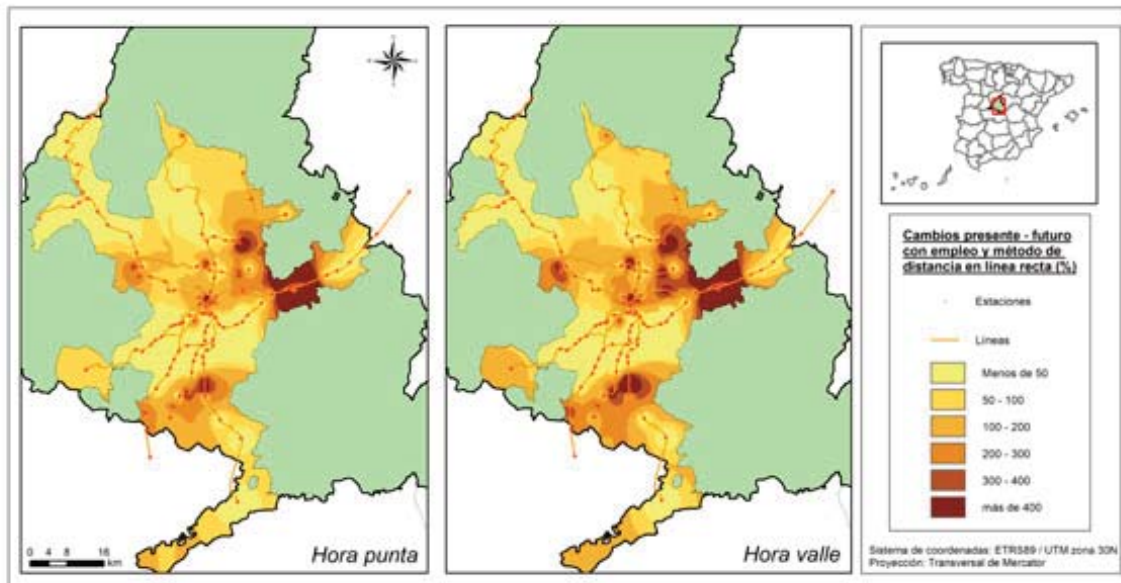
Si tomamos como referencia el empleo como variable que caracteriza la masa del destino (*Figura 12*), los valores más altos (tanto en hora punta como en hora valle) se aglutinan en las estaciones más céntricas del municipio de Madrid como Atocha o Sol y expandiéndose algo más en el futuro. Valores algo 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 13*) como en el empleo (*Figura 14*), 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 Tenerife (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 13.** Cambios entre presente y futuro del Potencial económico teniendo en cuenta la población y el método de distancia en línea recta (%). Elaboración propia



**Figura 14.** 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.

#### 4.2.3. 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 4*). 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 4.** 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*).

### 4.3. 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.

#### 4.4. 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 5, 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.

## **5. 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

- [1] BRUINSMA, F.R. y RIETVELD, P. (1993). *Urban agglomeration in European infrastructure networks*. Urban Studies 30, pp. 919-934.
- [2] 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.
- [3] DALVI, M.Q. (1978). *Behavioral modeling accessibility, mobility and need: concepts and measurement*. En Hensher, D. et al, *Behavioral Travel Modeling*. London: Croom Helm.
- [4] 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.
- [5] GARCÍA, J.C. (2000). *La medida de la accesibilidad*. Revista Estudios de Construcción, Transportes y Comunicaciones, 88, pp. 95-110.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] GOULD, P. (1969). *Spatial Diffusion Commission of College Geography*. Association of American Geographers, Washington, DC.
- [9] GUTIÉRREZ, J. (1992). *Movilidad en Madrid: la configuración espacial de los flujos*. Economía y Sociedad, nº 6, pp. 99-122.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] HANSEN, W.G. (1959). *How Accessibility Shapes Land-Use*. Journal of the American Institute of Planners, vol. 5, pp. 76-106.
- [15] 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.

- [16] HARVEY, D. (1989). *The condition of postmodernity: an enquiry into the origins of cultural change*. Nueva York, Basil Blackwell.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] IZQUIERDO, R. (1996). *Transportes: un enfoque integral*. Servicio de publicaciones del Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puerto.
- [20] JANELLE, D.G. (1969). *Spatial reorganization: a model and concept*. Annals of the Association of American Geographers, 59, pp. 348-364.
- [21] JONES, S.R. (1981). *Accessibility measures: a literature review*. Department of the Environment Department of Transport. TRRL Laboratory Report 967.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] MURRAY, A.T. (2001). *Strategic analysis of public transport coverage*. Socio-Economic Planning Sciences, 35, pp. 175-188.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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 1.**

<b>NOMBRE</b>	<b>PRESENTE</b>	<b>FUTURO</b>	<b>CAMBIO</b>	<b>CAMBIO (%)</b>
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

<b>NOMBRE</b>	<b>PRESENTE</b>	<b>FUTURO</b>	<b>CAMBIO</b>	<b>CAMBIO (%)</b>
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



NOMBRE	PRESENTE	FUTURO	CAMBIO	CAMBIO (%)
Pozuelo	46,44	39,29	7,15	7,34
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 5.** 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*

## Análisis cinemático del tiempo empleado por los trenes a su paso por limitaciones de velocidad

### *Kinematic analysis of the time taken by trains passing through speed restrictions*

José Gómez Castaño (\*)  
Jefatura de Sistemas Operacionales.  
Subdirección de TIC y Sistemas Operacionales.ADIF

#### Resumen

Este trabajo lleva a cabo un análisis de la cinemática implicada durante el paso de los trenes por limitaciones de velocidad. Se desarrolla una expresión general de cálculo para diversos tipos de tren, teniendo en cuenta además la pendiente de los tramos.

Se realiza una comparación con la Norma Técnica de uso en ADIF para la validación del modelo y la cuantificación de los valores de aceleración y deceleración para la generalidad de trenes, así como para diversas velocidades.

Palabras clave: Limitación de velocidad, Cinemática.

#### Abstract

*This paper conducts an analysis of the kinematics involved during the passage of trains speed restrictions. We develop a general expression for calculating the time for different train types, taking into account the slope of the sections.*

*A comparison with the Technical Standard ADIF for use in model validation and quantification of the acceleration and deceleration values for the majority of trains as well as for various speeds.*

*keywords: Speed restriction, Kinematics.*

\* [jgomezc@adif.es](mailto:jgomezc@adif.es)

## 1. Introducción

El objetivo de este análisis es crear un modelo que permita calcular el tiempo teórico empleado por un tren en cumplimentar una limitación de velocidad, y conocer los valores de deceleración y aceleración para un uso general en la mayoría de los trenes. Para ello se lleva a cabo un análisis de la cinemática implicada y se compara este con la normativa actualmente en vigor.

La Norma actual, NT-PS-03 [ADIF, Febrero 1997], permite calcular el tiempo perdido por los trenes a partir de la Velocidad máxima permitida en un tramo, la Velocidad impuesta por una limitación y la longitud de la misma. Los valores más complicados de evaluar son los tiempos perdidos debidos a la aceleración y deceleración del tren. En la norma se ha calculado a partir de simulaciones de la marcha de diferentes tipos de tren en diferentes circunstancias. De esta manera se dispone de una corrección general aplicable a toda la red de ferrocarriles.

En este estudio nos ceñimos a la cinemática implicada, para poder evaluar la misma diferencia intentando discriminarla por tipo de tren e introduciendo el valor de la rampa. La norma la utilizaremos como referencia para conocer el ajuste del modelo, que se ha basado en aceleraciones y deceleración de los trenes.

### Definiciones

- V<sub>max</sub>: Velocidad máxima del tren sin limitación, según el Libro Horario
- V<sub>ltv</sub>: Velocidad impuesta por la limitación
- T<sub>1</sub>: Instante de aplicación del freno
- T<sub>2</sub>: Instante de paso de la locomotora por el cartelón de inicio de limitación
- T<sub>3</sub>: Instante de paso de la locomotora por el cartelón de fin de limitación
- T<sub>4</sub>: Instante de paso del último vehículo por el cartelón de fin de limitación
- T<sub>5</sub>: Instante de recuperación de la V<sub>max</sub>
- T<sub>ltv</sub>: Tiempo total de cumplimentación de la Limitación

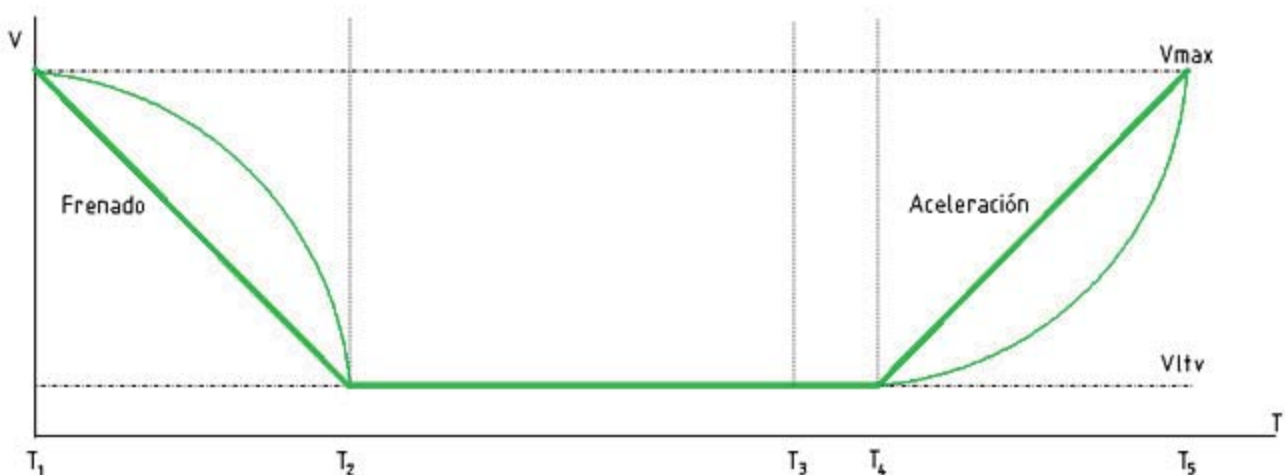


Gráfico de Velocidad vs Tiempo al paso de un tren por una Limitación de velocidad

Partimos de un movimiento en el que el freno va a ejercer una fuerza continua sobre el tren, por lo que responderá a la ecuación de movimiento en la que la velocidad está relacionada con el tiempo según la expresión:

$$V=V_0+a*t$$

En la realidad tanto el frenado como la aceleración está en manos del maquinista en trenes que no tienen activado algún tipo de conducción automática, produciéndose acelerones o frenadas discontinuas.

Para poder cumplimentar la limitación, el tren debe sufrir una deceleración en el instante T1, desde su Vmax hasta alcanzar la Vltv en el instante T2. Denominaremos Tdec a este intervalo de tiempo.

Entre los instantes T2 y T4, el tren debe mantener la Vltv, para cumplimentar el artículo 239 del Reglamento General de Circulación [ADIF], que impone mantener esta velocidad hasta que el último vehículo del tren pase por el cartelón de fin de limitación. En caso de tener que cumplimentar el punto 2 de dicho artículo, no se debería tener en cuenta el intervalo entre T3 y T4. Este intervalo lo denominaremos Tlim.

En el instante T4 se comienza la aceleración hasta recuperar la Vmax en el momento T5. A este intervalo lo denominaremos Tac.

## 2. Desarrollo

De lo anterior se puede deducir el tiempo total empleado para la cumplimentación de la limitación de velocidad completa como la suma de los tiempos parciales:

$$T_{ltv} = T_{dec} + T_{lim} + T_{ac} \quad (1)$$

Comenzamos por calcular el Tiempo de frenado.

$$\begin{aligned} a &= \frac{v-v_0}{T_{dec}} \rightarrow T_{dec} = \frac{v_{ltv}-v_{max}}{a} \\ a &= dt + ag \\ T_{dec} &= \frac{v_{ltv}-v_{max}}{dt+g*\sin(\alpha)} \end{aligned} \quad (2)$$

Siendo dt la aceleración provocada por el tren  
g la gravedad  
 $\alpha$  la inclinación de la rampa

El tiempo en recorrer la longitud de la LTV desde la cabeza del tren hasta el último vehículo vendrá dado por:



$$T_{lim} = \frac{L_{ltv} + L_{tr}}{v_{ltv}} \quad (3)$$

Siendo  $L_{ltv}$  la longitud de la Ltv  
 $L_{tr}$  la longitud total del tren

En el caso de aplicar el artículo 239.2 del RGC explicado con anterioridad,  $L_{tr} = 0$ .

Para el tiempo empleado en la aceleración tomaremos una expresión similar que para el frenado

$$T_{ac} = \frac{v_{max} - v_{ltv}}{a} \quad (4)$$

$$a = a_t + ag$$

$$T_{ac} = \frac{v_{max} - v_{ltv}}{a_t + g \cdot \sin(\alpha)}$$

Siendo  $a_t$  la aceleración provocada por el tren  
 $g$  la gravedad  
 $\alpha$  la inclinación de la rampa

Las expresiones anteriores permiten calcular un tiempo teórico dependiendo del tipo de tracción, ya que los valores de  $a_t$  y  $dt$  son característicos de cada uno. La ecuación (1) queda:

$$T_{ltv} = \frac{v_{ltv} - v_{max}}{a_t + g \cdot \sin(\alpha)} + \frac{L_{ltv} + L_{tr}}{v_{ltv}} + \frac{v_{max} - v_{ltv}}{a_t + g \cdot \sin(\alpha)} \quad (5)$$

El valor de la inclinación de la rampa puede tomarse directamente de la geometría de la vía a partir del valor de la declividad de la vía en tantos por mil. Esta información es almacenada en bases de datos de inventario de la infraestructura o puede obtenerse de imágenes LIDAR [Gómez Castaño, J].

$$\tan(\alpha) = \text{rampa } \text{‰} \quad (6)$$

Para este trabajo se toma la definición de Rampa Física (Rf) descrita en la Norma Técnica NT-GGC-6, relación entre la diferencia horizontal y la distancia horizontal entre dos puntos dados, expresada en milésimas.

En caso de necesitarse mayor precisión, es necesario hacer una corrección en la Rampa Física para tener en cuenta el radio de curvatura en lugares en curva usando la expresión:

$$\text{declividad} = R_f + (800/R)$$

En la mayoría de casos puede ser costoso conocer tanto el valor de la aceleración como deceleración, por tipo de material motor, así como la pendiente para cada tramo en el que se define una limitación. Para un uso general se han solido tomar los valores proporcionados por diferentes fuentes, que está entre los 0,8 y 1,2 ms<sup>-2</sup>. El tener valores de aceleración fijos para cualquier tipo de tren no dará buenos resultados ya que estos dependen en gran medida del tipo de material. La capacidad de aceleración de un mercancías no se puede comparar a un tren de cercanías o alta velocidad. Para cada tipo de tren deberíamos tener valores adaptados al mismo para obtener la mayor precisión posible

Considerando como caso general la no incidencia de la pendiente, para este tipo de aplicaciones la ecuación (5) se reduce a

$$T_{ltv} = \frac{V_{ltv} - V_{max}}{at} + \frac{L_{ltv} + L_{tr}}{V_{ltv}} + \frac{V_{max} - V_{ltv}}{at} \quad (7)$$

### 3. Resultados

La necesidad de aplicar las correcciones anteriores se muestra en el siguiente gráfico, en la que puede verse la diferencia entre el tiempo empleado si solo se tiene en cuenta la relación entre la longitud de la limitación dividida por la velocidad (rojo) y la resultante de aplicar la corrección (azul). El tiempo al tener en cuenta el tiempo de frenado y aceleración es sustancialmente superior.

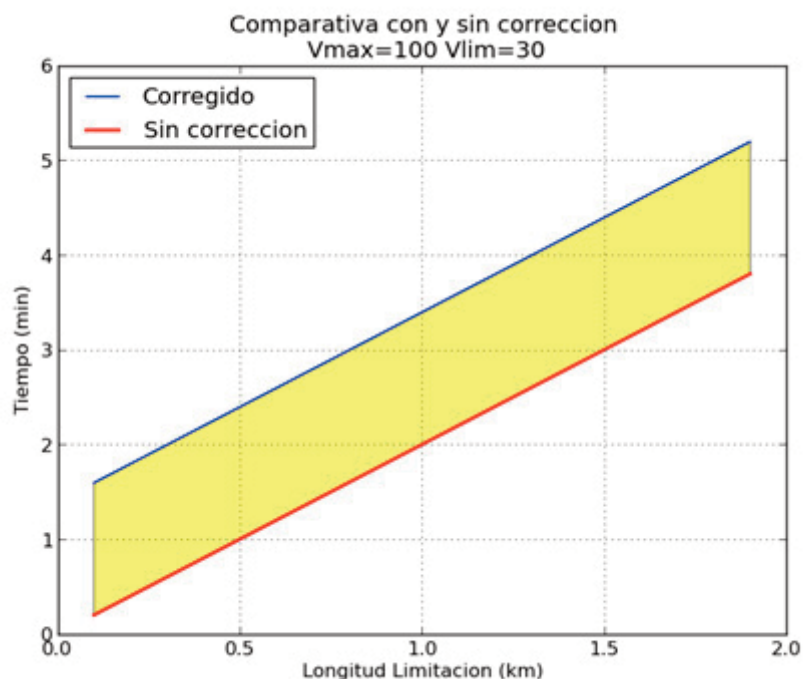


Gráfico de Tiempo empleado en una limitación al aplicar las correcciones y sin ellas

El mayor problema a la hora de la aplicación de esta metodología a un entorno real es sin duda conocer los valores de la aceleración y deceleración por el frenado de los trenes, como se ha dicho en el apartado anterior. A continuación se muestran dos gráficos en los que se puede apreciar el tiempo empleado por un tren de 400 metros, imitaciones con diferente longitud, para distintas velocidades máximas y de paso por la misma. Como puede verse, los valores de aceleración influyen en el tiempo final significativamente.

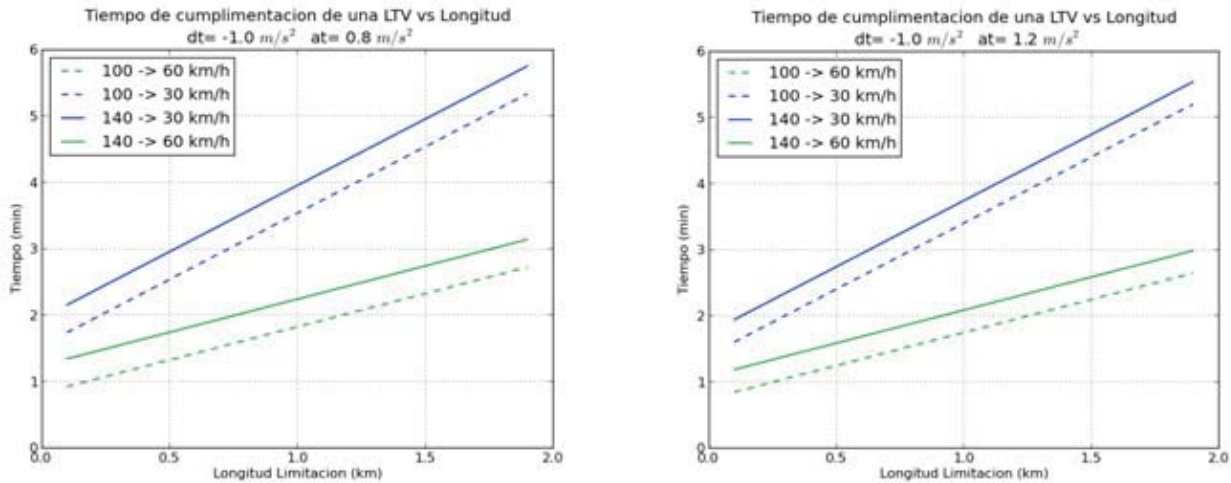


Gráfico de Tiempo empleado en una limitación en función de su longitud para varias aceleraciones

#### 4. Discusión

Como se ha dicho, actualmente se está utilizando la norma técnica NT-PS-03 para el cálculo de las diferencias de tiempo de los trenes al paso por las limitaciones. En ella se establece una metodología para el cálculo de la pérdida de tiempos al paso por una limitación.

Se proporciona una tabla para los valores de la corrección por aceleración y frenado, en función de la velocidad máxima a la que se puede circular y la velocidad de la limitación establecida. En el siguiente gráfico se muestra esta distribución:

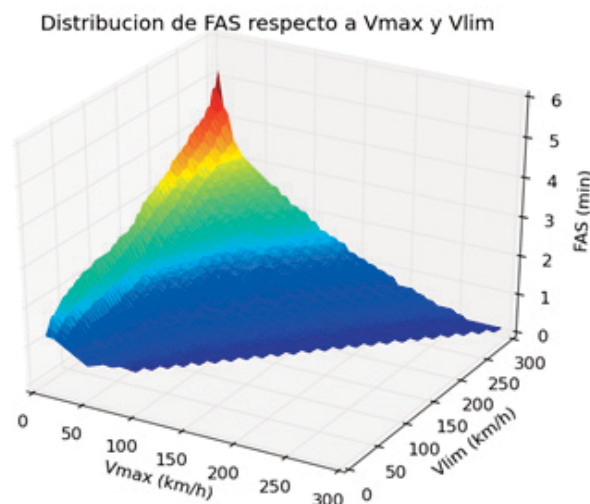


Gráfico de corrección por efecto de la aceleración y frenado FAS

Para hacer una comparación entre los resultados, en el siguiente gráfico se muestra la distribución usando el modelo teórico para valores bajos de aceleración. En él se ha calculado el tiempo perdido en la limitación usando la expresión (7).

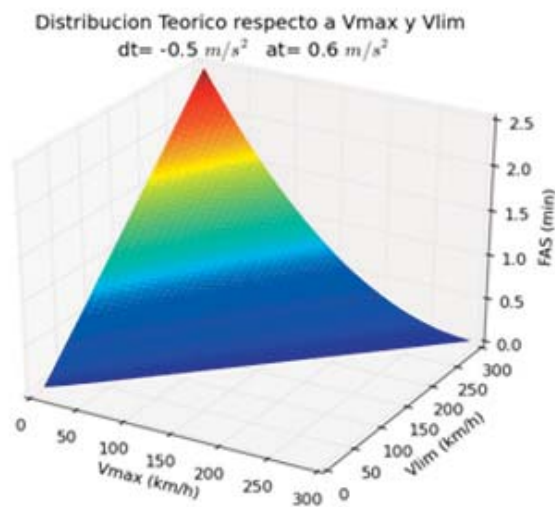


Gráfico de corrección Teórico por efecto de la aceleración y frenado FAS

La diferencia entre ambos queda reflejada en el siguiente gráfico.

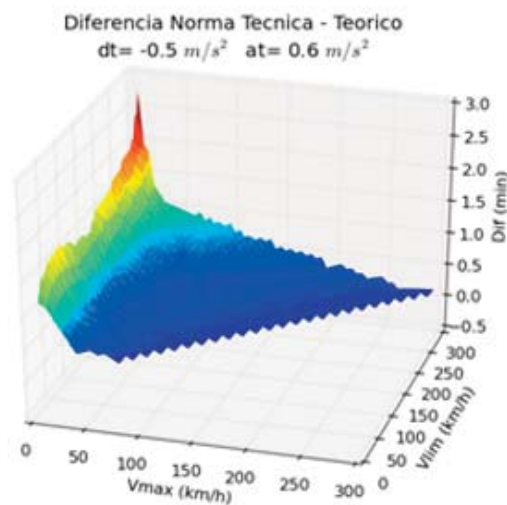
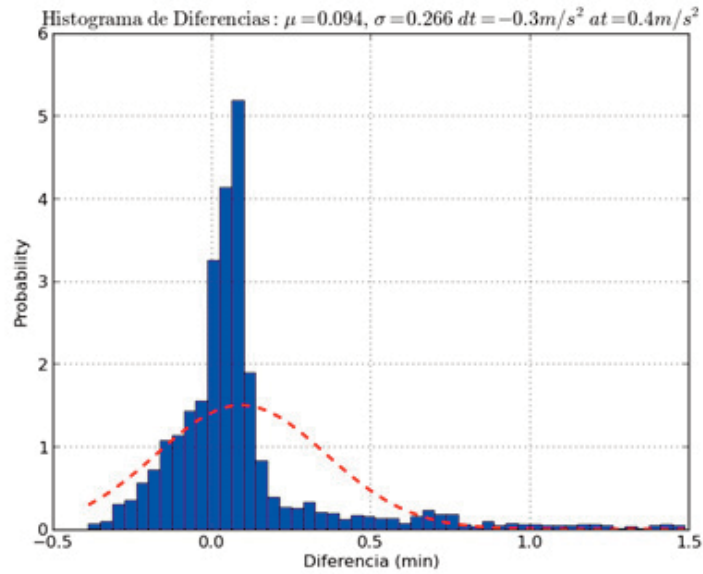


Gráfico de Diferencia entre los valores de la NT y el Modelo Teórico

Por último se ha realizado un análisis de la distribución de estas diferencias para encontrar aquella en la que la aceleración y frenado son más óptimas. A partir de esta distribución el mejor ajuste se produce para valores de **deceleración de  $0,3 \text{ ms}^{-2}$**  y **aceleración de  $0,4 \text{ ms}^{-2}$** . Estos responden a una generalización válida para cualquier tipo de tren y circunstancia de la vía.





A continuación se han analizado las diferencias por separado, tomando como base la velocidad máxima que puede alcanzar una circulación. Para Alta Velocidad por encima de 200 km/h, para viajeros entre 100 y 200 Km/h y para mercancías por debajo de 100 km/h. Se ha reproducido el algoritmo anterior dando estos resultados. La mayor dispersión se obtiene cuando se comparan los resultados con valores muy diferentes entre la  $V_{max}$  y de la limitación.

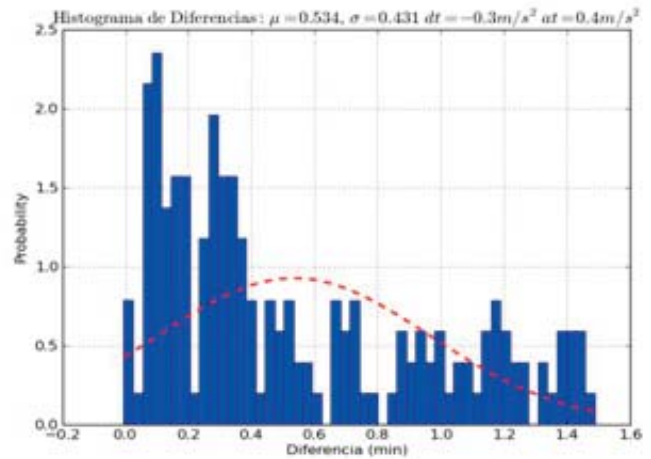
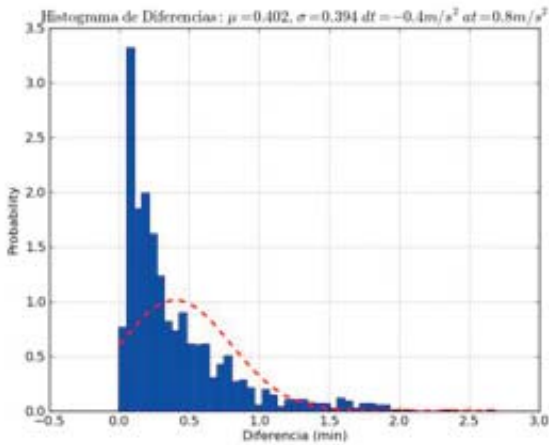
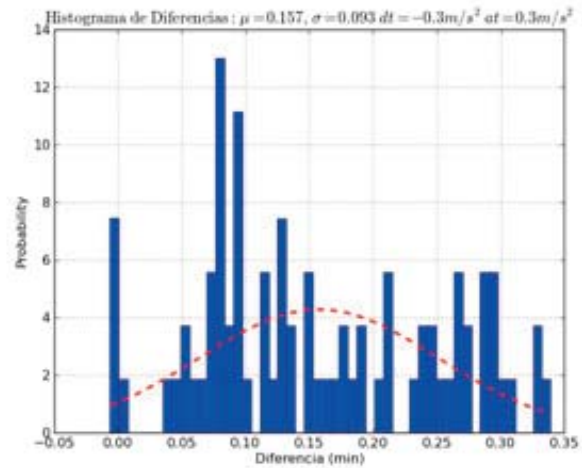
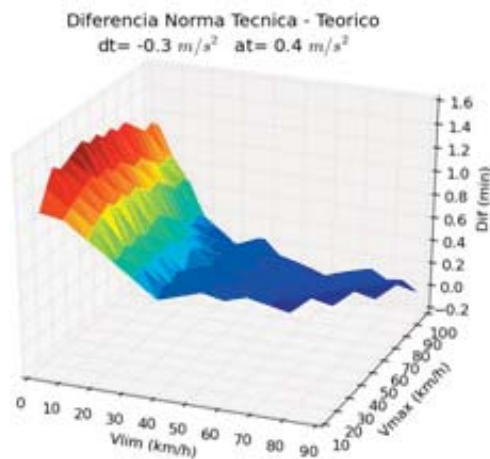


Gráfico de distribución de diferencias para AVE y Viajeros

En el caso de los mercancías, parece existir una mayor discrepancia cuando se trata de velocidades de limitación por debajo de los 30 Km/h.



El resultado para estos intervalos arroja unos valores de frenado y aceleración de  $-0.4 \text{ ms}^{-2}$  y  $0.8 \text{ ms}^{-2}$  para AVE,  $-0.4 \text{ ms}^{-2}$  y  $0.7 \text{ ms}^{-2}$  para el rango de viajeros y de  $-0.3 \text{ ms}^{-2}$  y  $0.4 \text{ ms}^{-2}$  para mercancías

De las comparativas llevadas a cabo se deduce que existe gran dispersión cuando el modelo se lleva a velocidades de limitación bajas, por debajo de 50 km/h en el caso de AVE y de 30 km/h en el de mercancías.

## 5. Validación final del modelo

Para realizar una validación completa del modelo, y poder hacer un cálculo más cercano a la realidad, es necesario comparar los valores del modelo de las ecuaciones (5) y (7) con los reales de las circulaciones.

## 6. Conclusión

Se ha desarrollado una ecuación detallada (5) y otra general (7), que permite calcular el tiempo teórico que emplea un tren en cumplimentar una limitación de velocidad, teniendo en cuenta las Velocidades Máxima del tramo, la Velocidad de Limitación, los valores de la rampa, la deceleración y aceleración del tren, a través del tipo de tren. Este tiempo se puede comparar con el que tardaría el tren en recorrer la misma distancia y así poder obtener el tiempo perdido por causa de la limitación

De la comparación del modelo con la Norma Técnica de ADIF, se han inferido unos valores de deceleración de  $0,3 \text{ ms}^{-2}$  y aceleración de  $0,4 \text{ ms}^{-2}$ . Para estos valores, los tiempos empleados en función de la longitud de la limitación se muestran en la siguiente figura.

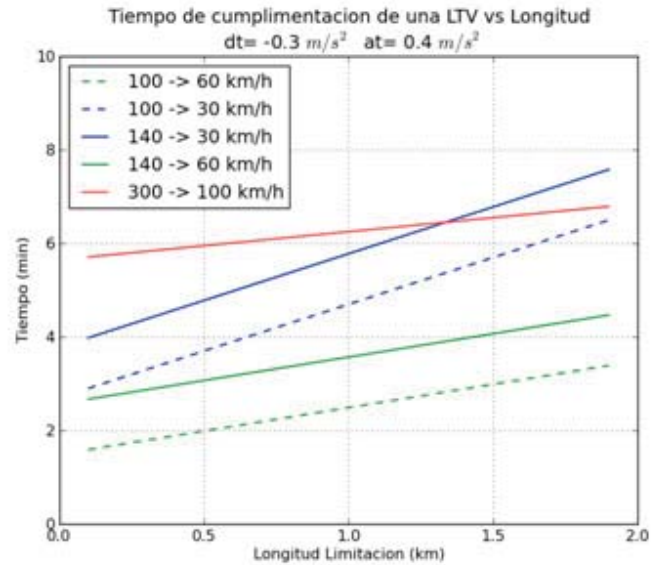


Gráfico de Tiempo empleado en una limitación en función de su longitud

## 7. Referencias

- [1] ADIF, Febrero 1997, “Norma Técnica NT-PS-03, Tiempos por Precauciones”
- [2] ADIF, Norma Técnica NT-GGC-6, Determinación de Cargas Máximas y Rampas características, Mayo 2001
- [3] ADIF, Reglamento General de Circulación
- [4] Gómez Castaño, José, Enero 2012, Uso de imágenes LIDAR para cartografía ferroviaria, <http://www.iderail.es/2012/01/13/usar-imagenes-lidar-para-cartografia-ferroviaria/>

## Análisis de una vía con traviesas cuadro

### *Analysis of a track with frame sleepers*

Fernando Romero Zaragüeta (\*)

Universitat Politècnica de Catalunya

#### Resumen

En los últimos años ha surgido la necesidad de mejorar la infraestructura de vía frente a las crecientes cargas de tráfico que tiene que soportar. Uno de los objetivos para conseguir esta mejora es reducir los esfuerzos y las tensiones que llegan a la capa de balasto. Por este motivo, a finales de los años 90 del siglo XX apareció un nuevo tipo de traviesas, las traviesas cuadro, compuestas por dos traviesas situadas longitudinalmente bajo los carriles y que son unidas, a cada extremo, por una traviesa transversal, adoptando así la forma de un rectángulo o doble H. Con esta disposición se consigue una mayor superficie de apoyo de las traviesas, con lo que las cargas se reparten mejor y el nivel de tensiones que deben soportar el balasto y la plataforma es menor. Además, la propia configuración de las traviesas cuadro confiere a la vía una rigidez más alta que con las traviesas estándares. Actualmente, algunos tramos de líneas austriacas, suizas e italianas están equipados con traviesas cuadro para realizar estudios experimentales, tanto de carácter técnico como económico.

Palabras clave: traviesas cuadro, balasto, tensiones, asientos, momentos flectores.

\* [f.romero.217@gmail.com](mailto:f.romero.217@gmail.com)

#### Abstract

*Over the last years, the need to improve the railway infrastructure has appeared in order to face the growing traffic loads that have to be supported. One of the objectives to obtain this improvement is to reduce the stress and pressure on the ballast layer. This is why a new type of sleepers was created by the end of 1990s, the frame sleepers. They consist of two sleepers placed longitudinally under the rails and joined to one another by two sleepers across them, thus adopting a rectangle or double H form. With this layout, a larger support area for the sleepers is gained, the loads are therefore better spread and the pressure level on the ballast and the platform is lower. Moreover, the configuration of the frame sleepers provides the track with a higher stiffness compared to tracks with standard sleepers. Nowadays, some sections in Austrian, Swiss and Italian rail lines are equipped with frame sleepers so as to carry out technical and economic investigation.*

*keywords: frame sleepers, ballast, stresses, deflection, bending moment.*



## **Resumen**

En los últimos años ha surgido la necesidad de mejorar la infraestructura de vía frente a las crecientes cargas de tráfico que tiene que soportar. Uno de los objetivos para conseguir esta mejora es reducir los esfuerzos y las tensiones que llegan a la capa de balasto. Por este motivo, a finales de los años 90 del siglo XX apareció un nuevo tipo de traviesas, las traviesas cuadro, compuestas por dos traviesas situadas longitudinalmente bajo los carriles y que son unidas, a cada extremo, por una traviesa transversal, adoptando así la forma de un rectángulo o doble H. Con esta disposición se consigue una mayor superficie de apoyo de las traviesas, con lo que las cargas se reparten mejor y el nivel de tensiones que deben soportar el balasto y la plataforma es menor. Además, la propia configuración de las traviesas cuadro confiere a la vía una rigidez más alta que con las traviesas estándares. Actualmente, algunos tramos de líneas austriacas, suizas e italianas están equipados con traviesas cuadro para realizar estudios experimentales, tanto de carácter técnico como económico.

En el presente estudio se realiza un modelo de cálculo de una vía dotada con traviesas cuadro, al que se le aplican dos casos de carga representativos. De esta manera, se puede ver el comportamiento que tiene este tipo de traviesas, así como el conjunto de la vía. Para ello, se analizan ciertos parámetros, como los asientos, los momentos flectores y las tensiones a que se ven sometidos los diferentes elementos de la vía. Estos resultados son comparados con los obtenidos en una vía con traviesas convencionales, considerando los mismos casos de carga. De esta forma, se puede cuantificar la reducción de los parámetros antes mencionados en una vía con traviesas cuadro, una disminución que era intuitiva pero que hasta ahora carecía de valores numéricos. De hecho, tanto los asientos, los momentos flectores, las tensiones y la onda de levante se reducen notablemente, así como la longitud de vía afectada por estos parámetros. Esto implica que la vía es más resistente y soporta mejor las cargas, aumentando su durabilidad.

Por otra parte, también se intenta adaptar el método de Zimmermann empleado para el cálculo de una vía con traviesas convencionales para poder usarlo en vías con traviesas cuadro. Para ello, se parte de los resultados obtenidos con el modelo de cálculo y se intentan ajustar las fórmulas modificando los parámetros necesarios, proporcionando porcentajes de error del ajuste en relación a los valores del modelo.

Las traviesas cuadro tienen un coste de inversión superior al de las traviesas estándares, debido, principalmente, a la existencia de traviesas longitudinales además de las transversales. Sin embargo, la frecuencia de mantenimiento de la vía es más baja, gracias al menor deterioro de la vía, con lo que los costes de mantenimiento son inferiores. No obstante, habría que ver si se compensan con los costes iniciales de inversión o no. En este estudio también se comenta este aspecto económico, dando una visión de lo que se conoce hoy en día al respecto.

## **Abstract**

Over the last years, the need to improve the railway infrastructure has appeared in order to face the growing traffic loads that have to be supported. One of the objectives to obtain this improvement is to reduce the stress and pressure on the ballast layer. This is why a new type of sleepers was created by the end of 1990s, the frame sleepers. They consist of two sleepers placed longitudinally under the rails and joined to one another by two sleepers across them, thus adopting a rectangle or double H form. With this layout, a larger support area for the sleepers is gained, the loads are therefore better spread and the pressure level on the ballast and the platform is lower. Moreover, the configuration of the frame sleepers provides the track with a higher stiffness compared to tracks with standard sleepers. Nowadays, some sections in Austrian, Swiss and Italian rail lines are equipped with frame sleepers so as to carry out technical and economic investigation.

In this project, a computing model of a frame-sleeper track is developed and then run considering two representative load cases. Thereby the behaviour of this type of sleepers can be examined, as well as that of the whole track. To do so, certain parameters are analysed, such as the deflection, the bending moment and the pressure acting on the track elements. These results are compared to those obtained for a track with standard sleepers, considering the same load cases. Thus, it is possible to quantify the reduction of the aforementioned parameters in a track with frame sleepers; this decrease was intuitive but had no numerical values so far. In fact, the deflection, the bending moment, the pressures and the uprising wave of the rail are significantly reduced, as well as the length of track affected by these parameters. This means the track is more resilient and supports better the loads, resulting in higher durability.

Furthermore, an attempt is made to adapt the Zimmermann's method, which is used to calculate a track with standard sleepers, to use it in a frame-sleeper track. To do so, the results obtained by means of the computing model are taken as reference and the equations are modified by tweaking the proper parameters, providing error percentages of the adjustment compared to the model values.

The frame sleepers have a higher investment cost than the standard sleepers. This is due, primarily, to the existence of longitudinal sleepers apart from the across ones. Nonetheless, the maintenance frequency is lower, thanks to the fact that the track does not deteriorate as much, and it results in lower maintenance costs. Therefore it would be worth determining whether this is equal to the investment cost or not. The economic aspect is also covered in this study, giving a view of the current knowledge about it.

## **1. Introducción y objetivos**

En los últimos años ha surgido la necesidad de mejorar la infraestructura de vía frente a las crecientes cargas de tráfico. Uno de los objetivos para conseguir esta mejora es reducir los esfuerzos y las tensiones que llegan a la capa de balasto. Por este motivo, a finales de los años 90 del siglo XX apareció un nuevo tipo de traviesas, las traviesas cuadro. Éstas tienen la particularidad de tener dos traviesas situadas longitudinalmente bajo los carriles y que son unidas, a cada extremo, por una traviesa dispuesta transversalmente en el sentido de la vía. De esta manera adopta la forma de un rectángulo o doble H. Con esta disposición se consigue una mayor superficie de apoyo de las traviesas, con lo que las cargas se reparten mejor y el nivel de tensiones que deben soportar el balasto y la plataforma es menor. Además, la propia configuración de las traviesas cuadro confiere a la vía una rigidez más alta que con las traviesas estándares. Actualmente, algunos tramos de prueba en líneas austriacas, suizas e italianas se han equipado con traviesas cuadro, a fin de realizar estudios experimentales, tanto de carácter técnico como económico.

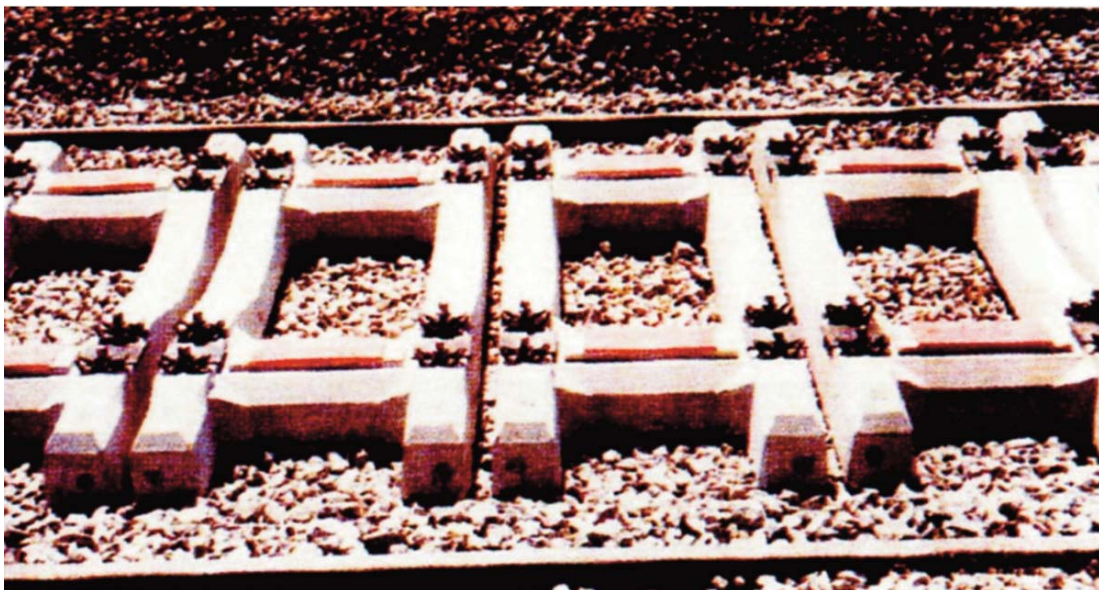
Los objetivos del presente estudio son los siguientes:

- Ofrecer una visión general del estado actual del conocimiento de las traviesas cuadro, explicando en qué consisten, su construcción y mantenimiento y los costes asociados.
- Analizar el comportamiento de una vía con traviesas convencionales frente a esfuerzos verticales, para luego compararlo con el de una vía con traviesas cuadro. Para ello, se partirán de las hipótesis de cálculo conocidas que se emplean para obtener deflexiones, esfuerzos y tensiones en una vía con traviesas estándares.
- Realizar un modelo de cálculo de una vía con traviesas cuadro y ejecutar este modelo con un programa de cálculo apropiado.

- Analizar los resultados obtenidos con el programa de cálculo, valorando varios parámetros, como las deflexiones que se producen en la vía, los esfuerzos y las tensiones.
- Comparar los resultados obtenidos en el cálculo de ambas vías (traviesas cuadro y traviesas convencionales) y establecer relaciones que permitan cuantificar el grado de mejora de un tipo de traviesa respecto del otro.
- Analizar la posible aplicación al cálculo de una vía con traviesas cuadro de las hipótesis empleadas en las traviesas estándares.

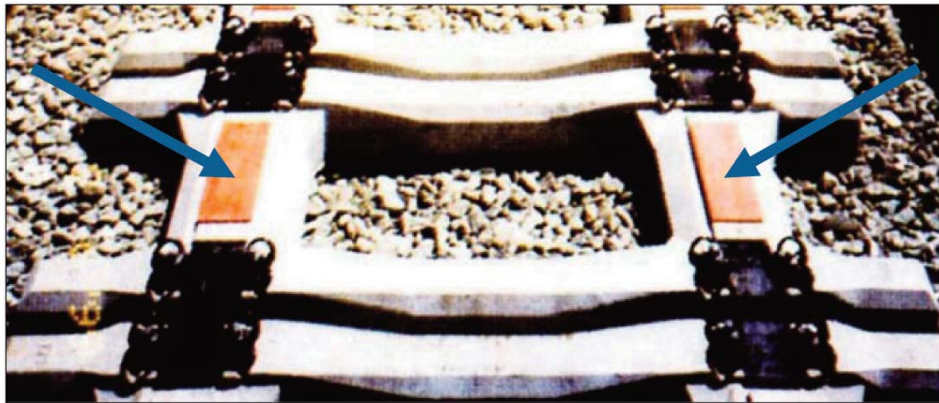
## **2. Estado del conocimiento de las traviesas cuadro**

Las traviesas cuadro tratan de sustituir el tradicional sistema de transmisión de cargas con traviesas cada cierta distancia por un emparrillado, combinando así vigas longitudinales con otras de transversales. El hecho de que también haya traviesas longitudinales implica que la carga se transmite de manera continua en el balasto, reduciendo notablemente el nivel de presiones bajo las traviesas y evitando muchos de los gradientes de presión. En los puntos de intersección de los elementos del cuadro están dispuestos cuatro puntos de fijación de los carriles; entonces cada carril reposa sobre dos apoyos en una traviesa (uno en cada extremo), coincidiendo con los puntos de fijación.



**Figura 1.** Disposición de las traviesas cuadro (Fuente: López Pita (2006))

El carril puede ser sostenido sólo por estos dos puntos de fijación. Pero también podemos asegurarle un apoyo continuo sobre la traviesa. De momento, se han dispuesto entre uno y dos apoyos intermedios elásticos sobre la viga longitudinal de la traviesa cuadro. Estos apoyos elásticos consisten en placas de asiento como las que se ponen en vías convencionales, pero en este caso dispuestas no sólo en los puntos de sujeción del carril, sino también en puntos intermedios. Este aspecto es importante de cara a disminuir las emisiones acústicas debidas a las vibraciones del carril por las circulaciones ferroviarias.



**Figura 2.** Apoyos del carril sobre la traviesa cuadro (Fuente: López Pita (2006))

## **2.1. Construcción y mantenimiento**

Hasta ahora, en todos los tramos de ensayo equipados con traviesas cuadro, éstas se han colocado con la ayuda de grúas pórtico que ponen de 9 a 20 traviesas a la vez, según el tipo de grúa utilizada. Para obtener una geometría correcta de la vía, generalmente se utilizan máquinas que combinan la nivelación, la alineación y el bateo de la vía. Sin embargo, dado que las traviesas cuadro presentan un apoyo longitudinal casi continuo bajo el carril, es imposible utilizar los conjuntos de bateo-nivelación estándares, ya que la existencia de las traviesas longitudinales impide el acceso de los bates de la bateadora al balasto que hay debajo de las traviesas. Sin embargo, las máquinas split-head son perfectamente adaptables a esta tarea porque sus bates pueden acometer el trabajo en ambos lados del carril.

El bateo rápido debajo de los pares de traviesas formados por las traviesas transversales permite obtener una nivelación geométrica excelente procediendo de manera habitual. De hecho, el balasto bajo las dos traviesas transversales contiguas se batea como si hubiese traviesas dobles, dotando con una gran apertura a los instrumentos de bateo y procediendo a la alineación lateral, es decir, asegurar que la traviesa esté en su correcta posición y no esté desplazada transversalmente.

La Sociedad BBW (Bahnbau, Wels) equipó una pequeña máquina de conjuntos de bateo situados transversalmente. Esta máquina, que realizó el bateo transversal en los tramos de ensayo de Timelkam y Mels (Suiza), no dispone de ningún dispositivo de nivelación particular. No obstante, la posibilidad que ofrece la bateadora-niveladora transversal de desarrollar la presión total de bateo, incluido en la dirección transversal, permitió una compactación óptima del balasto en esta zona, pero tenía también el inconveniente de influir sobre la nivelación longitudinal. Aunque estos efectos hayan quedado por debajo de las tolerancias admisibles, conviene concluir que esta operación debe ser realizada con una presión de bateo más débil, lo cual ya se ha tomado en consideración sobre el tramo de ensayo en Cetraro (Italia). No obstante, es posible que, en el caso de una amplia utilización de las traviesas cuadro, en un futuro sea posible desarrollar una máquina adaptada para el bateo y nivelación de la vía, tanto en la dirección longitudinal como transversal.

El tratamiento final estándar de una vía normalmente se efectúa con un estabilizador dinámico, que hunde por vibraciones el bastidor de vía en la cama de balasto comprimiéndolo lo mejor posible. En el caso de las traviesas cuadro, esta operación también se realiza de la misma forma y contribuye al buen comportamiento de la vía frente a esfuerzos transversales a largo plazo.



## 2.2. Costes

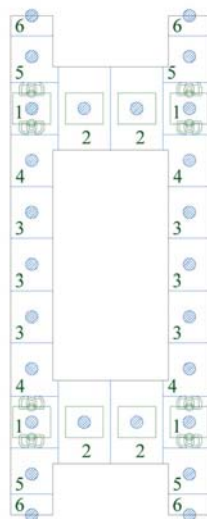
El desarrollo de las traviesas cuadro principalmente pretendía proponer una mejora sustancial a un coste razonable. Si se entiende por “coste” la totalidad de los costes de vida útil, haría falta que el aumento de los costes de inversión fuera compensado, al menos, por la disminución de los costes de mantenimiento. Hoy en día, todavía no es posible prever con toda certeza la evolución de los costes de mantenimiento. Habría que elaborar, pues, una previsión económica a partir de modelos de cálculo.

En términos generales, la ventaja financiera de la vía en traviesas cuadro aumenta con la carga de tráfico. Además, el alargamiento previsible de las duraciones en el uso de este tipo de traviesas aporta notables ventajas económicas en términos de costes de ciclo de vida, aunque los prototipos producidos actualmente son más caros a la hora de comprar que los productos de traviesas estándares. No obstante, las reducciones de costes progresan paralelamente a las cantidades producidas.

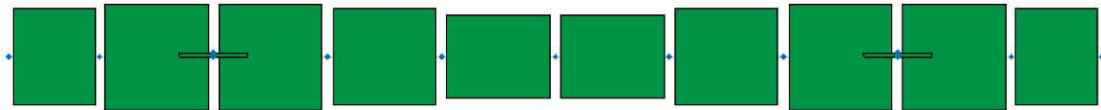
## 3. Modelización de una vía con traviesas cuadro

Para poder comparar el comportamiento mecánico de una vía con traviesas cuadro con el de una vía con traviesas convencionales, se realizó un modelo de un tramo de vía con traviesas cuadro mediante el programa SAP2000. Este programa permite determinar leyes de esfuerzos y deformaciones de una estructura formada por vigas, empleando matrices de rigidez y resolviendo sus correspondientes ecuaciones. En este caso, la estructura consta de un emparrillado compuesto por los carriles y las traviesas cuadro, las cuales tienen apoyos elásticos que simbolizan el lecho de balasto.

Dado que en el programa no es posible proporcionar un apoyo elástico continuo, se elaboró un modelo de apoyo discreto. Entonces, para modelizar el apoyo continuo que ofrece el balasto se dispusieron una serie de apoyos muy seguidos bajo las traviesas, concretamente separados una distancia de 25 cm entre ellos (excepto los apoyos de los extremos de las traviesas transversales, que distan 20 cm de sus apoyos contiguos debido a que la traviesa termina en aquellos puntos). Esta distancia es suficiente para aproximarnos a un apoyo continuo. A su vez, cada apoyo tiene un coeficiente de rigidez obtenido a partir de la capacidad portante asumida para la plataforma y el área de apoyo que ofrecen las traviesas en el apoyo en cuestión. Además, en el modelo la traviesa es un conjunto de vigas consecutivas de longitud muy pequeña, y en cada tramo de traviesa se adopta el valor medio del canto en aquel tramo.



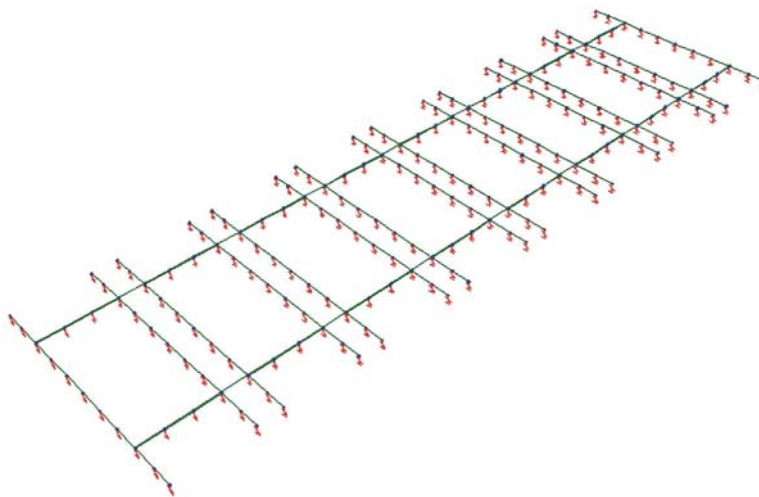
**Figura 3.** Discretización de los apoyos de las traviesas sobre el balasto.



**Figura 3.** Vista en alzado de una traviesa transversal en el modelo de cálculo.

Por su parte, las placas de asiento se modelizaron como una viga de longitud muy corta (7 mm), ya que en el programa no es posible poner un apoyo encima de otra viga. Para que las vigas que simbolizan las placas elásticas de asiento tuvieran el mismo efecto que las mismas, se les dio un módulo de elasticidad correspondiente al valor que suelen tener las placas de asiento. En referencia al carril, el modelo incluye el carril UIC60, el mismo usado en los ejemplos de cálculo de una vía con traviesas convencionales, y se modeliza mediante dos vigas, una para cada hilo de carril, las cuales se dividen en diversos tramos por los puntos de apoyo en las placas de asiento.

El modelo consiste en un tramo de vía con 8 traviesas o, lo que es lo mismo, de 8 metros de longitud, pues cada traviesa tiene 0,95m de longitud y la distancia entre dos traviesas consecutivas es de 0,05m.



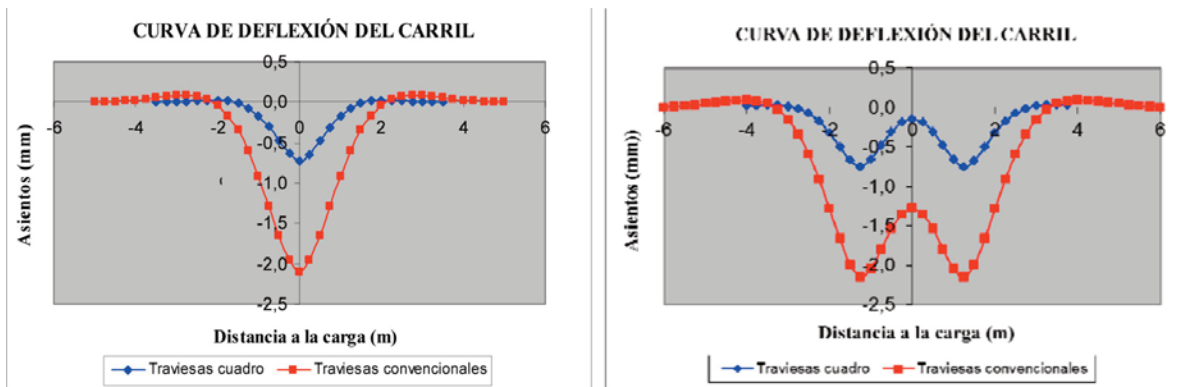
**Figura 4.** Esquema del conjunto de los carriles, las placas de asiento, las traviesas cuadro y sus apoyos sobre el balasto.

#### 4. Análisis comparativo de una vía con traviesas cuadro y una vía con traviesas convencionales

Una vez ejecutado el modelo de una vía con traviesas cuadro, se comparan los resultados con los obtenidos para una vía con traviesas convencionales, donde se aplicó el método de Zimmermann. Se realizan las comparaciones para los asientos, momentos flectores y tensiones, así como para la onda de levante y la rigidez total de la vía.

#### 4.1. Asientos

La deflexión máxima del carril que se produce en una vía con traviesas cuadro representa el 35% de la que se produce en una vía con traviesas convencionales (0,73mm y 2,10mm, respectivamente), considerando los mismos casos de carga. Por otra parte, si se consideran todos los movimientos descendentes que sufre el carril, en el caso de traviesas convencionales la longitud de vía afectada por dichos desplazamientos es de 4,22 metros, mientras que en traviesas cuadro es de 3,25 metros. Por tanto, en vías con traviesas cuadro, prácticamente se reduce 1 metro la longitud de vía afectada por los asientos.



**Figura 5.** Curvas de deflexiones de una vía con traviesas cuadro y una vía con traviesas convencionales bajo la acción de la carga de un eje y de un bogie de dos ejes.

En el caso de carga de un bogie de dos ejes, la relación de deflexiones es la misma, y la reducción de la longitud afectada por los asientos también es de 1 metro.

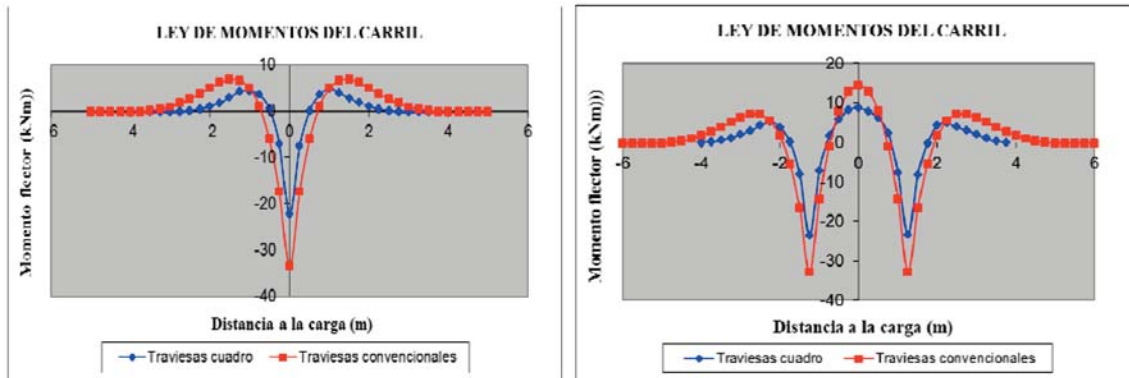
**Tabla 1.** Valores máximos de los asientos en una vía con traviesas convencionales y una vía con traviesas cuadro y relación entre ellos.

Asientos máximos del carril	Carga dinámica de un eje (150 kN/rueda)	Carga dinámica de un bogie (2 ejes, 160 kN/rueda)
$w_{trav.convencionales} (mm)$	2,10	2,15
$w_{trav.cuadro} (mm)$	0,73	0,76
$\frac{w_{trav.cuadro}}{w_{trav.convencionales}}$	0,35	0,35

#### 4.2. Momentos flectores

En cuanto a los momentos flectores, en el punto de aplicación de la carga el momento positivo es máximo y tiene un valor de 33,56 kNm con traviesas convencionales, mientras que el valor es de 22,16 kNm con

traviesas cuadro. Esto significa que la relación entre ambos valores es del 66%. Por su parte, la relación entre momentos flectores negativos de una vía con traviesas cuadro y una vía convencional es del 72%. Además, la longitud de vía afectada por los momentos se reduce en 1,75m en una vía con traviesas cuadro (5,25m frente a 7m).



**Figura 6.** Leyes de momentos flectores de una vía con traviesas cuadro y una vía con traviesas convencionales bajo la acción de la carga de un eje y de un bogie de dos ejes (Fuente: autor)

En el caso de carga de un bogie de dos ejes, los momentos flectores positivos máximos se reducen del 32,99 kNm a 23,68 kNm, con lo que el valor en traviesas cuadro representa el 72% del obtenido en traviesas convencionales. A su vez, la relación entre momentos máximos negativos es del 61%. La longitud de vía afectada también se reduce en 1,75m.

**Tabla 6.3** Valores máximos de los momentos flectores en una vía con traviesas convencionales y una vía con traviesas cuadro y relación entre ellos.

Momentos flectores máximos del carril	Carga dinámica de un eje (150 kN/rueda)	Carga dinámica de un bogie (2 ejes, 160 kN/rueda)
$M_{trav.convencionales}^+$ (kNm)	33,56	32,99
$M_{trav.cuadro}^+$ (kNm)	22,16	23,68
$\frac{M_{trav.cuadro}^+}{M_{trav.convencionales}^+}$	0,66	0,72
$M_{trav.convencionales}^-$ (kNm)	6,90	14,38
$M_{trav.cuadro}^-$ (kNm)	4,95	8,78
$\frac{M_{trav.cuadro}^-}{M_{trav.convencionales}^-}$	0,72	0,61

### 4.3. Tensiones

En referencia a las tensiones, para una vía con traviesas convencionales, el valor de la tensión vertical que llega a la capa de balasto es de 0,210 MPa, mientras que en una vía con traviesas cuadro el valor máximo es de 0,055 MPa. Sin embargo, en este último caso el valor máximo no se alcanza en el punto de aplicación de la carga, sino en los extremos de las traviesas transversales. En las traviesas longitudinales, bajo la carga, la tensión es de 0,051 MPa, por tanto se toma este valor por tratarse del mismo punto, lo que es mejor para comparar. Entonces, la relación entre tensiones en los dos tipos de vía es del 24%. En el caso de carga de un bogie la relación es prácticamente la misma, un 25%.

**Tabla 6.5** Valores máximos de las tensiones en los puntos de aplicación de las cargas y relación de tensiones entre una vía con traviesas cuadro y una vía con traviesas convencionales

Tensiones máximas (puntos de aplicación de las cargas)	Carga dinámica de un eje (150 kN/rueda)	Carga dinámica de un bogie (2 ejes, 160 kN/rueda)
$\sigma_{trav.convencionales}$	0,210	0,215
$\sigma_{trav.cuadro}$	0,051	0,053
$\frac{\sigma_{trav.cuadro}}{\sigma_{trav.convencionales}}$	0,24	0,25

### 4.4. Onda de levante

El levantamiento máximo en una vía con traviesas cuadro representa el 27% del que se produce en una vía con traviesas convencionales (0,024mm frente a 0,090mm), para el caso de una carga de un eje. Además, este levantamiento se sitúa más cerca de la carga en traviesas cuadro, ya que la longitud de vía afectada por los asientos es menor. Entonces, se puede constatar que, en una vía con traviesas cuadro, la onda de levante está mucho más amortiguada que en una vía con traviesas convencionales, y los levantamientos se reducen casi a la cuarta parte. Además, la distancia que hay entre el punto donde se da el levantamiento máximo y el punto de ubicación de la carga se reduce de 2,8 metros en vías con traviesas convencionales a 2,0 metros en vías con traviesas cuadro.

**Tabla 6.6** Valores máximos de los levantamientos y relación de los mismos entre una vía con traviesas cuadro y una vía con traviesas convencionales

	Carga dinámica de un eje (150 kN/rueda)
$w_{levante,trav.convencionales} (mm)$	0,090
$w_{levante,trav.cuadro} (mm)$	0,024
$\frac{w_{levante,trav.cuadro}}{w_{levante,trav.convencionales}}$	0,27



#### 4.5. Rigidez total de la vía

En una vía con traviesas convencionales la rigidez total obtenida era de 71,4 kN/mm, mientras que en una vía con traviesas cuadro era de 205,5 kN/mm. Por lo tanto, el incremento es del 188%.

**Tabla 1.** Valores de la rigidez total de la vía en una vía con traviesas cuadro y una vía con traviesas convencionales

	Vía con traviesas convencionales	Vía con traviesas cuadro
Rigidez total de la vía (kN/mm)	71,4	205,5

#### 5. Adaptación del método de Zimmermann para el cálculo de vías con traviesas cuadro

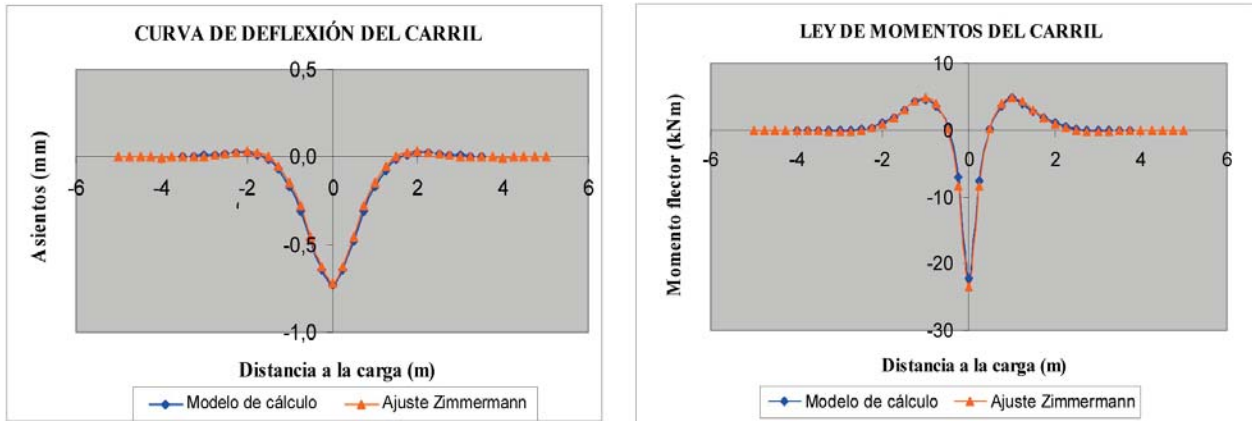
Una vez obtenidos los resultados del cálculo del modelo de una vía con traviesas cuadro, se intenta realizar una adaptación del método de Zimmermann, empleado para el cálculo de una vía con traviesas convencionales, al cálculo de una vía con traviesas cuadro. Las fórmulas de Zimmermann utilizadas para calcular asientos y momentos flectores en una vía con traviesas convencionales son las siguientes:

$$w(x) = \frac{Q}{2k} \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \cdot \eta(x) \qquad M(x) = \frac{Q}{4} \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}} \cdot \mu(x)$$

Como se ha podido observar en los gráficos de las curvas de deflexiones y momentos flectores obtenidas con el modelo para el caso de una vía con traviesas cuadro, éstas tienen prácticamente la misma forma que en el caso de una vía con traviesas convencionales. Por lo tanto, las expresiones  $\eta(x)$  y  $\mu(x)$  que son las que determinan la forma de las curvas, deben permanecer iguales. Los parámetros E, I, correspondientes al módulo de elasticidad y el momento de inercia del carril, tampoco pueden cambiarse, ya que son las propiedades intrínsecas del carril. En consecuencia, el único parámetro que puede modificarse para llegar a obtener las mismas curvas que las obtenidas en el modelo de vía con traviesas cuadro es la rigidez por metro lineal de los distintos apoyos. Si se realizan diversos tanteos, probando distintos valores de k, al final se obtiene un valor con el cual las curvas de Zimmermann se ajustan muy bien a las curvas obtenidas con el modelo de cálculo. Este valor es el siguiente:

$$k = 1,67 \cdot 10^8 \text{ N / m / m} = 167 \text{ kN / mm / m}$$

En las siguientes ilustraciones se puede apreciar cómo, efectivamente, se ha logrado un buen ajuste de las curvas de Zimmermann en relación a las curvas del modelo.



**Figura 7.** Curvas de deflexiones y ley de momentos flectores obtenidas mediante el modelo de cálculo y con el ajuste de las fórmulas de Zimmermann bajo la acción de la carga de un eje Esquema del conjunto de los carriles, las placas de asiento, las traviesas cuadro y sus apoyos sobre el balasto.

Efectivamente, sólo hay un 1% de diferencia entre el valor calculado y el valor ajustado en el caso de las deflexiones máximas, mientras que la diferencia es del 6% para los momentos flectores máximos.

Por otro lado, la rigidez por unidad de longitud es un parámetro que depende del coeficiente de balasto, del área de apoyo de las traviesas y de la distancia entre apoyos. Entonces, si el coeficiente de Winkler es un parámetro variable en función del estado del balasto y la plataforma, la relación entre el área de apoyo de las traviesas y la distancia entre apoyos es la siguiente.

$$\frac{F}{d} = \frac{k}{c} = \frac{1,67 \cdot 10^8 \text{ N/m/m}}{10^8 \text{ N/m}^3} = 1,67 \text{ m}$$

Por lo tanto, para una vía con traviesas cuadro se puede escribir la rigidez media de los apoyos por unidad de longitud en función del coeficiente de balasto, de la siguiente forma:

$$k = 1,67 \cdot c$$

De esta manera se puede aplicar el método de Zimmermann en vías con traviesas cuadro modificando únicamente el valor de la rigidez media de los apoyos por unidad de longitud. Los resultados obtenidos se aproximan satisfactoriamente a los obtenidos con el modelo de cálculo, luego las fórmulas de Zimmermann son perfectamente aplicables en caso de que no se disponga de ningún modelo, pero con la restricción de que solamente se pueden obtener los asientos y momentos en el carril, y no en las traviesas.

## 6. Conclusiones

Una vez realizado el estudio de una vía con traviesas cuadro analizando su comportamiento mecánico frente a esfuerzos verticales, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- En general, una vía con este tipo de traviesas admite una capacidad más grande de carga que una vía con traviesas convencionales, al reducirse los asientos, esfuerzos y tensiones. Asimismo, ofrece una mejor estabilidad al ser el conjunto de la vía más rígido. Estas ventajas resultan del aumento

sustancial de la superficie de contacto traviesa-balasto. Como consecuencia, disminuye la velocidad de degradación de la geometría de la vía, lo que implica una reducción sustancial de las necesidades de mantenimiento. Las traviesas cuadro podrán ofrecer de ahora en adelante una alternativa para la realización de una vía sobre balasto reforzada capaz de acoger cargas por eje y velocidades más elevadas.

- El alargamiento previsible de las duraciones en el uso de este tipo de traviesas aporta notables ventajas económicas en términos de costes de ciclo de vida, aunque los prototipos producidos actualmente son más caros que los productos de traviesas estándares.

- En una vía con traviesas cuadro los elementos sometidos a flexión son el carril y la parte longitudinal de las traviesas, a diferencia de una vía con traviesas convencionales, donde el carril es el único elemento considerado a efectos de cálculo de esfuerzos y deflexiones.

- Tanto para la aplicación de carga de un eje como de un bogie, el asiento máximo del carril en una vía con traviesas cuadro representa el 35% del valor del asiento en una vía con traviesas convencionales. Es decir, los asientos se reducen un 65%. La longitud de vía afectada por los asientos en una vía con traviesas cuadro es 1 metro inferior respecto de una vía equipada con traviesas convencionales.

- El momento flector positivo máximo del carril en una vía con traviesas cuadro representa el 66% del valor obtenido con traviesas convencionales para el caso de carga de un eje, lo cual significa una reducción del 34%. Si se considera el momento flector negativo máximo en valor absoluto, la relación entre ambos valores es del 72%, es decir, la reducción es del 28%. Los valores para el caso de carga un bogie de dos ejes son similares. Además, la longitud de vía sometida a las leyes de momentos flectores disminuye 1,75 metros con traviesas cuadro respecto de las traviesas estándares.

- Las tensiones máximas que llegan a la capa de balasto en una vía con traviesas cuadro se reducen a la cuarta parte en relación con una vía con traviesas convencionales. En concreto, las tensiones disminuyen de 0,210 a 0,051 MPa para el caso analizado de carga de un eje de 150 kN por rueda, mientras que para la carga de un bogie de dos ejes con 160 kN por rueda las tensiones pasan de 0,215 a 0,053 MPa.

- En una vía con traviesas cuadro, la onda de levante está mucho más amortiguada que en una vía con traviesas convencionales, y los levantamientos se reducen casi a la cuarta parte. Además, la distancia que hay entre el punto donde se da el levantamiento máximo y el punto de ubicación de la carga se reduce de 2,8 metros en vías con traviesas convencionales a 2,0 metros en vías con traviesas cuadro.

- La rigidez total de una vía con traviesas cuadro es notablemente mayor que la de una vía con traviesas convencionales. En el primer tipo de vía, la rigidez es de 205,5 kN/mm, mientras que en el segundo es de 71,4 kN/mm. Por lo tanto, el incremento es del 188%.

- En caso de no disponer de ningún modelo de cálculo de una vía con traviesas cuadro se pueden emplear las fórmulas de Zimmermann modificando únicamente el valor de la rigidez media de los apoyos por unidad de longitud, adoptando  $k = 1,67 \cdot c$  ( $c$  debe estar en N/m<sup>3</sup> y  $k$  en N/m/m). De esta manera se le proporciona a los apoyos una mayor rigidez. A pesar de que el modelo de cálculo se aproxima mejor a la realidad, el método de Zimmermann adaptado a vías con traviesas cuadro se ajusta muy bien al modelo, siendo las diferencias en los parámetros calculados inferiores al 6%.

## 7. Referencias bibliográficas

- [1] BACHMANN, H. et al. (2003). *Wide-Sleeper Track-Gains Official Approval*. International Railway Journal, May, 45-47.
- [2] BALUCH, H. (1979). *Evaluations of the durability of rail fastenings to sleepers using a model of extremes*. Rail International / Schienen der Welt.
- [3] BOS, J.A. (1999). *Low Noise Track*. Rail International / Schienen der Welt. Vol.30, nº1, pp. 17-22.
- [4] BOS, J.A. *Deck Track: Foundation for the railways of the future*. Holland Rail Consult.
- [5] CARRASCAL, I. A. (et. al.) (2005). *Comportamiento dinámico de placas de asiento de sujeción de vía de ferrocarril*. Vol.22. “Anales de mecánica de la fractura”. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria.
- [6] CEN: European Committee for Standardization. (1998). *Railway applications – Track – Concrete sleepers and bearers prEN13146*. Draft version.
- [7] CEN: European Committee for Standardization. (1999). *Railway applications – Track – Performance requirements for fastenings systems prEN13481*. Draft version.
- [8] CICCPC: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. (1991). *Symposium internacional de traviesas ferroviarias prefabricadas de hormigón*. Monografías
- [9] COLLARDEY, B. (1998). *L’itinéraire du Semmering aura son tunnel de base*. Rail Passion. Août-Septembre, nº 22, 30-32.
- [10] *Cost and Risk Optimisation of Track Maintenance and Renewal*. Track MR 2001 Conference, London, UK. 2001.
- [11] DEAN, F.E., et al. (1982). *Effect of the tie pad stiffness on the impact loading of concrete ties*. Heavy Haul Conference.
- [12] DIETERMAN, H. and METRIKINE, A.V. (1997). *Steady-state displacements of a beam on an elastic half-space due to a uniformly moving constant load*. European Journal of Mechanics A/Solids. Volume 16, pp. 295-306.
- [13] EBERSOHN W. and RUPPORT S.C. *Implementing a railway infrastructure maintenance system*.
- [14] ESVELD, C. (2001). *Modern Railway Track*. Second Edition. MRT Productions. ISBN 90-800324-3-3. TU Delft.
- [15] FORTÍN, J.P. (1982). *La déformée dynamique de la voie*. Revue Générale des Chemins de Fer, Février, 93-102.
- [16] FURUKAWA, A. (2004). *A method to predict track geometry-induced vertical vehicle motion*. QR of RTRI, Vol. 45, nº 3, 142-148.

- [17] GETZNER. *Designed Elasticity for Railway Superstructures*.
- [18] GUIDAT, A. (2005). *La maintenance du rail: une nécessité*. Revue Générale des Chemins de Fer, novembre, 17-33.
- [19] HÉTENYI, M. (1971). *Beams on elastic foundations*. University of Michigan.
- [20] KERR, A.D. (1975). *RailTrack Mechanics and Technology* (Proceedings of a Symposium Held at Princetown University). ISBN: 0-08-021923-3.
- [21] KERR, A.D. (2003). *Fundamentals of Railway Track Engineering*. Simmons-Boardman Books, ISBN 0-911382-40-2.
- [22] LEYKAUF, G. et al. (2004). *Investigaciones y experiencias con traviesas provistas de almohadillas*. (Traducción española de la F. Ferrocarriles del original alemán). Eisenbahn Ingenieur, 6.
- [23] LÓPEZ PITA, A. y OTEO C. (1977). *Análisis de la deformabilidad vertical de una vía férrea mediante el método de elementos finitos*. Revista AIT, Abril, 33-40.
- [24] LÓPEZ PITA, A. (1984). *Parámetros fundamentales en el asiento de la vía: su influencia relativa*. Revista AIT, enero/febrero, 40-57.
- [25] LÓPEZ PITA, A. (1984). *Interacción vía-vehículo*. Curso de Ferrocarriles. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Tomo VIII. ISBN 84-7493-09.
- [26] LÓPEZ PITA, A. (2006). *Infraestructuras ferroviarias*. Ediciones UPC. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Catalunya.
- [27] MULLER, F.H. et al. (2001). *Traviesas de hormigón con suela elástica. Experiencias y conocimientos con un nuevo componente*. ETR, marzo, 90-98 (Traducción española TE 004/05).
- [28] RIESSBERGER, K. (1997). *New Transition Geometry*. In: "High speed track course". PAO Delft. The Netherlands.
- [29] RIESSBERGER, K. (2000). *Frame sleepers adapt ballasted track to modern needs*. Railway Gazette International 2.
- [30] RIESSBERGER, K. (2000). *La voie sur traverses-cadres: une voie sur ballast innovante*. Eisenbahn Technische Rundschau.
- [31] RIESSBERGER, K. (2000). *Das Rahmen-Schwellen-Gleis*. ÖVG-Oberbaufachtagung Salzburg, ÖVG-Spezial Volume 46.
- [32] RIESSBERGER, K., et al. (2000). *La voie sur traverses-cadres: état de développement*. ZEV-DET Glassers Annalen 6.
- [33] RIESBERGER, K. (2001). *Frame sleeper upgrade ballast track*. WCRR Cologne.



[34] RIESSBERGER, K. (2002). *Frame-sleeper track promises a longer life*. Railway Gazette International. July, 369-372.

[35] RIESSBERGER, K. (2003). *Les traverses-cadres: un perfectionnement de la voie sur ballast*. Rail International. Vol. 34. Décembre, 10-19.

[36] RIESSBERGER, K. (2005). *The project "Frame Sleeper Track"*. ZEV Rail Glassers Annals, 56-60. February. Special edition ÖVG.

[37] ZIMMERMANN, H. (1941). *Die Berechnung des Eisenbahnberbaues*. 3ª edición. Wilhelm Ernst und Sohn.

[38] UNBEHAUN, O. (2000). *Breitschwellengleis – erset Testergebnisse*. Eisenbahningenieur.

[39] WAKUI, H. and MATSUMOTO, N. (1999). *La traverse-échelle posée sur ballast et ses perspectives*. ETR 48.

## Diseño de Redes de Comunicaciones bajo las Restricciones Típicas de un Entorno Ferroviario

### *Communications Network Design under Constraints of Typical Railroad Environment*

José Higuera Soler (\*)  
INECO

#### Resumen

Una Red de Telecomunicaciones es un sistema imprescindible en la arquitectura global de una línea ferroviaria. La distribución a lo largo de toda la línea de servicios asociados a elementos clave para la movilización segura de trenes tales como la transmisión de señales ferroviarias, la gestión de la energía de catenaria, la comunicación entre el maquinista y el controlador de circulación, o los servicios necesarios para el mantenimiento de la propia línea, se tornan imprescindibles. Tal es el caso que la pérdida de disponibilidad de cualquier elemento en una red de telecomunicaciones de una línea ferroviaria puede suponer la no viabilidad de la misma y por tanto la imposibilidad de circulación de máquinas comerciales. Sin entrar en más detalles sobre la tipología de los servicios ni sus requisitos de disponibilidad, existe una serie de características asociadas a la propia arquitectura física de una línea ferroviaria cuyo estudio nos puede facilitar la optimización del diseño de su red de telecomunicaciones.

En el presente artículo, se hace un estudio de las mencionadas características para poder establecer ciertos criterios de diseño aplicando estas restricciones a las herramientas clásicas en el diseño de redes como la teoría de grafos, de tal modo que tras un pequeño estudio del modelo de grafo y los recursos disponibles, podamos diseñar una red con la mayor disponibilidad.

Como conclusión final, en este artículo se demuestra que la inclusión de las restricciones de los entornos ferroviarios a las herramientas clásicas de diseño de redes, nos proporcionan modelos más efectivos en el problema NP de optimización de redes.

Palabras clave: Telecomunicaciones, diseño, redes, grafos, confiabilidad, costes, ferroviarias

#### Abstract

*A Telecommunications Network is a system essential to the overall architecture of a railway line. The distribution along the entire line of services associated with key elements for safe movement of trains such as railway signal transmission, the power management catenary, communications between train drivers and traffic controllers, or services necessary for the maintenance of the line, becoming indispensable. Such is the case that the loss of availability of any element in a telecommunications network of a railway line can lead to non-viability and hence the impossibility of movement of business machines. Without going into more detail on the types of services and their availability requirements, a number of characteristics associated with physical architecture of a railway line whose study can facilitate the optimization of the design of its telecommunications network.*

*In this paper, we study the aforementioned characteristics to establish certain design criteria applying these restrictions to the classic tools in the design of networks as graphs theory, so that after a short study graph model and the resources available, we can design a high availability network.*

*As a final conclusion, this article shows that the inclusion of rail environments restrictions to the classic tools of network design, we provide more effective models in the NP network optimization problem.*

*keywords: Telecommunications, design, networking, graph, reliability, costs, rail*

\* [jose.higuera@ineco.es](mailto:jose.higuera@ineco.es)

## 1. Una Red de Telecomunicaciones en un Entorno Ferroviario

La construcción de una Red de Telecomunicaciones en la actualidad bajo un entorno Ferroviario se realiza habitualmente sobre una infraestructura de fibra óptica tendida sobre dos canaletas situadas a ambos lados de la vía. Un cable de N fibras ópticas es capaz de dotar a la red de N servicios de fibra que podemos duplicar a través de ambas canaletas.

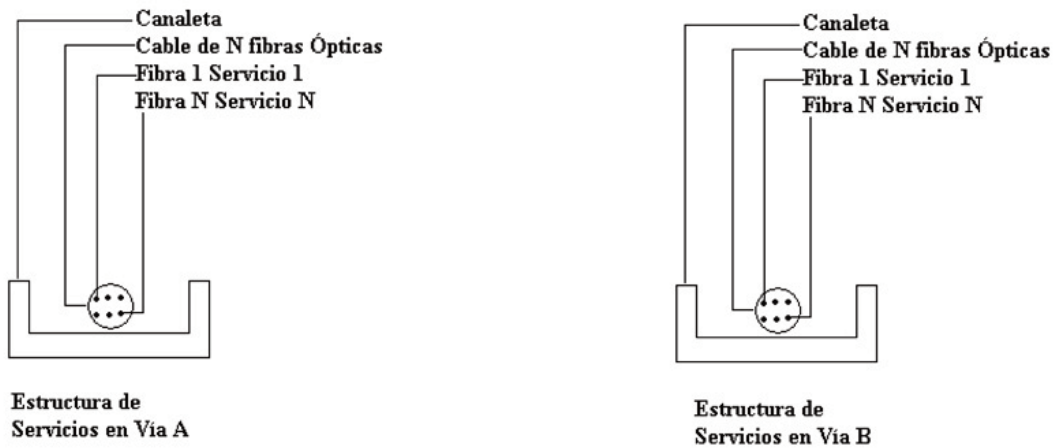


Fig 1. Estructura básica de la Red de FO en una línea Ferroviaria.

Cada uno de estos N servicios nos permite crear los distintos enlaces en nuestra red de Telecomunicaciones.

Una red puede ser modelada a través de un grafo simple (Brecht, 1995)  $G = (V, E)$  donde  $V[j] = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  es el conjunto de n nodos que representan los centros de comunicaciones de la red y  $E[k] = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$  es el conjunto de los m enlaces que los unen.

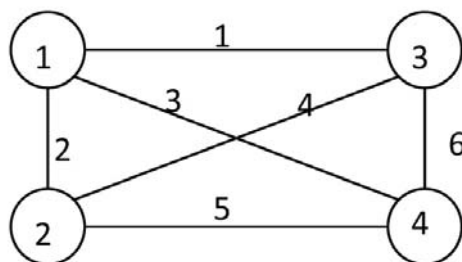


Fig 2. Grafo con 4 nodos y 6 enlaces

Si suponemos un grafo simple, tal cual se muestra en la figura 2 en el que disponemos de 4 nodos que en un ámbito ferroviario estarán situados en 4 puntos distintos de la línea unidos por 6 enlaces que estarán distribuidos dentro de los servicios de fibra disponibles en las 2 canaletas. La figura 3 nos muestra cómo sería una distribución real de los 6 enlaces en una arquitectura con 2 cables de N fibras ópticas.

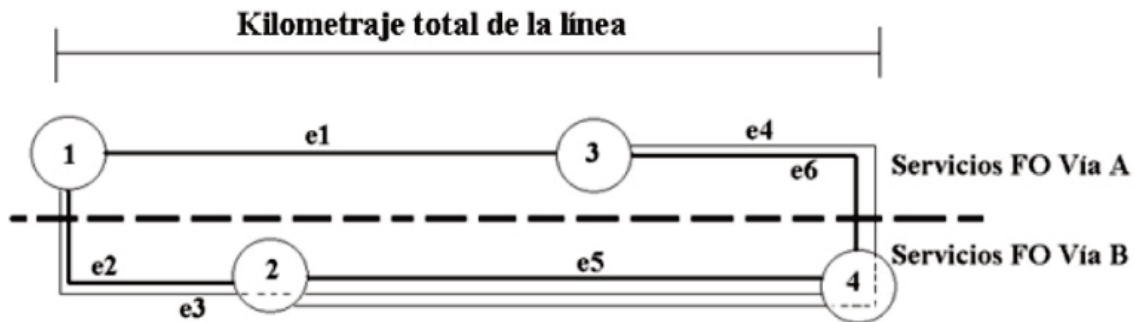


Fig 3. Ejemplo de distribución de un grafo con 4 nodos y 6 enlaces en una arquitectura de 2 cables de fibra óptica.

### 1.1. Cálculo de Costes.

Podemos determinar el coste de un enlace como la suma de los costes de los puertos de los nodos más el coste del cable necesario para unirlos:

$$C_{\text{enlace}[k(i,j)]} = C_{\text{Puerto}(i,j)} + C_{\text{Puerto}(j,i)} + C_{\text{Cable}(i,j)}$$

Teniendo en cuenta lo observado en la figura 3, podemos determinar que el coste de los cables en una red ferroviaria será siempre una constante igual a la suma de los dos cables de fibra de ambos lados de la vía.

$$C_{\text{Cable } e1} = C_{\text{Cable víaA entre n1 y n3}};$$

$$C_{\text{Cable } e2} = C_{\text{Cable víaB entre n1 y n2}};$$

$$C_{\text{Cable } e5} = C_{\text{Cable víaB entre n2 y n4}};$$

$$C_{\text{Cable } e6} = C_{\text{Cable víaA entre n3 y n4}};$$

$$C_{\text{Cable } e4} = 0; \text{ ya que está incluido en } C_{\text{Cable } e5} + C_{\text{Cable } e6};$$

$$C_{\text{Cable } e3} = 0; \text{ ya que está incluido en } C_{\text{Cable } e2} + C_{\text{Cable } e5};$$

De este modo observamos lo siguiente:

$$C_{\text{Cable vía A}} = C_{\text{Cable } e1} + C_{\text{Cable } e6};$$

$$C_{\text{Cable vía B}} = C_{\text{Cable } e2} + C_{\text{Cable } e5};$$

Entonces:

$$C_{\text{Cable}} = C_{\text{Cable vía A}} + C_{\text{Cable vía B}}$$

Podemos determinar que el coste total del cable es independiente del número de enlaces que tenga el grafo.

Suponiendo que el coste de los puertos es siempre el mismo  $C_p$ , el coste total de los enlaces de un grafo de  $n$  nodos y  $m$  enlaces en un ámbito ferroviario se puede simplificar como:

$$C = m \cdot (C_p) + C_{\text{Cable}}$$

Por otro lado, observando empíricamente los datos referentes a precios de mercado podemos aproximar la siguiente relación:

$$C_{\text{Cable}}[1\text{Km}] \approx C_p$$

Es decir, el coste de los dos puertos ópticos de un enlace es equivalente (al menos en orden de magnitud) al coste de un kilómetro de cable de fibras ópticas, por lo que si establecemos que el coste de un kilómetro es 1:

$$\text{Si } C_{\text{Cable}}[1\text{Km}] \approx C_p = 1 \rightarrow C = m + C_{\text{Cable}};$$

Donde  $C_{\text{Cable}}$  será aproximadamente doble la distancia en Km de la línea.

Por lo cual, siempre que se cumpla que el número de enlaces sea muy inferior al kilometraje de la línea:

$$\text{Si } m \ll C_c \rightarrow C \approx C_c$$

Podemos determinar que el coste total de los enlaces es prácticamente independiente del número de enlaces que tenga el grafo.

## 1.2. Cálculo de Confiabilidad.

Para calcular la confiabilidad de una red independientemente del tiempo, emplearemos un modelo de probabilidad discreto. Los componentes de la red (nodos y enlaces) pueden estar en uno de dos estados: operativo o caído, independientemente de los estados del resto de componentes.

Si partimos del grafo  $G(V, E)$ , donde  $e$  es un enlace  $E$  siendo  $E$  el conjunto de todos los enlaces entre los elementos  $v \in V$  y siendo  $E'$  el conjunto de enlaces operativos, será  $G(V, E')$  un grafo tal que  $E' \subseteq E$  y por tanto  $E' \leq E$ . Siendo  $p_e$  la probabilidad de que un enlace esté operativo y  $q_e = 1 - p_e$ , la probabilidad de que el mismo esté caído. Si  $\Omega$  es el conjunto de todos los posibles estados operacionales  $G(V, E)$ , la confiabilidad exacta de la red estará dada por la siguiente expresión (Dengiz, 1997):

$$R(G) = \sum_{\Omega} \left[ \prod_{e \in E'} p_e \right] \cdot \left[ \prod_{e \in E \setminus E'} q_e \right]$$

Podemos determinar la probabilidad de un enlace como la conjunción entre la probabilidad de que el cable esté operativo y que además los dos puertos que lo unen también lo estén.

$$p_e = p_C * p_{Pa} * p_{Pb};$$

Si los puertos son iguales, entonces:

$$p_p = p_{Pa} = p_{Pb};$$

Por lo cual:

$$p_e = p_C * p_p;$$

Para obtener  $R(G)$  calcularemos de forma independiente la confiabilidad en función de los puertos y los cables, tal que:

$$R(G) = R(G)_p * R(G)_C$$



Para para  $R(G)_P$  tendremos que emplear la expresión de Dengiz, no obstante, en el cálculo de  $R(G)_C$ , el ámbito ferroviario aún nos deja otra sorpresa.

Si observamos de nuevo la figura 3, nos damos cuenta de las siguientes interdependencias entre las disponibilidades del cable en los distintos enlaces:

$$P_{ce1} = P_{\text{Cable víaA entre n1 y n3}}$$

$$P_{ce2} = P_{\text{Cable víaB entre n1 y n2}}$$

$$P_{ce5} = P_{\text{Cable víaB entre n2 y n4}}$$

$$P_{ce6} = P_{\text{Cable víaA entre n3 y n4}}$$

$p_{Ce4}$  está incluida en  $p_{Ce5}$  y  $p_{Ce6}$  y del mismo modo,  $p_{Ce3}$  está incluida en  $p_{Ce2}$  y  $p_{Ce5}$ .

Podemos observar esta dependencia cortando el cable en los distintos puntos de la figura 3; por ejemplo si se pierde la disponibilidad del cable entre n1 y n2, se perderán los enlaces 1 y 3. Así para calcular  $R(G)_C$ , podemos simplificar el  $G(E,V)$  tal y como se observa en la figura 4.

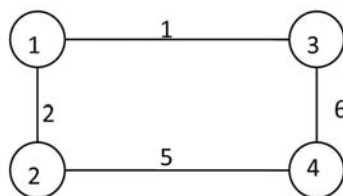


Fig 4.  $G(E,V)$  simplificado para el cálculo de  $R(G)_C$

Para el cálculo de  $R(G)_C$  podremos utilizar la siguiente simplificación (Jan, 1993):

$$R(n) = p_e^n + np_e^{n-1}q_e$$

De este modo podemos concluir que para el cálculo de la confiabilidad de un grafo de n nodos y m enlaces en función de la disponibilidad del cable  $R(G)_C$  en un entorno ferroviario sea:

$$R(G)_C = p_{ce}^n + np_{ce}^{n-1}q_e$$

## 2. Aplicación.

Suponemos una línea ferroviaria con una distancia total  $D = 186\text{Km}$  que dispone de un total de 9 emplazamientos principales a los cuales debemos dar servicio con una red Backbone de Telecomunicaciones de Alta Disponibilidad cuyo esquema general de vías se corresponde con el de la figura 5.

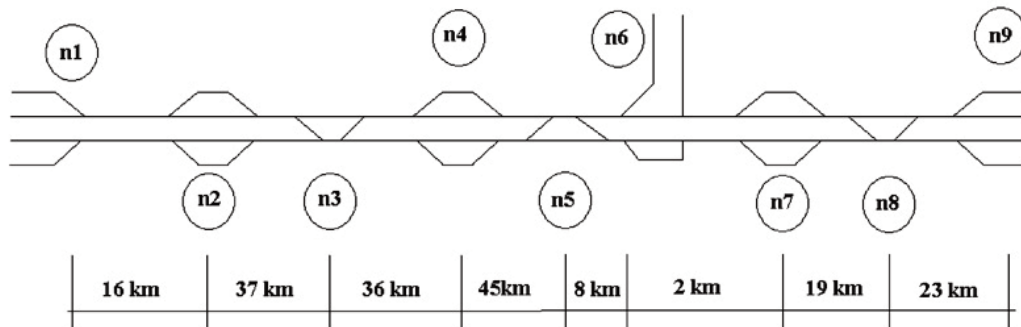


Fig 5. Ejemplo de esquema general de vías  $D=186$  y  $N=9$ .

Como se ha explicado en el anterior apartado, se tendería el cable de fibras ópticas a ambos lados de la vía, de tal modo que inicialmente uniríamos los nodos en forma de anillo, tal y como se representa en la figura 6.

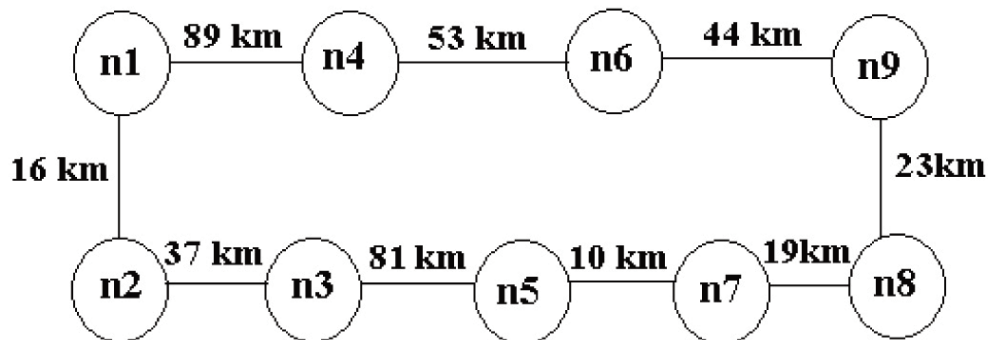


Fig 6. Anillo inicial para el ejemplo de Fig 5.

### 2.1. Cálculo de Costes.

Definimos una **matriz de costes**  $C(G)$  donde cada elemento  $c_{ij}$  representa el coste del enlace entre los nodos  $i$  y  $j$ .

La matriz de costes la rellenamos con la distancia (en km) más 1 (coste cable + coste puertos) en los elementos correspondientes a los enlaces que aparecen en la figura 5. Rellenamos con ceros los costes de los enlaces inexistentes:

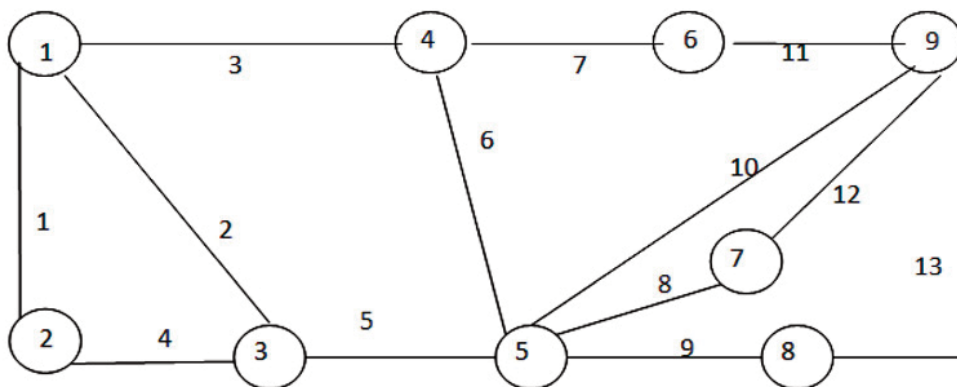
	n1	n2	n3	n4	n5	n6	n7	n8	n9	
<b>C(G)</b>	0	17	0	90	0	0	0	0	0	n1
	17	0	38	0	0	0	0	0	0	n2
	0	38	0	0	82	0	0	0	0	n3
	90	0	0	0	0	54	0	0	0	n4
	0	0	82	0	0	0	11	0	0	n5
	0	0	0	54	0	0	0	0	45	n6
	0	0	0	0	11	0	0	20	0	n7
	0	0	0	0	0	0	20	0	24	n8
	0	0	0	0	0	45	0	24	0	n9

Podemos calcular el coste total del grafo representado en la figura 6 como:

$$C = 2 * D + m = 381$$

Siendo m el número de enlaces y D la distancia total de la línea en Km.

Suponemos ahora un grafo con 13 enlaces tal y como aparece en la figura 7.



**Fig 7.** Grafo G(V,E) con 9 nodos y 13 enlaces

Dibujando la nueva matriz de costes:

	n1	n2	n3	n4	n5	n6	n7	n8	n9	
<b>C(G)</b>	0	17	1	90	0	0	0	0	0	n1
	17	0	38	0	0	0	0	0	0	n2
	1	38	0	0	82	0	0	0	0	n3
	90	0	0	0	1	54	0	0	0	n4
	0	0	82	1	0	0	1	30	1	n5
	0	0	0	54	0	0	0	0	45	n6
	0	0	0	0	1	0	0	0	1	n7
	0	0	0	0	30	0	0	0	24	n8
	0	0	0	0	1	45	1	24	0	n9

Observamos que la matriz ha variado en función de los enlaces y que se ha puesto a 1 el coste de los enlaces dependientes por lo comentado en el anterior apartado. Calculando los costes del grafo:

$$C(G) = 2 * D + m = 385$$

Es decir, que como ya observamos anteriormente, el coste del grafo  $C(G)$  será igual al coste total del cable (dos veces la distancia) más el número total de enlaces. Si la distancia en km es muy superior al número de enlaces dependientes, el coste total se aproximará al doble de la distancia total  $D$ .

## 2.2. Cálculo de Confiabilidad:

Para realizar el cálculo de la confiabilidad, tenemos que suponer 'a priori' los valores de disponibilidad del cable de fibra y de los puertos.

Para facilitar los cálculos, vamos a suponer que la disponibilidad de todos los tramos de fibra es la misma independientemente de la distancia.

Por lo observado en campo, sabemos que la disponibilidad del cable es inferior a la disponibilidad de un puerto ya que es más común la pérdida de disponibilidad de un enlace por un corte de fibra debido a robos, sabotajes o degradación de empalmes que el fallo de un puerto óptico en el nodo. No obstante, suponemos los siguientes valores:

$$p_C = 0,99;$$

$$p_p = 0,99;$$

Dicho de otro modo, tras un tiempo no definido  $t$ , la probabilidad de perder un enlace debido a la indisponibilidad del cable será del 1% y la probabilidad de perder un enlace por la caída de cualquiera de sus dos puertos será igualmente del 1%.

Calculamos entonces la confiabilidad, en base a estos valores del anillo representado en la figura 6 Utilizando la aproximación de Jan:

$$R(G)_C = p_C^n + n p_C^{n-1} q_C = 0,996564$$

$$R(G)_p = p_p^n + n p_p^{n-1} q_p = 0,996564$$

Entonces:

$$R(G)_{fig6} = R(G)_C * R(G)_p = 0,993140$$

Es decir, pasado un tiempo  $t$ , la probabilidad de que todos los nodos de la red representada en la figura 6 estén disponibles es del 99,31%.

Calculamos ahora la confiabilidad del grafo representado en la figura 7:

$$R(G)_C = 0,996564$$

$$R(G)_p = 0,999497$$

Por lo que:

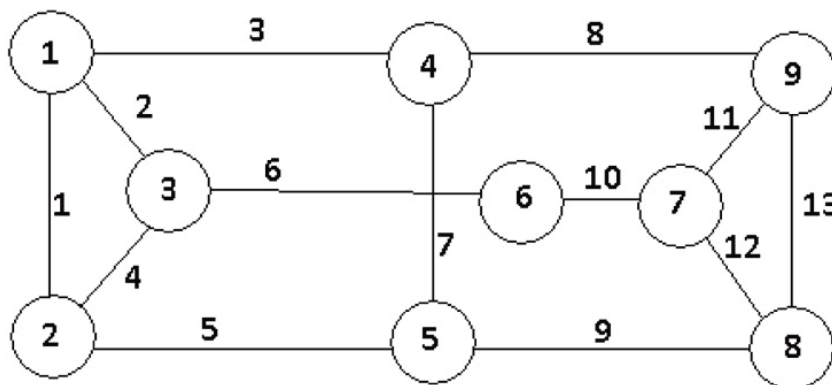
$$R(G)_{fig7} = R(G)_C * R(G)_p = 0,996063$$

Dicho de otro modo, pasado un tiempo  $t$ , la probabilidad de que todos los nodos de la red representada en la figura 7 estén disponibles es del 99,61%.

Teniendo en cuenta que  $R(G)_C$  será siempre constante e independiente del tipo de grafo, se establece un límite máximo tal que:

$$R(G)|_{R(G)_p = 1} = R(G)_C$$

Por último, vamos a suponer un grafo  $G(E,V)$  que suponga un máximo en el problema de maximización de  $R(G)$  para el mismo número de enlaces y nodos, tal y como supondría el de la figura 8.



**Fig 8.**  $C(V,E)$  con 9 nodos y 13 enlaces máximo para  $R(G)$

Como ya hemos visto, el coste del grafo sería el mismo que el de la figura 7, es decir:

$$C(G) = 2 * D + m = 385$$

Calculando la confiabilidad:

$$R(G)_C = 0,996564$$

$$R(G)_p = 0,999892$$

$$R(G)_{fig8} = R(G)_C * R(G)_p^2 = 0,996457$$

Pasado un tiempo  $t$ , la probabilidad de que todos los nodos de la red representada en la figura 8 estén disponibles será 99,65%.



### **3. Conclusiones.**

En el presente artículo se han estudiado las características típicas que presenta una red de telecomunicaciones desarrollada en un entorno ferroviario, con el objetivo de establecer ciertos aspectos en los criterios de diseño focalizados en el entorno que nos ocupa.

Hemos observado que pese a que el aumento de costes a la hora de sumar enlaces en una red de telecomunicaciones ferroviaria es muy bajo respecto al coste total de la propia red, la confiabilidad no aumenta significativamente de grado y esto es debido al peso que supone la interdependencia entre los enlaces debida al uso del mismo cable.

Por otro lado, hemos establecido simplificaciones importantes que nos ayudarán a facilitar enormemente las opciones de búsqueda de máximas redes ferroviarias en el problema NP complejo de optimizar  $G(E,V)$  maximizando  $R(G)$  y minimizando  $C(G)$ .

### **4. Referencias**

[1] Deo, N., *Graph Theory with Applications to Engineering and Computer Science*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. (1974).

[2] Jan, R. H., "Design of Reliable Networks", *Computers and Operations Research*, vol. 20, January 1993, pp 25-34 1993.

[3] Jan, R. H., Hwang, F.J., Cheng, S.T., "Topological Optimization of a Communication Network Subject to a Reliability Constraint", *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 42, No. 1, March 1993 pp 63-70.

[4] Brecht, Timoty, "Lower Bounds for Two Terminal Network Reliability", Thesis 1995.

[5] Dengiz Berna, Fulya Altipamak, "Efficient optimization of all-terminal reliable network using evolutionary approach". *IEEE Transactions on Reliability*, march 1997.

[6] Dengiz, B. "Efficient Optimization of All Reliable networks, using an Evolutionary Approach". *IEEE transactions on reliability* vol 46 nro 1, 1997.

## **Economía y Técnica, de la mano en las Telecomunicaciones Ferroviarias**

### ***Economics and Technology, together in the Railway Telecommunications***

Víctor Andrés Martín Moreno

INECO.

Blog: <http://vam-telecomunicaciones-ferroviarias.blogspot.com.es>

#### **Resumen**

Toda decisión tecnológica en el diseño de una red de telecomunicaciones ferroviarias lleva consigo una variación en la evolución económica de la inversión realizada. Y viceversa, una alteración de la gráfica económica implica una acción tecnológica ejecutada. El artículo ofrece una visión general de la evolución económica de una obra acorde a sus fases tecnológica. Muestra la extrapolación de un caso particular que varía en base a múltiples factores como la complejidad, los plazos, las planificaciones y las dificultades encontradas.

Palabras clave: telecomunicaciones ferroviarias, economía, tecnología, gestión, fibra óptica, energía, red de datos, subsistemas, análisis, planificación, maqueta, acumulado, inversión.

#### **Abstract**

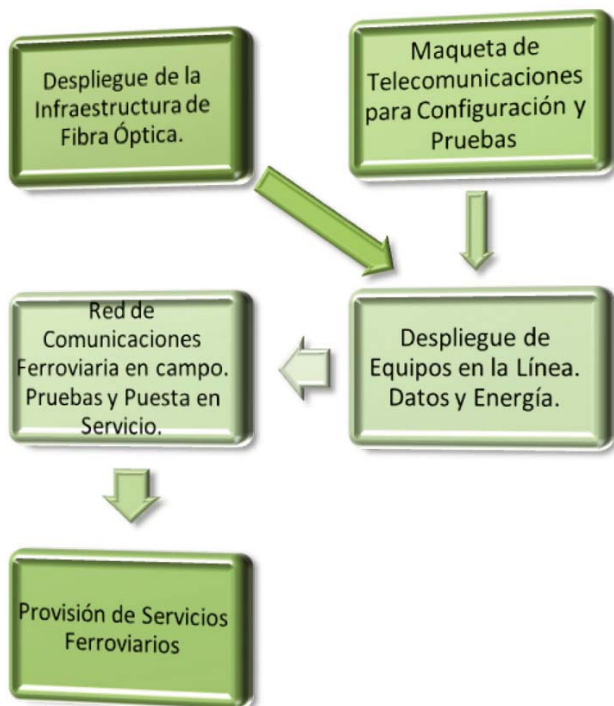
*Any decision about technology in the design of railway telecommunications network implies a change in the economic evolution of the investment. And vice versa, a change in the economic graphical involves a technological action executed. The article provides an overview of economic developments in a project according to their technological phases. Displays the extrapolation of a particular case that varies based on multiple factors like complexity, deadlines, schedules and the difficulties encountered.*

*key words: railway telecommunications, economics, technology, management, fiber optics, energy, data network, subsystems, analysis, planning, lab, aggregate, investment.*

## 1. Introducción

Una obra de Telecomunicaciones Ferroviarias podemos definirla como un conjunto de piezas las cuáles deben estar perfectamente engranadas para que el motor de la provisión de servicios funcione de manera correcta. Estas piezas se conforman de un conjunto de subsistemas cuya evolución económica en el tiempo permiten analizar su relación y necesaria coordinación. Management, Economía y Técnica, van de la mano en las Obras de Telecomunicaciones Ferroviarias.

## 2. Fases en la obra de telecomunicaciones



Son muchas las tareas que hay que realizar para culminar con éxito una obra de telecomunicaciones. La planificación y gestión de las mismas son de suma importancia para conseguir el despliegue de la red. A continuación se presenta un diagrama de flujos con el fin de explicar el avance de estas fases. Son tres los subsistemas principales que representan el grueso técnico y económico del proyecto, y en los que centraremos el artículo para analizar la relación entre economía y aplicación tecnológica. Éstos son, Infraestructura de Fibra Óptica, Red de Datos y Energía.

La obra comienza con el tendido de los cables troncales y de segregación de Fibras Ópticas por el trazado ferroviario. Ejecutadas las arquetas y los empalmes correspondientes, las fibras son conectadas a repartidores murales y de gran capacidad en los emplazamientos que necesitan de la prestación de servicios. Con un inicio posterior, pero pa-

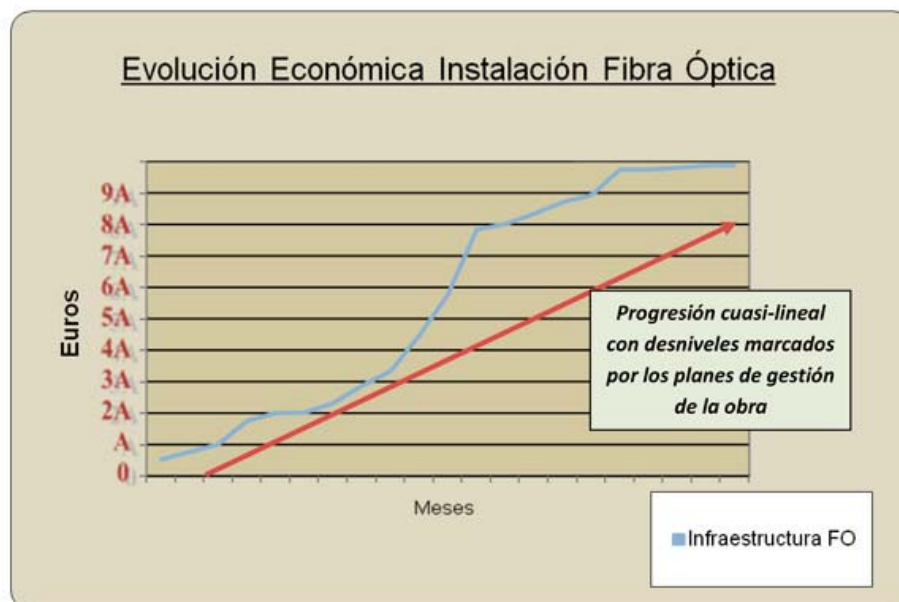
ralelizado en el tiempo, comienza el montaje “uno a uno” del equipamiento de telecomunicaciones para facilitar las tareas de configuración y pruebas en un entorno local. En maqueta, son verificadas las funcionalidades requeridas, lo cual permite el comienzo del despliegue en campo de los equipos. Un despliegue centrado en la red de datos y el subsistema de energía para telecomunicaciones. Finalmente, se desarrollan las pruebas de puesta en servicio que garantizan la funcionalidad del sistema completo. Ya está disponible la Red de Telecomunicaciones para ofrecer los servicios ferroviarios demandados.

## 3. Análisis económico por subsistema

### a. Infraestructura de Fibra Óptica

La dotación de acceso a la fibra óptica en todos los emplazamientos que requieren de servicio de telecomunicaciones constituye la mayor partida del proyecto. Los tendidos troncales, segregaciones, cajas de empalme, repartidores, etc., son el soporte físico de la capa de red.

Su evolución económica es cuasi-lineal, siempre acorde a los planes de gestión definidos. Marca el inicio de la obra de telecomunicaciones y progresa cuasi-linealmente con el paso de los meses. La finalización (marcada por las medidas reflectométricas y de potencia dentro de los márgenes aceptables), debe ser anterior a la terminación de la puesta en servicio de los equipos en campo. Su comienzo viene marcado por la recepción de las bobinas de fibra óptica acopiadas, para verificar con las pruebas pertinentes, que cumplan con la especificación técnica requerida.



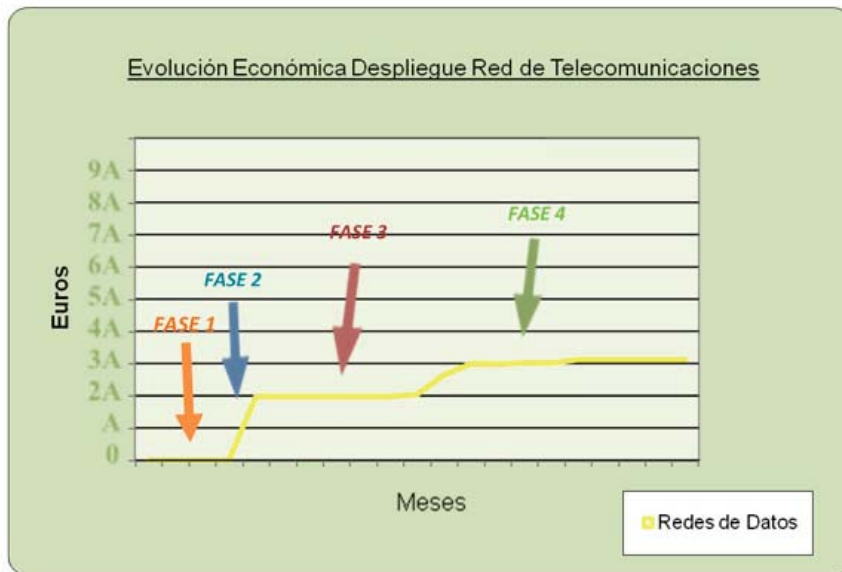
## b. Red de Datos

\* **FASE 1:** La fase inicial de la obra viene marcada por las tareas de ingeniería de diseño. El grupo técnico define las necesidades de la red, la arquitectura de networking, y con ello se establece la cantidad de equipos para ser acopiados.

\* **FASE 2:** Se produce el acopio de los dispositivos para la red de telecomunicaciones, lo cual supone un efecto creciente en la evolución económica.

\* **FASE 3:** Durante una fase temporal de longitud variable en función de la complejidad del proyecto, se realizan las configuraciones y pruebas en maqueta, con el objetivo de verificar en un entorno local que se cumplen los requerimientos definidos para la provisión de los servicios de telecomunicaciones demandados. En esta fase, el presente subsistema no genera un aporte económico en el conjunto global.

\* **FASE 4:** Despliegue en campo de los equipos. Se produce una progresión cuasi-lineal a nivel económico a medida que se va realizando la instalación de equipos con el paso de los meses.

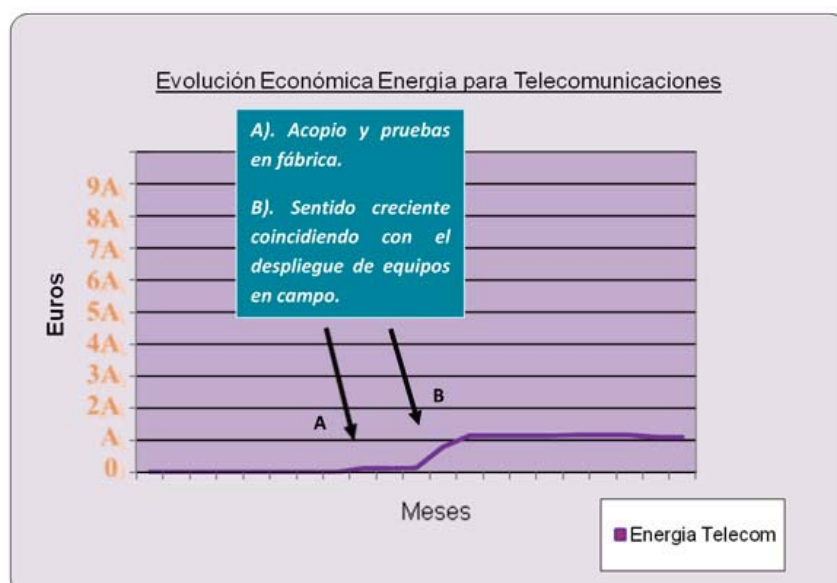


### c. Energía para telecomunicaciones

Este subsistema supone el menor aporte económica de los tres, y el que menos variaciones experimenta en la evolución de la obra.

Representa el conjunto de plantas de energía que suministran a los equipos de telecomunicaciones. A su vez, estas plantas se nutren de la energía global desplegada para el total de consumidores, y no computada en este gráfico económico.

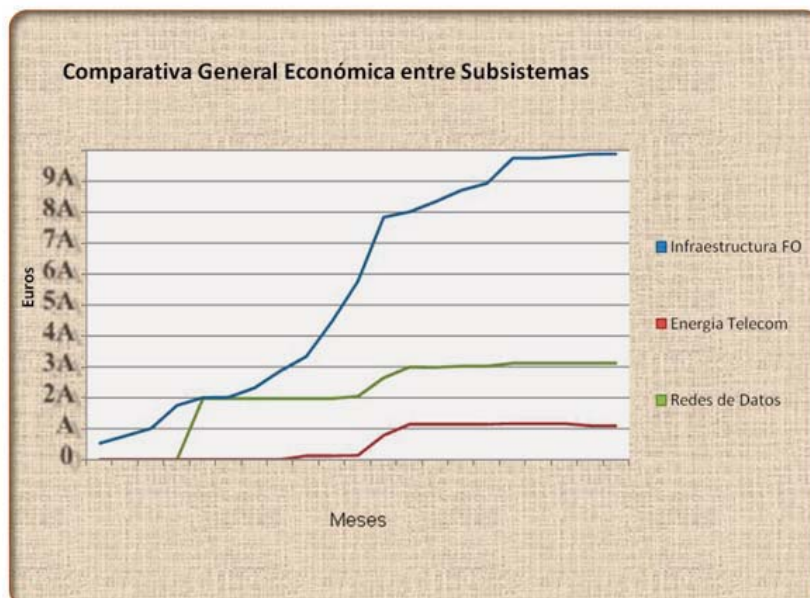
Como se observa, su fecha de inicio es muy posterior a la de los otros dos subsistemas, puesto que su necesidad viene marcada por el inicio del despliegue en campo de los equipos de datos. Su evolución y fecha fin coincide aproximadamente con el anterior subsistema. Previamente, existe un acopio, recepción y pruebas de los equipos en fábrica, lo cual se traduce en un incremento económico previo a la casi-linealidad de la instalación en campo.





### 3. Análisis económico conjunto

El siguiente gráfico muestra una superposición de los tres analizados anteriormente. Entre ellos, podemos sacar las siguientes conclusiones.



a) La fibra óptica sigue una progresión casi-lineal con independencia de las otras dos. Comienza la primera, y finaliza antes que los otros subsistemas.

b) Todos los subsistemas tienen una recta creciente inicial correspondiente al suministro de equipos para pruebas.

c) El inicio del despliegue de las redes de datos en campo (posterior a las pruebas de maqueta), coincide con el inicio de la instalación de los equipos de energía para telecomunicaciones. De hecho, se puede observar una simetría entre ambas gráficas en su recta final a partir de este hito.

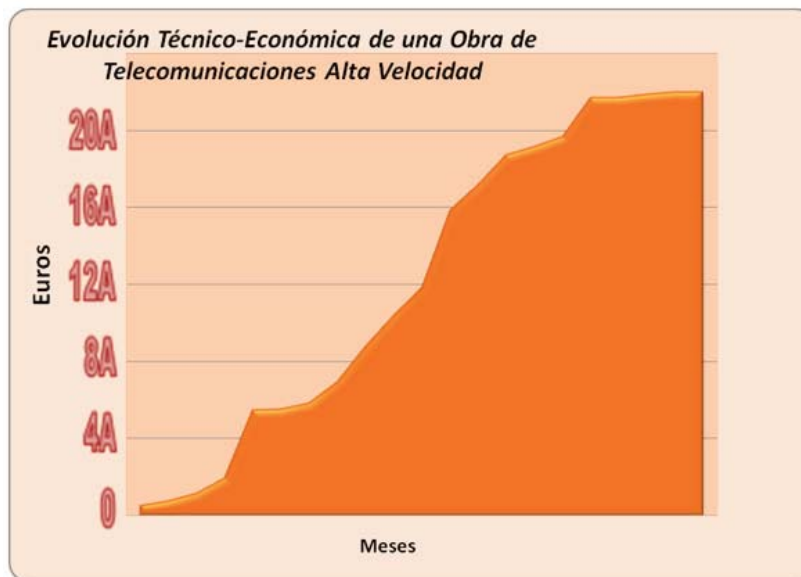
d) Los tres actores analizados, cargados con diferente peso económico y requiriendo distinto nivel de complejidad técnica, deben estar perfectamente coordinados para lograr el final deseado.

### 4. Evolución económica acumulada

Para terminar el análisis de cómo la tecnología y la economía van de la mano en una obra de telecomunicaciones ferroviaria, una vez explicado el detalle de la evolución económica de cada uno de los subsistemas, así como de la relación necesaria que existe entre ellos, se muestra el gráfico de la progresión en la inversión económica acumulada del proyecto.

Cada obra de telecomunicaciones tiene sus características, sus contratiempos y sus gestiones. Aunque el conjunto de fases que lo componen, y que anteriormente hemos explicado, no sufra apenas variaciones, las planificaciones de las obras se ajustan a la realidad del momento, y esto, sí puede experimentar alteraciones.

Generalizando, y tratando de extrapolar un caso particular, lo cuál es difícil por la complejidad de estas obras, la inversión económica acumulada de una obra de telecomunicaciones ferroviaria de Alta Velocidad seguiría el siguiente patrón de crecimiento en función del tiempo.



## 5. Conclusión

La economía, como en todas las facetas de la vida, también está presente en una obra de telecomunicaciones ferroviaria. Toda decisión tecnológica se relaciona de manera directa con un efecto económico. Dónde hay un crecimiento económico existe un acción técnica, y viceversa; un análisis de las actuaciones de ingeniería realizadas nos permite analizar la evolución económica de nuestras decisiones.

Volviendo al título elegido para el artículo, economía y técnica, sin duda, van de la mano en las telecomunicaciones ferroviarias.

## 6. Bibliografía

[1] Datos obtenidos de la experiencia acumulada en obras de telecomunicaciones ferroviarias de Alta Velocidad.

[2] Artículo en Vía Libre “*Diseño e implementación de una red de comunicaciones ferroviarias de Alta Velocidad*”.

[3] Link. <http://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=8051&cs=tecn>

## Suicidios y accesos a vía no autorizados en los ferrocarriles: análisis y medidas para su mitigación y prevención\*

### *Suicides and trespasses on railway property: analysis and prevention and mitigation measures*

Ángeles Táuler Alcaraz; María del Mar Sacristán Martín; Sarah Whalley; Laura Lorenzo Carrascosa

Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Grupo de Sociología del Transporte.  
Spanish Railway Foundation. Sociology of Transport Research Group

#### Resumen

La aportación de la Sociología al ámbito del transporte se ha centrado fundamentalmente en la planificación urbana, los aspectos sociales de la demanda y los estudios de movilidad como dinámica social.

Nuestra principal contribución a esta disciplina es que abordamos la investigación sociológica del transporte a partir de las consecuencias que producen determinados comportamientos sociales en escenarios relacionados con el modo de transporte ferroviario. En este sentido, examinamos los suicidios y accidentes de arrollamientos en el ámbito ferroviario y su incidencia en la salud pública, así como en los costes sociales que ello genera.

Para ello se analizarán los datos del proyecto europeo RESTRAIL - Reduction of suicides and trespasses on railway property (2011). El objetivo de RESTRAIL es, además de estudiar este fenómeno desde una perspectiva europea, reducir los suicidios y accesos indebidos a vías ferroviarias dotando a los responsables de la toma de decisiones de herramientas válidas para situaciones habituales y de crisis, permitiéndoles desarrollar e implementar diversas medidas y políticas de protección, disuasión o mitigación para afrontar este asunto. La investigación que presentamos examinará un avance de los resultados de suicidios y accidentes de arrollamientos en España.

Palabras clave: suicidios, accesos indebidos a propiedades ferroviarias, comportamientos sociales.

#### Abstract

*The sociology of transport has focused primarily on urban planning, social aspects of demand and mobility studies. Our contribution to this discipline is through the study of social behaviour acted out within a railway environment and the consequences brought about these actions and behaviour. It is within this context that we examine the phenomena of suicides and trespasses on railway property and their impact on public health, as well as the cost to society of these acts.*

*We will analyze data from the European project RESTRAIL - Reduction of suicides and trespasses on railway property (2011). The aim of RESTRAIL is to study railway suicides and trespasses from a European perspective, with a view to reducing these incidents and their consequences through the development and implementation of effective measures and policies for the protection, deterrence or mitigation of this issue. This paper presents some preliminary research regarding railways suicides and trespass accidents in Spain and Europe.*

*key words: Geographic Suicides, trespasses, social behavior, railways.*

\* Una versión preliminar de este trabajo se publicó en: Sacristán, M., Táuler, A. y Lorenzo, L. (2012). Movilidad, accidentalidad y comportamientos sociales. Suicidios y arrollamientos en un escenario de transporte: el ferrocarril. Actas de las II Jornadas de Sociología de la AMS. Madrid. Asociación Madrileña de Sociología.

[angelestaluer@ffe.es](mailto:angelestaluer@ffe.es); [msacristan@ffe.es](mailto:msacristan@ffe.es); [swhalley@ffe.es](mailto:swhalley@ffe.es); [llorenzo@ffe.es](mailto:llorenzo@ffe.es)

## 1. Introducción

El transporte como fenómeno social ha sido escasamente abordado por la sociología. La consecuencia de ello es la falta de un marco teórico y metodológico propio que permita explorar el transporte como un problema sociológico (Antolín Iria, 1999).

En general, las investigaciones realizadas se han centrado más en los aspectos sociales del transporte (De Boer, 1986) o el ámbito de la planificación urbana y del transporte (Ríos, Táuler y Razquín, 1990; Observatorio del Transporte en Euskadi - Oteus, 2005).

No obstante, pocas investigaciones realizadas en el ámbito del transporte tienen una orientación específicamente sociológica (Yago, 1983). Nuestra principal contribución a la Sociología del Transporte es que abordamos la investigación sociológica del transporte a partir de las consecuencias que producen determinados comportamientos sociales en escenarios relacionados con el modo de transporte ferroviario. En este sentido, examinamos los suicidios y accidentes por accesos indebidos a propiedades ferroviarias (*trespasses*) y su incidencia en la salud pública, así como en los costes sociales que ello genera.

El transporte ferroviario es uno de los medios de transporte más eficaces y eficientes que conecta la mayoría de las áreas pobladas cada vez a mayor velocidad. Pero también, el ferrocarril constituye un importante elemento de cohesión social y un factor de desarrollo de las poblaciones.

Los accidentes ferroviarios, al igual que en otros sistemas de transporte de viajeros, se suelen caracterizar por una baja frecuencia, pero por una espectacularidad importante y una concentración puntual de víctimas y daños materiales (Baumert, Erazo y Ladwig, 2005). Según datos de la European Railway Agency (ERA) (2012), los suicidios representan dos tercios del total de víctimas y, junto con los *trespasses* (acceso indebido a entornos ferroviarios), constituyen el 87% de todas las muertes que tienen lugar en el ámbito ferroviario europeo.

En los últimos años, la seguridad ferroviaria ha mejorado sustancialmente debido a los avances tecnológicos y a los esfuerzos internacionales por coordinar las estrategias de seguridad (International Union of Railways, 2011).

Los accidentes que se producen en el entorno ferroviario tienen significativas consecuencias a nivel social, económicas, de salud pública y de impacto en la opinión pública. Pese al esfuerzo de las administraciones por desarrollar campañas educativas que alerten de los peligros de ciertas conductas de riesgo como los *trespasses*, así como de los padres, psicólogos, psiquiatras y educadores en la detección de comportamientos suicidas, hay actuaciones que trascienden de las actuaciones preventivas y disuasorias. En este sentido, las compañías ferroviarias también han realizado un significativo esfuerzo por implementar medidas de seguridad que reduzcan el número de suicidios y *trespasses* (Rådbo, Svedung y Andersson, 2008).

La importancia a nivel social y para los gestores de ferrocarriles urbanos e interurbanos que tienen los suicidios y los accesos no autorizados a propiedades ferroviarias, ha llevado a la Comisión Europea a incluir esta línea de trabajo entre sus áreas prioritarias de investigación. El proyecto europeo *RESTRAIL-Reduction of suicides and trespasses on railway property* tiene como objetivo reducir la incidencia de los suicidios y los accesos no autorizados a propiedades ferroviarias, mediante la identificación de medidas

preventivas que mitiguen estos accidentes<sup>1</sup>. Para ello, en una primera fase, el proyecto identificará los factores internos y/o externos a los ferrocarriles que influyen en la ocurrencia de los suicidios y *trespasses*, así como sus consecuencias. En una segunda fase, se evaluarán las medidas existentes para reducir los suicidios, prevenir los *trespasses* y mitigar las consecuencias de estos accidentes en los espacios ferroviarios. A partir de la información recopilada se elaborarán recomendaciones y directrices dotando a los responsables de la toma de decisiones de herramientas válidas para situaciones habituales y de crisis, que les permitan desarrollar e implementar diversas medidas y políticas de protección, disuasión o mitigación para afrontar este asunto.

La investigación que aquí se presenta pretende abordar el análisis de los suicidios y los accesos indebidos a propiedades ferroviarias (*trespasses*) en los espacios ferroviarios desde una perspectiva sociológica. Para ello, se examinará la evolución de este tipo de accidentes en el ámbito ferroviario español, y se indagarán sus consecuencias sociales y de salud pública.

En la primera parte del trabajo se definen las fuentes y metodología de estudio y se describen las principales investigaciones realizadas sobre el tema de estudio. A continuación, y con el objetivo de documentar los suicidios y *trespasses* en los entornos ferroviarios, se presentarán los principales resultados de estos accidentes en España en relación con la Unión Europea (27). En la tercera parte, se reflexiona acerca de las estrategias de prevención del suicidio y las conductas de riesgo para evitar los accidentes por accesos no autorizados a propiedades ferroviarias.

## **2. Fuentes de datos, Metodología y antecedentes**

En los espacios ferroviarios, los accidentes con víctimas (mortales o no) se dividen en: accidentes en pasos a nivel, suicidios, accesos no autorizados y otras víctimas de accidentes (European Railway Agency, 2010). Habitualmente, los datos sobre suicidios se registran por separado del resto de accidentes mortales (Comisión de Investigación de Accidentes Ferroviarios, 2009).

Las cifras oficiales sobre accidentes ferroviarios presentan el problema de la comparabilidad internacional. Aunque la directiva de seguridad de los ferrocarriles europeos exige que los Estados Miembros informen de las investigaciones sobre accidentes a la ERA, no existe una base de datos internacional que permita realizar comparaciones rigurosas entre países. Por otro lado, debido a que el seguimiento de los accidentes e incidentes ferroviarios se realiza a nivel nacional existen desigualdades en los criterios de clasificación (European Transport Safety Council, 2011).

A pesar de las limitaciones conceptuales, las estadísticas publicadas por la ERA ofrecen información de calidad acerca de las víctimas de accidentes ferroviarios en el ámbito internacional. En España, la Agencia de Seguridad del Transporte Terrestre perteneciente al Ministerio de Fomento, es la autoridad en seguridad a nivel nacional que recoge estas estadísticas.

---

<sup>1</sup> En el proyecto RESTRAIL- Reduction of suicides and trespasses on railway property (Seventh Framework Programme, 4<sup>a</sup> Call: Transporte sostenible por superficie; Comisión Europea: SCP1-GA-2011-285153) participan la Union Internationale des Chemins de Fer, Teknologian Tutkimuskeskus, Trafikverket, Institut Français des Sciences et Technologies des Transports de L'Amenagement et des Reseaux, MTRS3 Solutions and services LTD, Fundación Cidaut, Helmholtz Zentrum Muenchen Deutsches Forschungszentrum fuer Gesundheit und UMWLT GMBH, Karlstads Universitet, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Turkiye Cumhuriyeti Devlet Demir Yollari Isletmesi Genel Mudurlugu, Deutsche Bahn AG, Instytut Kolejnictwa, Prorail B.V., Nice Systems LTD, Ansaldo STS S.p.A., University of Nottingham e Infrabel SSF.(<http://www.restrail.eu/>)



La estadística de “Defunciones según la Causa de Muerte” elaborada por el Instituto Nacional de Estadística (2009) proporciona información sobre la mortalidad atendiendo a la causa básica de la defunción. No obstante, la información facilitada no permite conocer si la defunción se ha producido en el ámbito del ferrocarril. El nivel de desagregación de esta estadística sólo permite conocer, en el caso de los suicidios, si la lesión autoinfligida se ha producido por “*arrojarse o colocarse intencionadamente delante de un objeto en movimiento*” (causa X81 de la Clasificación Internacional de Enfermedades, CIE-10).

La limitación de los datos facilitados por el INE (2009) hace que en esta investigación se exploren los datos sobre suicidios y *trespasses* en el ámbito del ferrocarril sucedidos en España recogidos por la *International Union of Railways* (UIC). A partir de la información recopilada se realizará un análisis descriptivo de este tipo de accidentes.

Existen numerosas investigaciones sobre suicidios en entornos ferroviarios. No obstante, estas investigaciones abordan el problema desde una única perspectiva, ya sea médica (Romero, Gamero y Martínez, 2007), psiquiátrica (Muñoz et al., 2005; Houwelingen, 2011) o legal (Villetaz, 2007), entre otros. Ninguna de estos estudios se han centrado en porqué los ferrocarriles parecen ser uno de los principales medios para cometer el suicidio por detrás de la ahorcadura, la precipitación desde altura y el envenenamiento (Miro et al., 2006).

En lo que respecta a los accesos indebidos a propiedades ferroviarias (*trespasses*), las investigaciones llevadas a cabo analizan, fundamentalmente, los incidentes y accidentes. Tampoco se han realizado estudios sobre la eficacia de las medidas de mitigación desarrolladas.

El estudio que aquí presentamos tiene como objetivo fundamental reflexionar acerca de las estrategias de prevención del suicidio y las conductas de riesgo para evitar los *trespasses*.

Seguidamente, y con el objetivo de documentar la importancia de este tipo de accidentes, se analizan los suicidios y *trespasses* que se producen en los espacios ferroviarios españoles y europeos.

### **3. Suicidios y *trespasses* en el ámbito ferroviario español y europeo**

El ferrocarril sigue siendo uno de los medios de transporte más seguros de la Unión Europea. Sin embargo, en 2010 murieron 1.256 personas en los ferrocarriles europeos (European Railway Agency, 2012). La mayoría de estas muertes se deben a accesos no autorizados a vías y usuarios de pasos a nivel.

A pesar de lo alarmante de esta cifra, los indicadores comunes de seguridad apuntan a que, desde el año 2006, ha mejorado notablemente la seguridad ferroviaria y, desde el año 2009, se ha reducido el número de muertos y heridos en el ámbito ferroviario (European Railway Agency, 2011a).

#### **3.1. Suicidios en el ámbito ferroviario español y europeo**

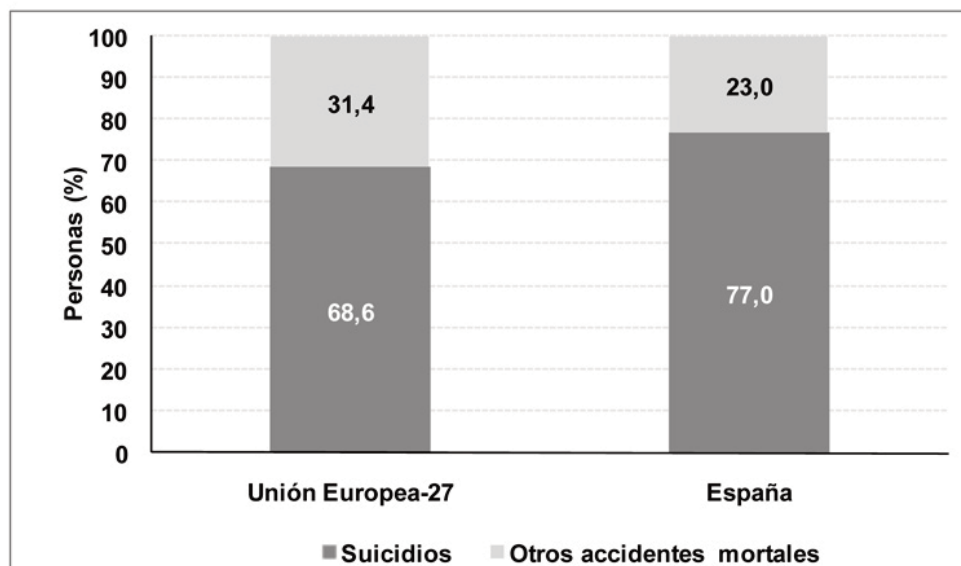
El suicidio es la decimotercera causa de muerte a nivel mundial para todas las edades. Además, entre la población de 15 a 44 años, el suicidio es la cuarta causa de muerte y la sexta causa de discapacidad (Krug et al., 2002).

España presenta una de las tasas de suicidio más bajas de los países de su entorno. En el año 2009, la tasa de suicidio en España se situaba en 6,3 por 100.000 y en la Unión Europea (27) de 10,3 por 100.000. No obstante, a pesar de que las tasas de suicidio en España son bajas, en los últimos años han experimentado un significativo incremento. De este modo, desde mediados de la década de 1980, la tasa de suicidio en España ha aumentado un 17,2% (Ruiz Pérez y Orly de Labry-Lima, 2006).

En el caso de los suicidios en entornos ferroviarios, la importancia del fenómeno (en la Unión Europea se registran 50 suicidios a la semana en espacios ferroviarios) evidencia la necesidad de adoptar medidas de prevención.

El suicidio en el entorno del ferrocarril es una de las formas más violentas y letales del comportamiento autodestructivo. Esto se debe a que tienen lugar en espacios públicos e involucra a otras personas (Houwelingen, 2011). Pero además de los daños personales, los suicidios tienen costes que no se limitan exclusivamente a las partes involucradas, también tienen costes relacionados con los retrasos, los servicios de rescate y las investigaciones policiales, entre otros (Rail Safety and Standards Board, 2004; European Railway Agency, 2011a). En el caso de los maquinistas, además, las consecuencias psicológicas pueden derivar en la pérdida parcial o total, temporal o permanente de su puesto de trabajo, con la consiguiente pérdida de salario y reconocimiento personal, profesional y social (UIC, 2011).

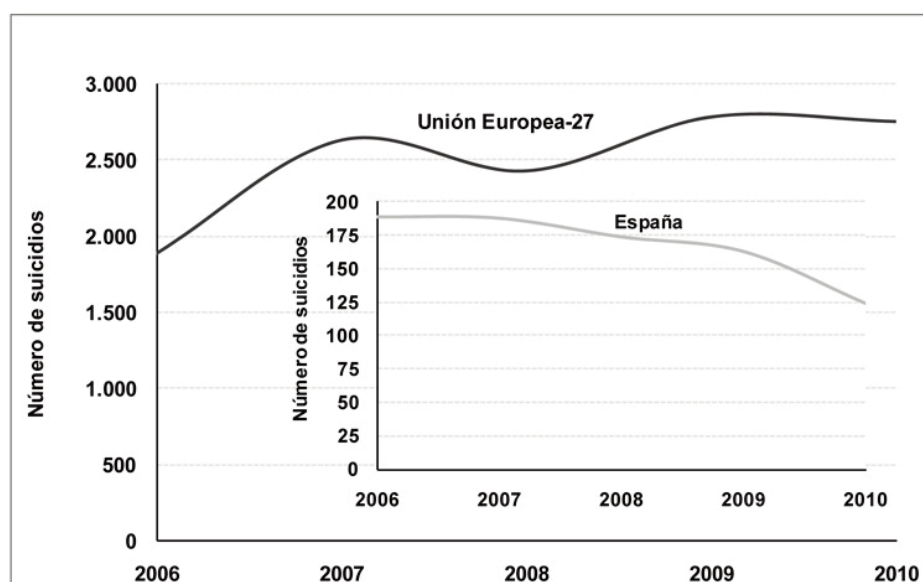
La mayoría de las muertes que se producen en el entorno ferroviario europeo son suicidios. El 68,6% de los accidentes mortales que se producen en la Unión Europea (27) se deben a suicidios (Figura 1). En España, el 77% de las víctimas mortales producidas en espacios ferroviarios son suicidios.



**Figura 1.** Suicidios y otros accidentes mortales en el ferrocarril en España y la Unión Europea-27 (%), 2010  
Fuente: European Railway Agency (2012).

En la Figura 2 se presenta la evolución del número de suicidios producidos en el ámbito ferroviario en la Unión Europea (27) y España (2006-2010). Los resultados muestran que, mientras en España los suicidios en estos entornos han descendido, en el conjunto de los países de la Unión Europea (27) ha aumentado de forma significativa este tipo de accidentes. En el período 2006-2010, el número de suicidios en la Unión Europea (27) se ha incrementado un 45,5% y, en España, el descenso de los suicidios representa un 34,4%.

Los resultados también indican la existencia de significativas desigualdades por países en el número de suicidios que se producen en el ámbito ferroviario europeo. Alemania es el país de la Unión Europea (27) con un mayor porcentaje de suicidios en entornos ferroviarios (Figura 3). En torno a 3 de cada 10 suicidios que se producen en el ámbito ferroviario europeo ocurren en Alemania (32,7%). Por detrás en importancia se sitúan Francia (11,9%), Reino Unido (8,1%), Holanda (7,3%) y República Checa (7,2%). El 4,5% del total de suicidios que se producen en el ámbito ferroviario, se localizan en España.



**Figura 2.** Evolución del número de suicidios en el ferrocarril en España y la Unión Europea-27, 2006-2010

Fuente: European Railway Agency (2011b; 2012).

Estas diferencias entre países en las tasas de suicidio pueden estar relacionadas con factores socio-culturales, como la tradición religiosa o la solidaridad familiar, entre otros (Huergo Lora y Ocio León, 2009). No obstante, hay que señalar posibles desigualdades en la clasificación estadística de los suicidios según países.

### **3.2. *Trespases* por accesos no autorizados a propiedades ferroviarias en España y Europa**

Hay comportamientos sociales que implican un significativo riesgo y claros costes sociales que repercuten en el conjunto de la sociedad. El denominado fenómeno *trespases* puede acarrear un conjunto de externalidades sociales, económicas, de salud y de impacto en la opinión pública.

Los motivos para que personas no autorizadas accedan a zonas prohibidas en los espacios ferroviarios se deben, en algunos casos, a la elección de la opción más fácil y cómoda (tomar la ruta más corta o más conveniente para cruzar de un lado a otro, incluso si ello implica cruzar las vías o invadir ilegalmente propiedades ferroviarias), o como un acto de valentía/ diversión entre adolescentes y jóvenes. Pero también, algunas personas acceden a zonas no autorizadas para cometer actos delictivos, robos, vandalismo y actos terroristas.

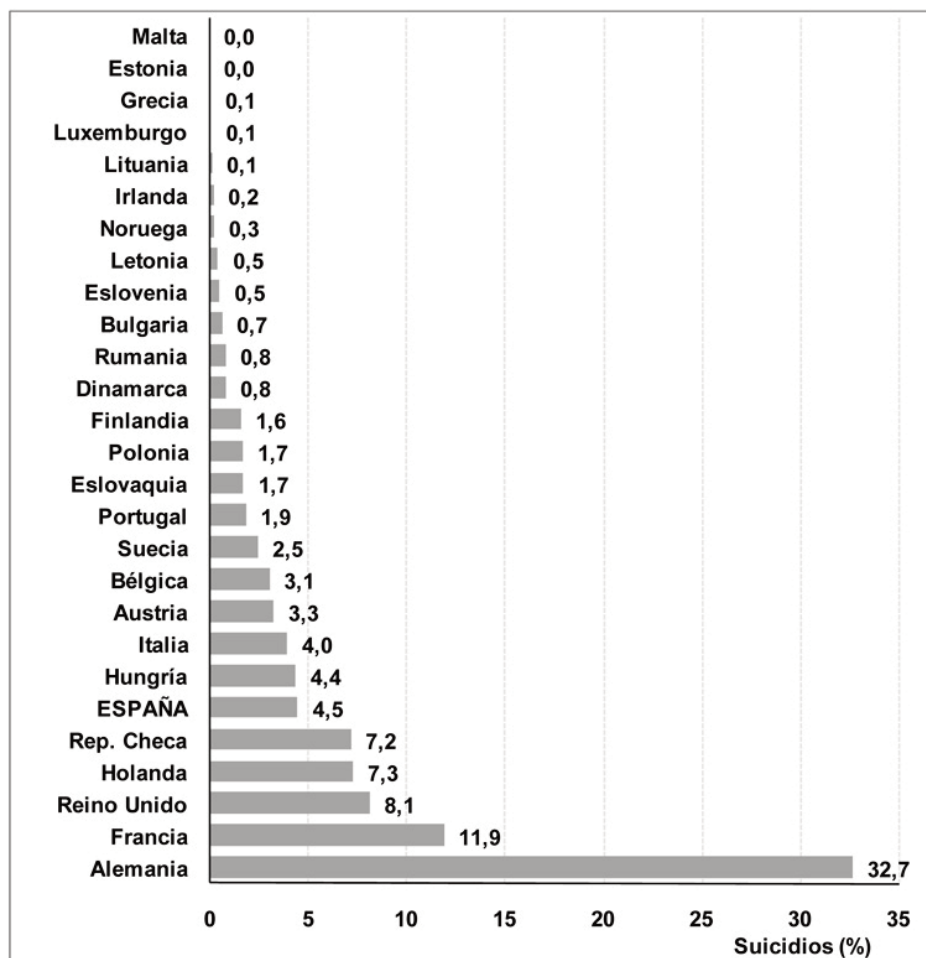
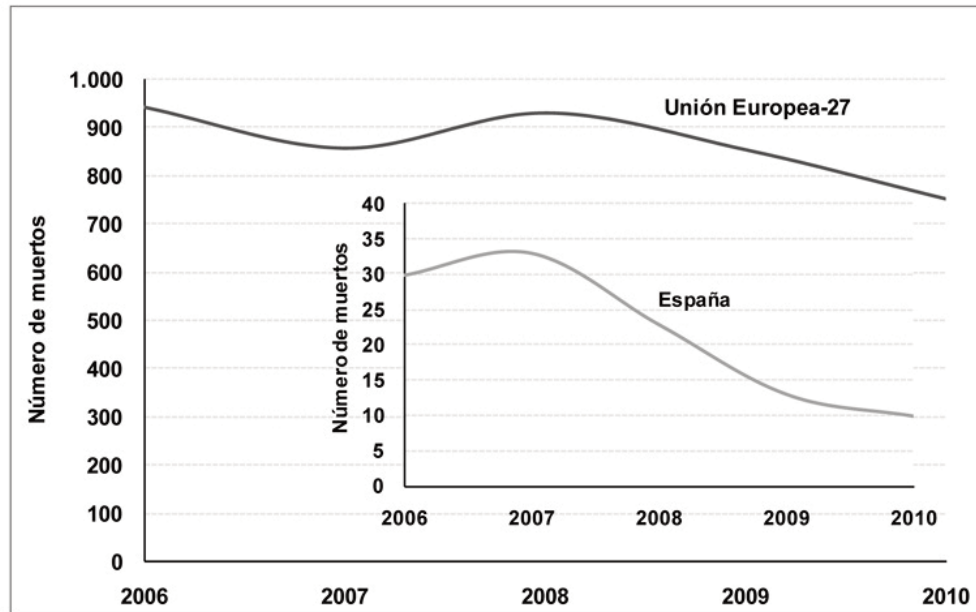


Figura 3. Suicidios en el ferrocarril en la Unión Europea-27 (%), 2010  
Fuente: European Railway Agency (2011b).

La Figura 4 presenta la evolución del número de muertes por accesos no autorizados a propiedades ferroviarias en la Unión Europea (27) y España (2006-2010). Los resultados apuntan a una tendencia descendente de este tipo de accidentes. En este período, las víctimas mortales por *trespasses* se han reducido un 20,2% en la Unión Europea (27) y, en España, un 66,7% menos. Esta reducción puede deberse al esfuerzo de las compañías ferroviarias por implementar medidas disuasorias.

En general, el número total de víctimas mortales en accidentes ferroviarios ha descendido de forma significativa (a excepción de los suicidios) en los últimos años. Sin embargo, la gravedad de los accidentes ha empeorado. En el año 2009, hubo 45 muertes por cada 100 accidentes ferroviarios y, en los dos años anteriores, esta relación era de un 40%. No es posible determinar si el descenso de las víctimas mortales en accidentes ferroviarios se debe a una tendencia o es consecuencia de las desigualdades en la clasificación de las causas de muerte de los distintos países europeos (European Railway Agency, 2011a).



**Figura 4.** Evolución del número de muertes por accesos no autorizados en espacios ferroviarios en España y la Unión Europea-27, 2006-2010  
Fuente: European Railway Agency (2011b; 2012).

Estas diferencias en la clasificación de las víctimas mortales de accidentes ferroviarios pueden ser la causa de las desigualdades entre países en el porcentaje de muertes por accesos no autorizados a entornos ferroviarios. Polonia es el país de la Unión Europea (27) con mayor número de víctimas mortales por *trespasses* (Figura 5). En 2010, el 28,7% de las muertes por *trespasses* que se producen en Europa ocurren en Polonia. Por detrás en importancia se sitúan Rumania (12,7%) y Alemania (10,6%). En España se producen el 1,3% del total de víctimas mortales por accesos no autorizados a propiedades ferroviarias de Europa.

No obstante, a pesar de las desigualdades en la clasificación de las víctimas de este tipo de accidentes por países, las diferencias también pueden estar relacionadas con otros factores. En general, este tipo de comportamientos de riesgo están relacionados con factores culturales, sociales, políticos, etc. que pueden ser determinantes de las desigualdades europeas en el número de víctimas mortales por *trespasses*.



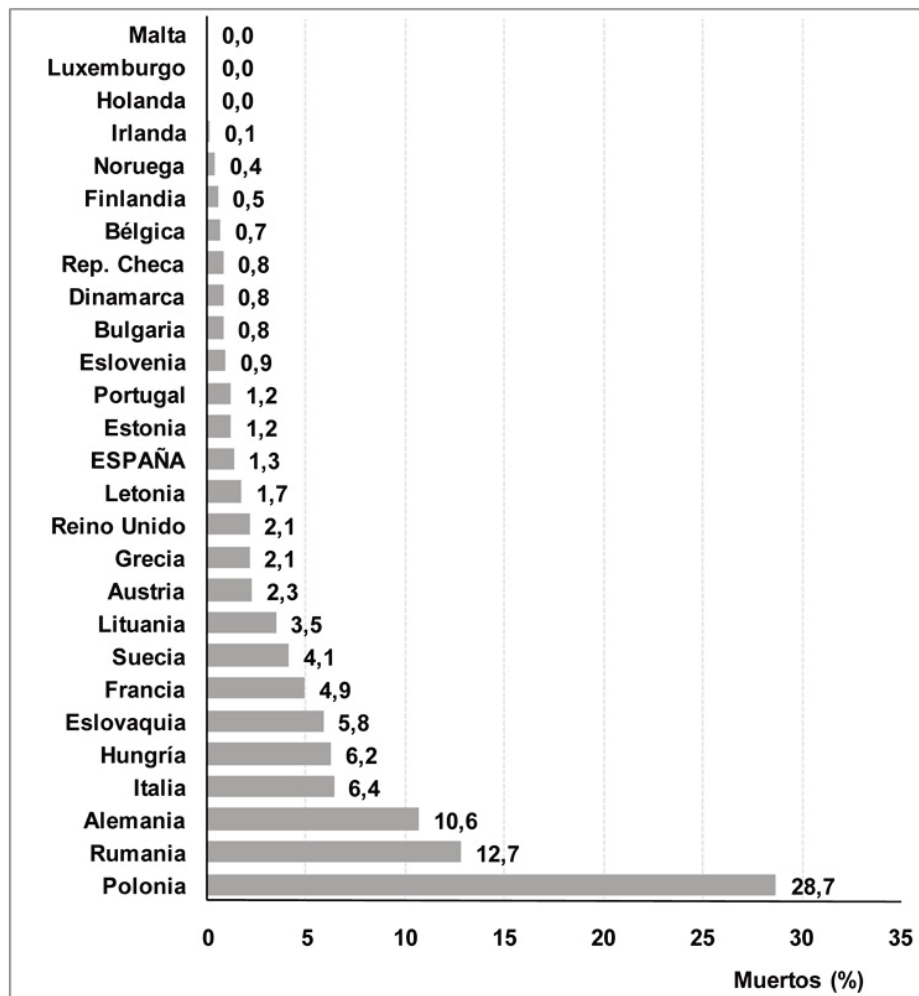


Figura 5. Muertes por accesos no autorizados en entornos ferroviarios en la Unión Europea-27 (%), 2010  
Fuente: European Railway Agency (2011b).

#### 4. Medidas preventivas y disuasorias ante suicidios y *trespasses* en entornos ferroviarios

En el apartado anterior se ha documentado la importancia que los suicidios y accesos no autorizados (*trespasses*) tienen en el conjunto de los accidentes producidos en los espacios ferroviarios. Esta relevancia justifica que la seguridad en los espacios ferroviarios sea objeto de interés, no sólo para las empresas relacionadas con el sector ferroviario, sino también para las administraciones locales y regionales y, para la sociedad en general.

Por otro lado, no cabe duda que los costes sociales y económicos derivados de los suicidios y accesos no autorizados a propiedades ferroviarias son muy elevados, al mismo tiempo que son objeto de una importante alarma social entre la población y los medios de comunicación (European Railway Agency, 2011a).

En el caso de los accesos no autorizados a propiedades ferroviarias, las potenciales medidas a adoptar con el objetivo de reducirlos se fundamentan en tres ámbitos de intervención: el usuario/ sociedad en general, la infraestructura ferroviaria y el vehículo ferroviario.

En general, desde hace unos años se han establecido numerosas medidas de seguridad relacionadas con la infraestructura y los vehículos ferroviarios (como la reducción del número de pasos a nivel, la mejora de la distancia de visibilidad y la instalación de semibarreras, entre otras medidas). No obstante, se siguen produciendo accesos no autorizados a propiedades ferroviarias y accidentes derivados de los mismos (Kallberg et al., 2002).

Los estudios realizados inciden en la necesidad de actuar sobre los usuarios y potenciales usuarios, es decir, sobre la sociedad en su conjunto. Estos estudios proponen el desarrollo de campañas de información y sensibilización social sobre los riesgos reales de acceder ilegalmente a algunos espacios ferroviarios. Estas campañas pedagógicas, aunque son extensibles a toda la población, deben incidir en los principales grupos de riesgo de los *trespasses*, es decir, niños, jóvenes, personas mayores y población extranjera.

Las campañas de prevención ante los casos de accesos no autorizados a propiedades ferroviarias deben fundamentarse en: a) la reflexión y el debate de los agentes sociales implicados; b) la formación social; c) la adopción de actitudes y comportamientos cívicos y solidarios; d) la responsabilidad social; y e) las redes de solidaridad y participación ciudadana.

En lo que se refiere a los suicidios, hay que tener en cuenta de que se trata de un fenómeno complejo y multidimensional que tiene su origen en factores biológicos, genéticos, familiares, educativos, sociales, clínicos, psicológicos, culturales y ambientales (Pérez Camarero, 2009). Aunque, en general, entre las personas con tendencias suicidas la prevalencia de enfermedades mentales diagnosticadas es elevada y tienen un largo historial de tratamiento mental (European Communities, 2009).

Investigaciones recientes han demostrado que la prevención del suicidio, si bien es posible, comprende una serie de actividades que van desde el tratamiento eficaz de los trastornos mentales, la educación de los jóvenes y niños, hasta el control medioambiental de los factores de riesgo (Organización Mundial de la Salud, 2000). En este sentido, algunos estudios apuntan a que, en general, las personas que cometen suicidios en espacios ferroviarios viven a escasa distancia de donde se localiza el suicidio (Mishara, 1999; Abbot et al., 2003).

En el caso de los suicidios es necesaria una importante labor de concienciación, ya que es una de las grandes causas prevenibles de muerte prematura y de años de vida perdidos. A nivel mundial, la Organización Mundial de la Salud (2012) en colaboración con la Asociación Internacional para la Prevención del Suicidio (2012), han elegido el 10 de septiembre de 2012 como el *Día Mundial para la Prevención del Suicidio*. De acuerdo con esta iniciativa, la OMS insta a los gobiernos a elaborar marcos normativos para desarrollar estrategias nacionales de prevención del suicidio, mediante el desarrollo de programas de prevención y actividades comunitarias que plasmen las declaraciones políticas y los resultados de las investigaciones realizadas.

A nivel europeo, la Comisión Europea pide a los Estados miembros colaboración para desarrollar estrategias que permitan restringir el acceso a los métodos de suicidio, elaborar programas de formación específica para los profesionales de la salud y realizar un seguimiento adecuado de los comportamientos suicidas (Commission of the European Communities, 2005).

En conjunto, tanto en el caso de los suicidios como de los *trespasses*, los objetivos de las campañas de sensibilización se deben centrar en: a) crear en la sociedad un estado de concienciación social; b) generar un estado de opinión que facilite otras acciones positivas; c) promover actitudes positivas; d) originar una reflexión sobre la problemática; y e) facilitar la movilización y participación de la sociedad en el abordaje de los suicidios y *trespasses*.

## 5. Conclusiones

En el artículo se ha documentado la importancia de que la Sociología aborde el estudio del transporte como fenómeno social. La contribución de este estudio a la Sociología del Transporte es que se ha examinado el transporte ferroviario a partir de las consecuencias sociales que producen los suicidios y accidentes por accesos no autorizados a propiedades ferroviarias (*trespasses*).

El suicidio, así como las muertes ocasionadas por accesos no autorizados a propiedades ferroviarias, son ante todo un grave problema de salud pública que ocasiona un elevado número de muertes prematuras y prevalencia de discapacidad en España, además tienen un elevado coste económico y humano de años de vida perdidos.

A nivel europeo, en el año 2010 los suicidios representaban dos tercios del total de víctimas y, junto con los accesos indebidos a entornos ferroviarios, constituían el 87% de las muertes que tienen lugar en el sistema ferroviario.

En los últimos años, la seguridad en los ferrocarriles europeos ha mejorado notablemente, reduciéndose el número de accidentes y víctimas mortales. Una de las prioridades para la seguridad ferroviaria en el futuro será mejorar la información y la calidad de los datos disponibles, mediante la armonización de la gestión de la seguridad (Agencia Ferroviaria Europea, 2009). En este sentido, a partir del año 2011, los Estados miembros de la Unión Europea están obligados a facilitar información sobre determinados indicadores de seguridad de acuerdo a definiciones comunes. La puesta en práctica de un sistema de información estadístico a nivel europeo permitirá crear y evaluar las medidas de prevención y mitigación relacionadas con los suicidios y *trespasses*.

En España, tanto el número de suicidios como de muertes por accesos no autorizados a propiedades ferroviarias, ha descendido significativamente (Comisión de Investigación de accidentes ferroviarios, 2010). En el periodo comprendido entre 2006 y 2010, el número de suicidios en España ha descendido un 34,4%, y los *trespasses*, se han reducido un 66,7%.

En los últimos años, el esfuerzo de las compañías ferroviarias por mejorar los sistemas de seguridad, ha permitido que se reduzcan el número de accidentes y víctimas mortales. No obstante, estas medidas son insuficientes ya que se siguen produciendo accidentes mortales.

Cada vez más, las investigaciones inciden en la necesidad de realizar campañas de información y sensibilización sobre los riesgos de acceder ilegalmente a algunos espacios ferroviarios. Estas campañas deben dirigirse a la población en su conjunto, aunque deben incidir en los principales grupos de riesgo de los *trespasses*: niños, jóvenes, personas mayores y población extranjera.

En lo que respecta al suicidio, la propia complejidad de los factores relacionados con el suicidio dificulta el desarrollo de estrategias disuasorias. En su caso, es crucial establecer definiciones precisas que lleven a la identificación de los factores de riesgo teniendo en cuenta que su origen es complejo y multifactorial. Al mismo tiempo, las medidas preventivas y disuasorias se deben fundamentar en dificultar el acceso a los métodos de suicidio<sup>2</sup> (como el acceso a las propiedades ferroviarias), la elaboración programas de formación

---

<sup>2</sup> En ocasiones, las medidas para prevenir los accidentes por *trespasses* pueden producir un “efecto llamada” de potenciales suicidas. En general, los puntos donde se suelen producir accidentes por accesos no autorizados, constituyen un lugar de atracción de los suicidas por su peligrosidad.

específica para los profesionales de la educación y la salud, y el seguimiento adecuado de los comportamientos suicidas. Por ejemplo, en Reino Unido el *National Suicide Prevention Group* integrado por asociaciones de caridad como los *samaritans* y representantes de la industria ferroviaria y la policía, llevan a cabo numerosas actividades, como formación para los empleados y campañas informativas, entre otras. En Bélgica, Infrabel<sup>3</sup> ha firmado un convenio con la prensa belga sobre cómo informar acerca de este tipo de accidentes, incluida la prevención del exceso de énfasis sobre este tema en los medios de comunicación y la exclusión de detalles gráficos con el fin de evitar comportamientos imitadores.

En conclusión, las estrategias a implementar deben dirigirse a llevar a cabo acciones preventivas a nivel social, tanto dentro del ámbito de la salud mental como del ferrocarril (Houwelingen, 2011). El mejoramiento de la detección por parte de la comunidad, la remisión y el control del comportamiento suicida son pasos importantes para su prevención (Organización Mundial de la Salud, 2004 y 2006).

## 6. Bibliografía

[1] ABBOT, Rachel, YOUNG, Sam K., GRANT, Gordon, GOWARD, Peter, SAEGER, Paul, PUGH, Mary J. y LUDLOW, James (2003). *Railway Suicide. An investigation of individual and organisational consequences. A report of the SOVRN Project*. Great Britain. Doncaster and South Humber Healthcare NHS.

[2] AGENCIA FERROVIARIA EUROPEA (2009). “La seguridad ferroviaria en la Unión Europea: Resultados”. *Estrategias Ferroviarias Europeas*. 45.

[3] ANTOLÍN IRIA, Jose Enrique (1999). “El transporte como problema sociológico”. *Inguruak: Revista Vasca de Sociología y Ciencia Política*. 23. Pp. 57-70.

[4] ASOCIACIÓN INTERNACIONAL PARA LA PREVENCIÓN DEL SUICIDIO (2012). Disponible en: <http://www.iasp.info/es/index.php> (diciembre de 2011)

[5] BAUMERT, Jens, ERAZO, Natalia y LADWIG, Karl-Heinz (2005). “Ten-year incidence and time trends of railway suicides in Germany from 1991 to 2000”. *European Journal of Public Health*. 16 (2). Pp. 173–178.

[6] COMISIÓN DE INVESTIGACIÓN DE ACCIDENTES FERROVIARIOS (2009). *Estudio sobre el arrollamiento de personas en plena vía, estación o apeadero y pasos a nivel. Años 2005- 2008*. Madrid. Ministerio de Fomento.

[7] COMISIÓN DE INVESTIGACIÓN DE ACCIDENTES FERROVIARIOS (2010). *Memoria anual 2009 de la investigación de accidentes e incidentes ferroviarios en la Red Ferroviaria de Interés General*. Madrid. Ministerio de Fomento.

[8] COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (2005). *Improving the mental health of the population. Towards a strategy on mental health for the European Union. Green Paper 484*. Brussels. Commission of the European Communities.

---

<sup>3</sup> Administrador de las infraestructuras belgas

[8] DE BOER, Enne (1986). Transport Sociology, DE BOER, Enne (Ed.). *Transport sociology: social aspects of transport planning*. Oxford. Pergamon. Pp. 7-16.

[9] EUROPEAN COMMUNITIES (2009). *Conclusions from the EU thematic conference "Preventing of Depression and Suicide- Making it Happen"*. Brussels. European Communities.

[10] EUROPEAN RAILWAY AGENCY (2012). *Railway safety performance in the European Union*. Paris. European Railway Agency.

[11] EUROPEAN RAILWAY AGENCY (2011a). *Railway safety performance in the European Union*. Paris. European Railway Agency.

[12] EUROPEAN RAILWAY AGENCY (2011b). *EU Railway Safety Data 2010*. Disponible en: <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Pages/EU-Railway-Safety-Data-2010.aspx>

[13] EUROPEAN TRANSPORT SAFETY COUNCIL (2001). *Transport Accident and Incident Investigation in the European Union*. Brussels. European Transport Safety Council.

[14] HOUWELINGEN, Cornelis AJ van (2011). *Studies into train suicide. The contribution of psychopathology, railway parameters and environmental factors*. Netherlands. Vrije Universiteit.

[15] HUERGO LORA, Covadonga y OCIO LEÓN, Sergio (2009). "Suicidio. Factores de Riesgo". *Interpsiquis. Congreso Virtual de Psiquiatría y Neurociencias*. Febrero de 2009.

[16] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (2009). *Defunciones según la Causa de Muerte*. Disponible en: <http://www.ine.es/jaxi/menu.do?type=pcaxis &path=/t15/p417/a2009/&file=pcaxis>

[17] INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS. Disponible en: [www.uic.org](http://www.uic.org)

[18] INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS (2011). *Safety Database Activity Report*. Paris. UIC.

[19] KALLBERG, Veli-Pekka, ANILA, Matti, PAJUNEN, Kirsi, KALLIO, Mikko y HYTÖNEN, Jouni (2002). "Assessment and Improvement of Safety at Finnish Railway-Road Grade Crossings". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1801. Pp. 54-60.

[20] KRUG, E., DAHLBERG, L., MERCY, J., ZWI, A. y LOZANO, R. (2002). *World report on violence and health*. Geneva. World Health Organization.

[21] MIRO, Francisco, BARBERÍA, Eneko, CORREAS, César J. y FERNÁNDEZ, Esteban (2006). "Violencia del método suicida y circunstancias acompañantes en una revisión de 42 muertes de etiología autolítica". *PSIQUIATRIA.COM*. 10 (4).

[22] MISHARA, Brian L. (1999). "Suicide in the Montreal Subway system: Characteristics of the victims, antecedents, and implications for prevention". *Can J Psychiatry*. 44 (7). Pp. 690-696.

[23] MUÑOZ, Javier, VEGA, Johann Martin, MENDOZA, Carlos Enrique y MUÑOZ, Héctor (2005). "Suicidio e intento de suicidio por salto desde altura en el puente Villena". *Revista de Neuro- Psiquiatría*. 68. Pp. 140-152.

[24] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (2000). *Prevención del suicidio. ¿Cómo establecer un grupo de supervivientes?* Ginebra. Organización Mundial de la Salud.



[25] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (2004). *For which strategies of suicide prevention is there evidence of effectiveness?* Copenhagen. Organización Mundial de la Salud.

[26] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (2006). *Prevención del suicidio. Recurso para consejeros*. Ginebra. Organización Mundial de la Salud.

[27] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (2012). *Día Mundial para la Prevención del Suicidio*. Disponible en: [http://www.who.int/mediacentre/events/annual/world\\_suicide\\_prevention\\_day/es/index.htm](http://www.who.int/mediacentre/events/annual/world_suicide_prevention_day/es/index.htm)

[28] OBSERVATORIO DEL TRANSPORTE EN EUSKADI - OTEUS (2005) Estudio general de la sociología del transporte de viajeros de la Comunidad Autónoma Vasca. Disponible en: [www.industria.ejgv.euskadi.net/r44886/es/contenidos/informe\\_estudio/resultados\\_sociologia\\_mov\\_2005/es\\_13016/resultados\\_estudio\\_mov\\_2005.html](http://www.industria.ejgv.euskadi.net/r44886/es/contenidos/informe_estudio/resultados_sociologia_mov_2005/es_13016/resultados_estudio_mov_2005.html)

[29] PÉREZ CAMARERO, Santiago (2009). “El suicidio adolescente y juvenil en España”. *Revista de Estudios de Juventud*. 84. Pp. 126-142.

[30] RÅDBO, Helena, SVEDUNG, Inge y ANDERSSON, Ragnar (2008). “Suicide prevention in railway systems: Application of a barrier approach”. *Safety Science*. 46. Pp. 729-737.

[31] RAIL SAFETY AND STANDARDS BOARD (2004). *Trespass and vandalism cost modelling*. London. Rail Safety and Standards Board,

[32] RESTRAIL. *REduction of Suicides and Trespasses on RAILway property*. Disponible en: <http://www.restrail.eu/>.

[33] RÍOS IVAR, Josefa, TÁULER, Ángeles y RAZQUIN, Francisco Javier (1990). *Análisis socioeconómico y evolución de la movilidad metropolitana en Madrid, 1988*. Madrid. Estudios Territoriales.

[34] ROMERO, Jose Luis, GAMERO, Joaquín J. y MARTÍNEZ, Pedro (2007). “Aspectos epidemiológicos del suicidio consumado en la provincia de Cádiz (1999-2003)”. *Cuaderno Médico Forense*. 13 (47). Pp. 33-44.

[35] RUIZ PÉREZ, Isabel y ORLY DE LABRY-LIMA, Antonio (2006). “El suicidio en la España de hoy”. *Gaceta Sanitaria*. 20 (1). Pp. 25-31.

[36] UIC (2011). *Management of distressing events and prevention of post-traumatic stress*. Paris. UIC.

[37] VILLETAZ, Patrice (2007). “El suicidio en Suiza”. *Justicia Juris*. Vol. 7. Pp. 47-53.

[38] YAGO, Glenn (1983). “The Sociology of Transporting”. *Annual Review of Sociology*. Vol. 9. Pp. 171-190.

## Tratamiento de consolidación de terraplén en el PK 208/100 a 208/200 de la línea Calatayud-Valencia mediante inyecciones de fracturación hidráulica con lechada estable de cemento, a través de tubos manguito

### *Embankment compacting treatment in section 208/100 - 208/200 of the Calatayud-Valencia line by means of injections of hydraulic fracturing with stable cement grout through sleeve tubes*

José Manuel López Moreno  
Obras y Proyectos Geotécnicos S.L.

#### Resumen

ADIF adjudicó el proyecto de CONSOLIDACIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE TERRAPLÉN FERROVIARIO ENTRE LOS PP.KK 208/100 Y 208/200, LÍNEA CALATAYUD – VALENCIA. TRAYECTO BARRACAS – MASADAS BLANCAS, a la empresa constructora AZVI. El tipo de circulación que transita por dicha línea incluye tanto trenes de viajeros como de mercancías, ocasionando estos últimos, debido a la baja frecuencia de sus acciones, un deterioro mayor en su nivelación y consecuentemente la necesidad periódica de aportación de balasto. El problema descrito se abordó con un método de consolidación del terraplén por medio de inyecciones de fracturación hidráulica a través de tubos manguito (inyecciones armadas), cuya realización se encargó a la empresa especializada Obras y Proyectos Geotécnicos, S.L. (OPG), en agosto de 2011. Al finalizar los trabajos, se realizaron ensayos siguiendo el método Cross-hole, para cuantificar la mejora alcanzada, proporcionando velocidades de onda de cortante  $V_s$  en el prisma de terreno tratado, por encima de los 400 m/s, como definía el proyecto.

Cabe señalar que este procedimiento se había aplicado en 2005, dentro del proyecto europeo Supertrack, al acceso sur del viaducto de Amposta (Tarragona). En esta primera aplicación del método intervino el mismo equipo profesional de OPG. La aplicación cumplió perfectamente la condición de conservar la vía en situación de rodadura confortable (movimientos del carril no superiores a 3 mm en 5 m), habiéndose mantenido durante las inyecciones del subbalasto, capa de forma y terraplén, hasta 7 m de profundidad, las velocidades de operación de los trenes (mercancías y viajeros), entre ellos, el paso del Euromed a 200 km/h.

Palabras clave: Cuñas de transición, inyecciones armadas, mantenimiento velocidades de servicio, terraplén, tubo de manguitos, circulación, control, Barracas - Masadas Blancas.

#### Abstract

*The consolidation and stabilization of the embankment located in the railway line CALATAYUD-VALENCIA, at the section between P.K. 208/100 AND P.K. 208/200 (within BARRACAS – MASADAS BLANCAS sector) was assigned to AZVI as general contractor. The transit in this line includes trains for the transportation of passengers and freight. The latter, because of their lower frequency of actions, gave rise to sizeable deformations of the track, requiring frequent corrections of ballast thickness, for achieving its adequate levelling. The problem was solved using hydraulic fracture grouting, through sleeve pipes, that was performed by Obras y Proyectos Geotécnicos, S.L. (OPG), specialized firm subcontracted by AZVI. The control of the improvement achieved was effected by obtaining the values of  $V_s$  (velocity of shear waves) within the grouted volume of soil, using the cross-hole technique. All the values obtained for  $V_s$  were higher than 400 m/s.*

*It has to be pointed out, that the professional team of OPG in charge of the grouting improvement was the same that, through the use of the same technique had improved, in 2005, the transition zone to the southern abutment of the railway bridge over the Ebro river at Amposta (Tarragona). This job was part of the Spanish contribution to the European Supertrack Project, and it was carried out simultaneously with the railway traffic (passenger and freight trains) operating at its normal speed. The passenger trains included the Euromed, which operated at 200 km/h as the track structure (below the ballast layer) and the underlying embankment were being grouted down to a 7 m maximum depth, under the requirement of comfortable operation (movements of rail less than 3 mm in 5 m length).*

*Keywords: Transition blocks, reinforced grouting, maintenance of cruising speeds, embankment, sleeve tube, train operation, train control, Barracas - Masadas Blancas.*

## **1. Introducción**

En este estudio de síntesis, vamos a contemplar los trabajos de consolidación del terraplén con el fin de reducir los trabajos de mantenimiento de la vía en el tramo de referencia.

ADIF adjudicó el proyecto de CONSOLIDACIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE TERRAPLÉN FERROVIARIO ENTRE LOS PP.KK 208/100 Y 208/200, LÍNEA CALATAYUD – VALENCIA. TRAYECTO BARRACAS – MASADAS BLANCAS a la empresa constructora AZVI, que a su vez subcontrató a la empresa especialista OBRAS Y PROYECTOS GEOTÉCNICOS, S.L., para la realización de los trabajos de consolidación objeto de este estudio.

Las características mecánicas del tipo de circulación que transita por dicha línea, con tráfico de viajeros como de mercancías, son bien distintas, siendo estos últimos los que producen las frecuencias más bajas, y por ello, los que más afectan a la estructura de la vía, así como una defectuosa ejecución del terraplén, ocasionaban un deterioro importante en la nivelación de la vía y subsiguientemente una necesidad periódica de aportación de balasto. Al ir repitiéndose este fenómeno e ir recargando con un mayor peso la plataforma de vía empeoraban todavía más los efectos sobre la misma.

A la vista de lo anterior, se tomó la decisión de resolver la base del problema del terraplén con un método que permitiera su consolidación.

Entre los métodos presentados a la Administración, se eligió como el más idóneo, la consolidación por inyecciones de fracturación hidráulica con lechada estable de cemento a través de tubos manguito (inyecciones armadas), aplicadas desde una bancada de tierra adosada lateralmente, por las siguientes razones:

1. Experiencia muy positiva de consolidación de terraplén con este mismo sistema, en el acceso sur al Viaducto sobre el Ebro en Amposta, en la línea Barcelona-Valencia con tráfico mixto de Euromed (a 200 km/h) y mercancías.
2. Creación de una estructura reticular en el terraplén sin “puntos duros” y con una capacidad portante uniforme hasta alcanzar la necesaria profundidad que asegure el apoyo del tratamiento.
3. No interrumpen el tráfico ferroviario en ningún momento ya que los trabajos se realizan desde la bancada de tierra adosada al terraplén.
4. En todo momento se controla la nivelación de la vía, pues el proceso de mejora del terreno permite asegurar que los movimientos inducidos en la vía sean en todo momento inferiores a 3 mm en 5 m.
5. Se controla en cada fase de inyección los caudales y presiones en cada uno de los manguitos, así como las viscosidades desde la mezcla inyectada.
6. Finalizados los trabajos, se comprueba la eficacia del tratamiento realizado por métodos geofísicos, deduciendo el módulo de elasticidad del terreno tratado a partir de la velocidad de propagación  $V_s$  en m/s de las ondas de cortante.

A este respecto cabe señalar que en el caso del acceso sur al Viaducto de Amposta, por tratarse de una prueba del método, integrada en el proyecto Europeo SUPERTRACK, se contrastaron las medidas de velocidades  $V_s$  antes y después del tratamiento, con la medida directa, con láser, de las deformaciones de los carriles bajo el tránsito ferroviario. Se apreció así no solo una concordancia excelente entre las estimaciones de módulos de deformación por ambos métodos, sino además que, en la zona de terraplén tratada, se cumplía en todo momento la condición de tránsito confortable (deformaciones de carril inferiores a 3 mm en 5 m).

En apartados sucesivos se presenta un resumen del protocolo seguido para la ejecución de las inyecciones armadas, una serie de fotografías de los trabajos de campo y, finalmente, los resultados obtenidos en las medidas de propagación de ondas  $V_s$ , por el método Cross-hole, que permiten apreciar el grado de mejora del terraplén conseguido en su tratamiento.

Cabe mencionar que, durante la ejecución de los trabajos del tramo Barracas- Masadas Blancas y debido a la heterogeneidad del terreno en zonas muy localizadas, en el que existían huecos de gran tamaño, fue necesario hacer, una primera inyección con mortero para el relleno de los mismos y una segunda inyección con lechada de cemento-bentonita para efectuar la mejora por fracturación hidráulica del terreno.

## **2. Protocolo seguido para la ejecución de las inyecciones armadas**

### **A. Fracturación hidráulica del terreno**

Esta fracturación se lleva a cabo en forma controlada, de modo que las deformaciones se escalonen. Este proceso permite el tratamiento con mezclas estables a base de cemento para suelos cuya textura impediría la impregnación incluso por mezclas químicas de baja viscosidad. La referida rotura hidráulica se produce con volúmenes de lechada aplicados a través de puntos de inyección -protegidos por manguitos de goma- dispuestos en tubos de acero, con separación no superior a 0,50 metros entre puntos de inyección consecutivos de un mismo tubo. Estos puntos de inyección permiten la repetición del tratamiento cuantas veces se desee después de haber fraguado las mezclas anteriormente aplicadas, así como también la dosificación -en cada fase de inyección- del volumen y caudal empleados, lo que favorece un control muy preciso de las deformaciones inducidas en el subsuelo.

### **B. Consolidación del terreno por presión y estructuración**

La regulación del caudal de inyección forzado por rotura del terreno permite la aplicación de presiones “estáticas” crecientes, hasta la presión última de cierre de cada manguito que se prefija en proyecto. Estas presiones producen la consolidación de los pequeños dominios de terreno (de dimensión centimétrica) comprendidos entre las lenguas de lechada. En los suelos arcillosos se puede apreciar este efecto de consolidación, dado que en perforaciones de alivio de presiones intersticiales -intermedias a las de inyección- se registra durante el tratamiento una afluencia marcada de agua, la que cesa cuando se produce el fraguado de la mezcla inyectada. El resultado de este proceso consiste en la inclusión en el terreno de un esqueleto de lenguas de cemento endurecidas (resistencia de más de 40 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días en probetas de densidad igual a la inicial de la lechada, lógicamente muy superior en las inclusiones densificadas del terreno), entre las cuales se aprisiona un suelo consolidado que si se tratara de arcilla, al consolidarla a tan sólo 5 kg/cm<sup>2</sup> tendría -según la relación de Skempton- una cohesión aparente superior a 1 kg/cm<sup>2</sup>.

### **C. Armado del terreno tratado por los tubos de inyección**

Los tubos de acero del tratamiento quedan -al final del mismo- íntimamente asociados al volumen del terreno tratado. La disposición de los tubos puede prefijarse en abanico, de modo que la máxima distancia entre tubos dentro del volumen del suelo a tratar sea siempre inferior a dos veces el radio de acción de la inyección. Este último se ha contrastado repetidamente en suelos de naturaleza muy diversa (gravas, arenas, arcillas) mediante el examen directo “in situ” (excavaciones de suelo tratado) verificándose que la distancia del eje del taladro de tratamiento al borde de la zona (en la que la distribución de lenguas de lechada es masiva) resulta siempre superior a las previsiones, pero en forma mucho más dependiente de la resistencia del terreno y de las presiones de inyección que de la textura misma -más o menos fina- del suelo; circunstancia previsible por tratarse -como ya se ha señalado- de un tratamiento de rotura y consolidación, no de impregnación del suelo.



La distribución de los taladros persigue –complementariamente- el que los bulones (que en definitiva constituyen los tubos de inyección y cuya capacidad mecánica se puede reforzar en los casos precisos por introducción final de un redondo de acero en el interior del tubo) sirvan de elementos de cosido para aquellas superficies potenciales de deslizamiento del terreno -por acción de las cargas que lo solicitan- asegurando así el comportamiento mecánico necesario del suelo tratado.

Las presiones de tratamiento se ajustan -en general- a patrones sancionados por la práctica y recogidos en la literatura técnica. **En Europa se acepta habitualmente incrementar linealmente la presión de tratamiento en función de la profundidad. En nuestra experiencia, este aumento lineal puede conducir a heterogeneidades de la zona tratada, especialmente en la parte superior donde se concentran las cargas de cimentación. Por este motivo, se uniformizan más las presiones -incrementándolas en la zona superficial y reduciéndolas algo en la zona profunda-, de modo que se “precarga” el terreno de forma mucho más uniforme.**



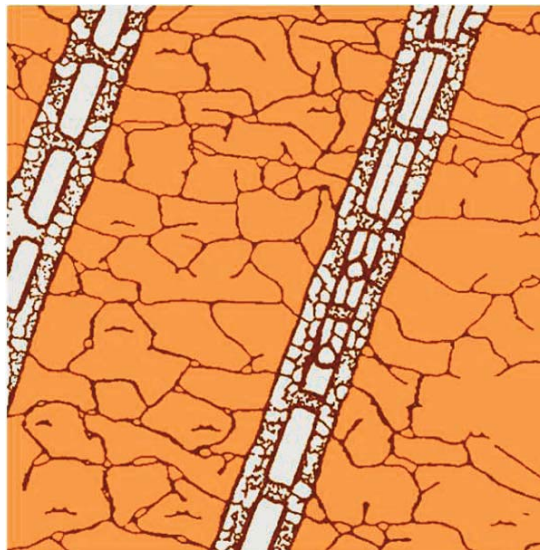
A la izquierda, estado de partida del terreno con la instalación del tubo manguito. A la derecha, presiones horizontales mínimas, creación de lenguas de inyección verticales.



A la izquierda, cambio del estado tensional del terreno, lenguas de inyección horizontales. A la derecha, continuación de la inyección.



### Transformación del estado mecánico inicial



#### D. Condiciones de aceptación en obra de las inyecciones armadas

Una vez finalizada la inyección del terreno por cada tubo manguito, el contratista lo comunica a la Dirección Facultativa y deja sin cementar interiormente el tubo de tratamiento correspondiente, con el fin de poder hacer la comprobación de que se han alcanzado las profundidades y condiciones de presión de cierre previstas, en los manguitos que dicha Dirección Facultativa decida, confrontándolas con las prefijadas en el proyecto y con las que se tengan en las partes de inyección confeccionadas en obra. En éstos deben figurar, la profundidad, las presiones de apertura de cada manguito, y la presión estática de cierre del proceso a nivel del mismo, así como el volumen inyectado en cada una de las fases.

#### 3. Control del tratamiento mediante la determinación de velocidades $V_s$ por el método cross-hole

Las figuras 1 y 2 adjuntas, reflejan la localización, en planta y alzado, de las secciones de medida de ondas  $V_s$  y los resultados obtenidos. En estos últimos, los puntos de medida se definen por la distancia de los mismos a la boca de cada tubo, por lo que su localización ha de establecerse en los perfiles de tubos que figuran en alzado.

Cabe señalar que los tubos de emisión y recepción de cross-hole son paralelos entre sí y la trayectoria del frente de ondas que se registre en el ensayo ha de estar situada perpendicularmente a los planos de los abanicos de tratamiento. Esto es necesario para que los tubos metálicos de inyección no interfieran con la velocidad de propagación de las ondas en el terreno. De este modo, la mejora de suelo que se mide, corresponde únicamente al efecto de las lenguas de inyección.

En cada sección de ensayo cross-hole se ha utilizado un tubo de emisión y dos de recepción con el fin de eliminar el posible error introducido en las medidas por el tiempo de emisión de señal.

Los gráficos de  $V_s$  en los cuatro ensayos cross-hole realizados muestran, al inicio, que el terreno no tratado (que corresponde a suelo tipo D) presenta velocidades irregulares, generalmente bajas pero siempre superiores a 250 m/s ( $V_s$  entre 270 y 360 m/s), valor que se deducía de la información geotécnica aportada. En zona tratada, las velocidades medidas superan ampliamente las previsiones de proyecto en el que se planteaba obtener una media superior a 467 m/s.

Es importante reflejar que, en las zonas de tratamiento más cercanas a la superficie del terraplén, debido a la escasa profundidad se hace más complicado alcanzarlas presiones de tratamiento a efectos de controlar las posibles fugas de mezcla en superficie del terraplén contaminándolo. A pesar de esto las velocidades obtenidas han superado siempre los 555 m/s.

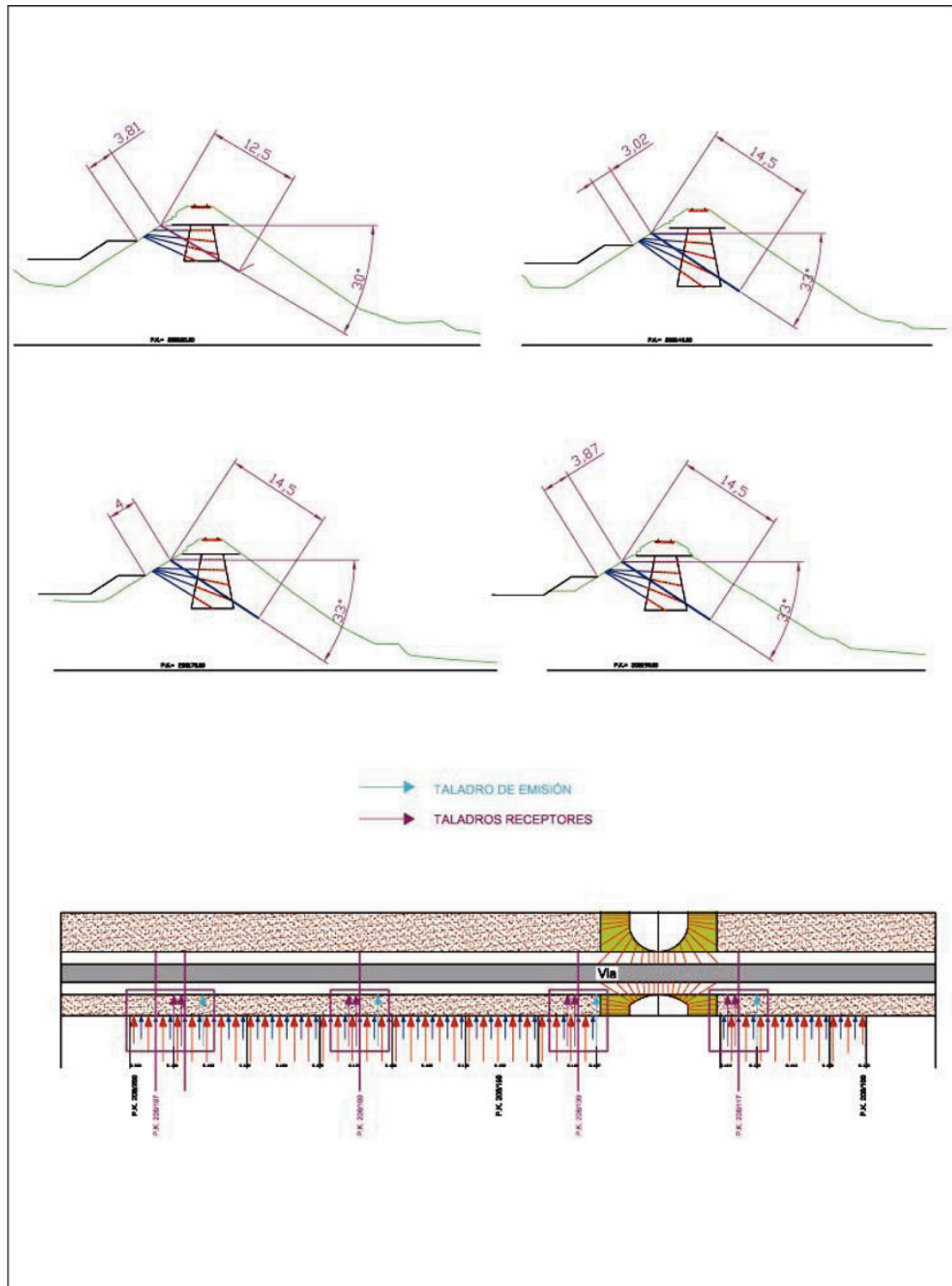
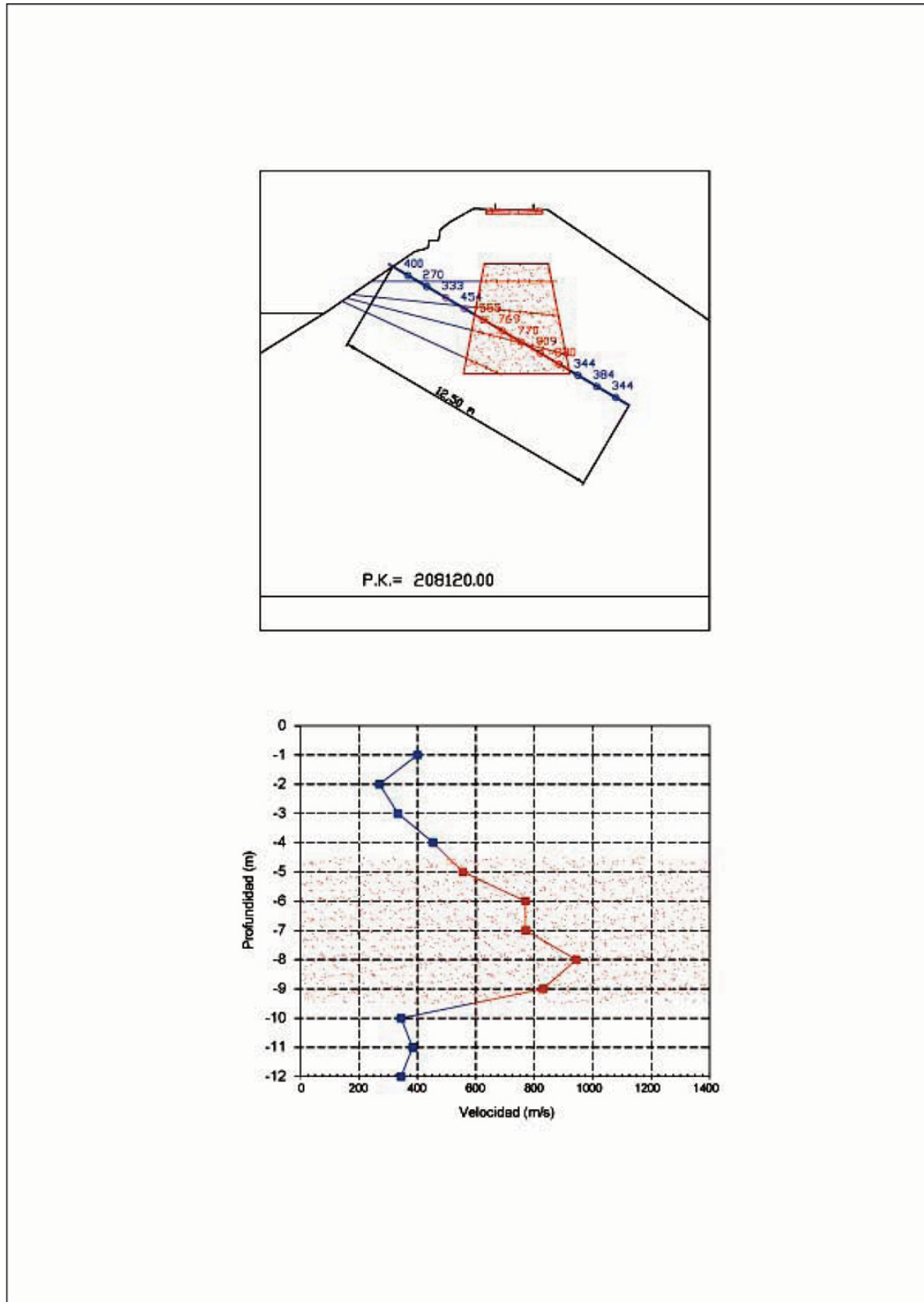
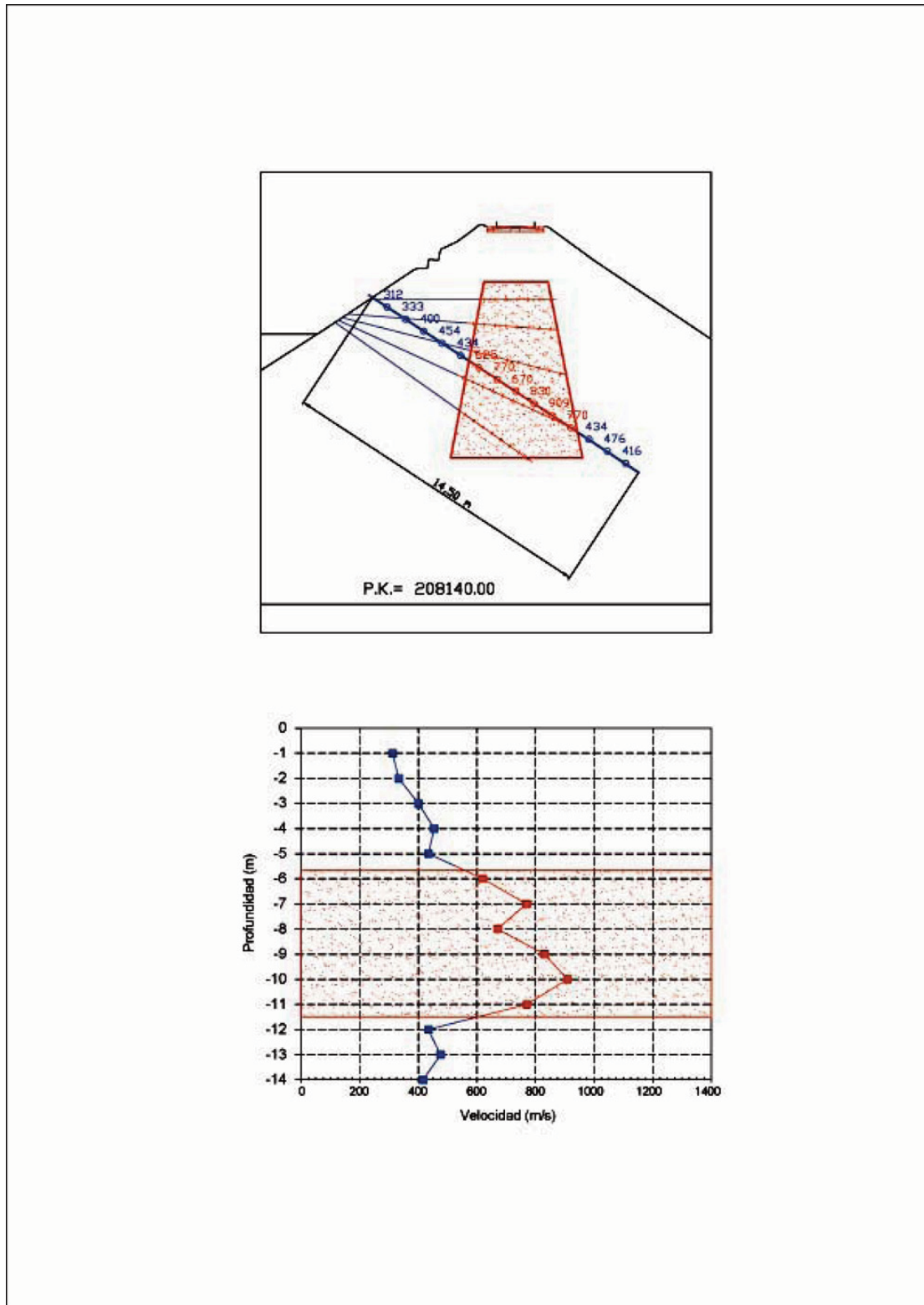


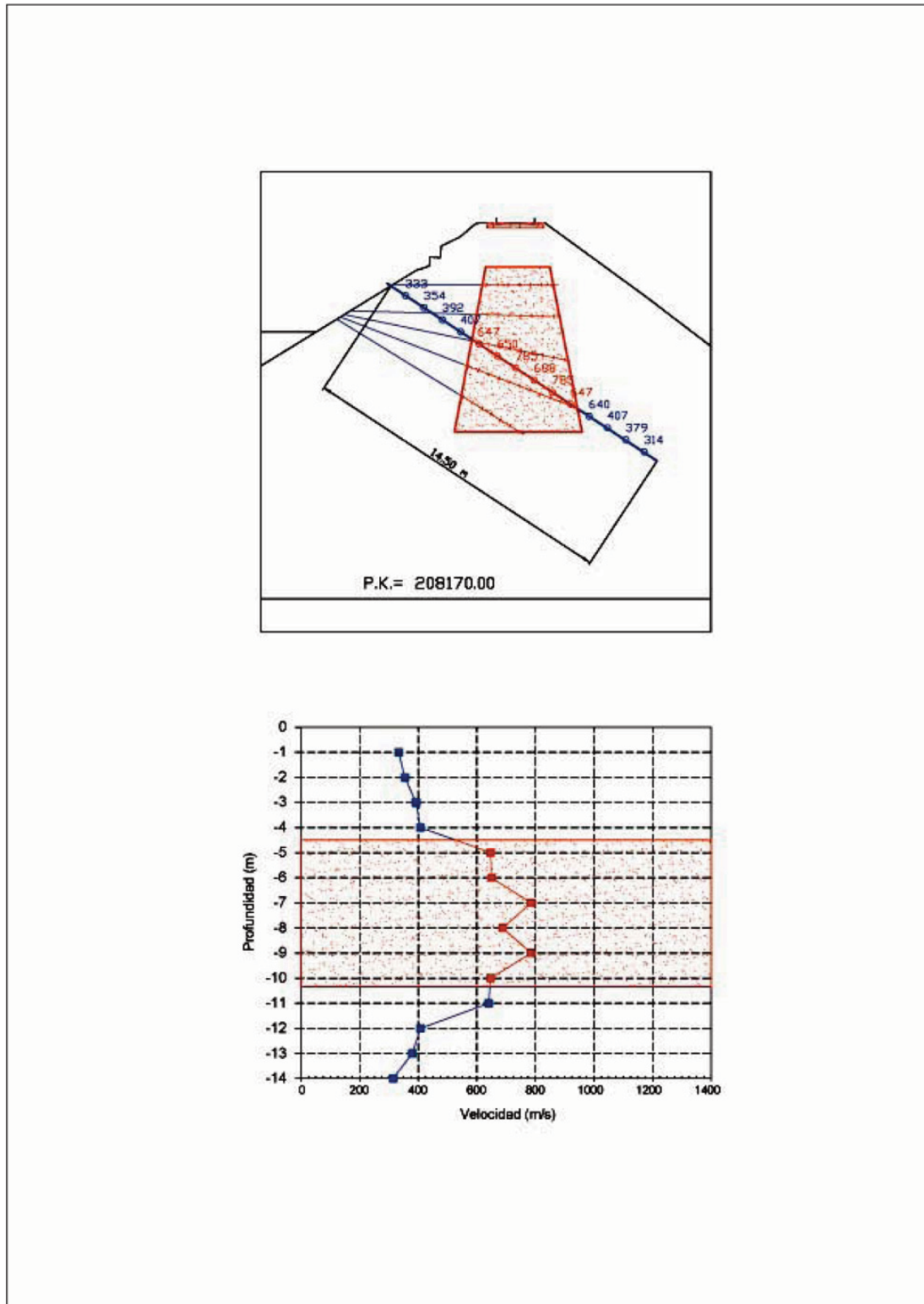
Figura 1. Planta y secciones de los ensayos Cross-hole



**Figura 2.a.** Ensayo Cross-hole nº1 P.K. 208-120  
Gráfica de resultados del ensayo

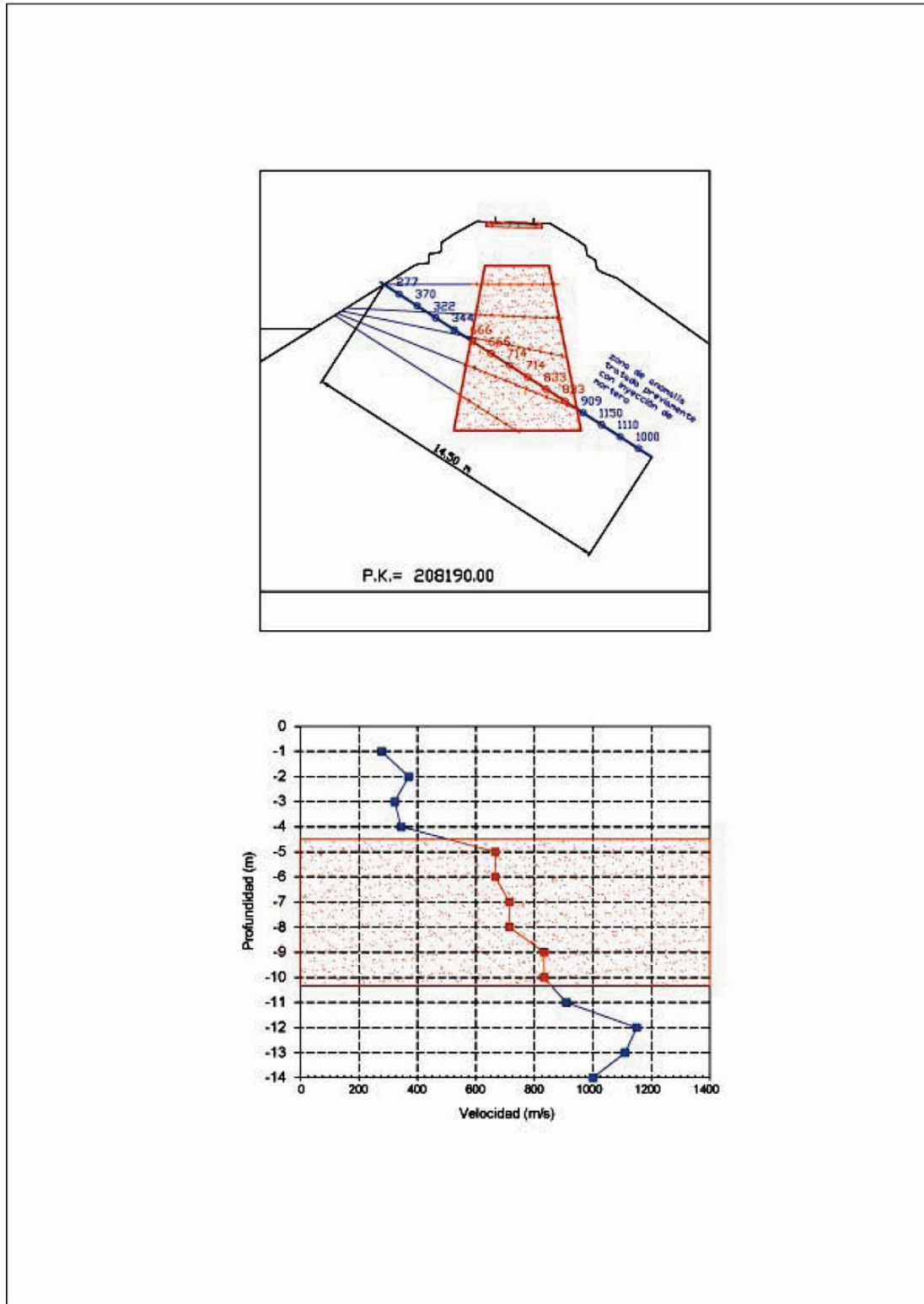


**Figura 2.b.** Ensayo Cross-hole nº2 P.K. 208-140  
Gráfica de resultados del ensayo



**Figura2.c.** Ensayo Cross-hole n°3 P.K. 208-170  
Gráfica de resultados del ensayo





**Figura 2.d.** Ensayo Cross-hole nº4 P.K. 208-190  
Gráfica de resultados del ensayo

Han de hacerse por tanto dos observaciones:

- Por un lado estas velocidades reflejan ya un suelo de compacidad más que suficiente para el objeto perseguido. Cabe recordar que en el Viaducto de Amposta en la zona más superficial tratada se obtenían velocidades  $V_s$  en torno a 400 m/s para inferiormente crecer a 500 y 600 m/s. Para estas condiciones se consiguió la rodadura confortable con un tráfico ferroviario que combinaba el Euromed a 200 km/h con trenes de mercancías. Esta situación se ha mantenido desde el verano de 2005 en que se efectuó el tratamiento.
- Por otra parte, en estas zonas más superficiales, la disposición de taladros en abanico introduce un importante efecto de bulonado o cosido del suelo tratado lo que, como se ha dicho anteriormente, potencia la mejora por encima del valor estricto de  $V_s$ .

En el ensayo nº4, en la parte final aumenta la velocidad  $V_s$  por encima de 900 m/s lo que corresponde a una zonacolvionar ala que ha accedido la inyección del mortero e inyección del sellado de los taladros de Cross-hole, produciendo su cementación.

A efectos de interpretación de las velocidades  $V_s$  en términos de módulo de deformación se pueden seguir los siguientes pasos:

- El módulo de rigidez dinámico  $G_d$ , se obtiene a partir de la velocidad  $V_s$  por medio de la relación

$$G_d = \rho \cdot V_s^2$$

Considerando, en el terreno tratado, en forma simplificada  $\gamma = 2T/m^3$

$$\rho = \frac{2 \frac{T}{m^3}}{g} = \frac{2 \frac{T}{m^3}}{9,81 \frac{m}{s^2}} \quad \text{luego } G_d = 0,2 \times V_s^2 T/m^2$$

Por ejemplo, si  $V_s = 600$  m/s,  $G_d = 72.000 T/m^2 = 7.200 \text{ kg/cm}^2$

- A partir de  $G_d$  obtenemos el módulo de Young dinámico

$E_d = G_d \cdot 2 \cdot (1 + \nu)$ , siendo  $\nu$  el coeficiente de Poisson

Si se acepta  $\nu = 0,35$

$$E_d = 2,7 \times G_d \quad \text{Para el caso anterior } E_d = 2,7 \times 7200 = 19.440 \text{ kg/cm}^2$$

- Habría de obtenerse finalmente el módulo de Young estático en función del módulo de Young dinámico.

Habitualmente  $\frac{E_d}{6} \leq E_s \leq \frac{E_d}{3}$

De forma conservadora  $E_{est} \geq \frac{E_d}{10}$

es decir,  $E_{est} \geq 1944 \text{ kg/cm}^2$

Este resultado se ha cumplido, ya que este valor obtenido es superior al módulo estático estimado en proyecto, que era de  $1200 \text{ kg/cm}^2$

#### 4. Conclusiones

La técnica de inyecciones armadas de fracturación hidráulica, que se ha utilizado en la obra de CONSOLIDACIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE TERRAPLÉN FERROVIARIO ENTRE LOS PP.KK 208/100 Y 208/200, LÍNEA CALATAYUD – VALENCIA. TRAYECTO BARRACAS – MASADAS BLANCAS, permite una mejora muy acusada y controlable de suelos, incluso si estos son totalmente arcillosos, sin interrumpir el tráfico ferroviario, cumpliendo además la condición de conservar la vía en situación de rodadura confortable (movimientos del carril no superiores a 3 mm en 5 m), como también se pudo demostrar en la aplicación experimental de Amposta y en la posterior, llevada a cabo por el laboratorio de Geotecnia del CEDEX, en la marga arcillosa del Collado de Contreras.

Esta mejora es además realizable en paralelo con un control de deformaciones del entorno muy preciso, lo que permite la realización de este tratamiento bajo instalaciones en servicio que exijan deformaciones no superiores a 1/1000 e incluso 1/2000.

Los resultados de los ensayos de Cross-hole que se han realizado para cuantificar la mejora del terreno alcanzada, han reflejado la heterogeneidad de la composición del material del terraplén. Las velocidades de las ondas de cortante  $V_s$  obtenidas en la zona del prisma de terreno tratado están por encima de los 400 m/s, que es la velocidad a partir de la cual se consideró el proyecto de ejecución, que el terreno quedaría consolidado.

Por todo ello, se pone de manifiesto el éxito alcanzado en la realización del tratamiento, superando los parámetros fijados en proyecto, que indica que se han alcanzado los objetivos previstos, tal y como se refleja en los resultados de los ensayos de Cross-hole.

#### 5. Referencias bibliográficas

[1] ANTONIO SANTOS ET AL. Madrid (2000). “Sistema de mejora prefijada del terreno compatible con movimientos milimétricos del entorno”. Libro homenaje a Jose Antonio Jiménez Salas. Geotecnia en el año 2000.

[2] ANTONIO SANTOS, V. CUELLAR. Madrid (2006). “Mechanical improvement of an argillaceous marl through cement-based reinforced grouting”. Grouting soil improvement geosystems including reinforcement. Helsinki.

[3] Tratamiento de la cuña de transición en el acceso sur al Viaducto del Ebro (Amposta) realizado para ADIF dentro del proyecto Europeo SUPERTRACK.

## **6. Reportaje fotográfico**



**Fotografía 1.** Planta de inyección y depósitos de reciclado de agua.



**Fotografía 2.** Vista del terraplén con tráfico de viajeros durante la realización de los trabajos.





**Fotografía 3.** Vista del terraplén con tráfico de mercancías durante la realización de los trabajos



**Fotografía 4.** Trabajos de perforación en el terraplén.





**Fotografía 5.** Trabajos de perforación desde tunel existente bajo terraplén.



**Fotografía 6.** Disposición de abanicos de tratamiento.



**Fotografía 7.** Control de nivelación de precisión de la vía.

La revista Vía Libre Técnica - investigación ferroviaria es una publicación científica digital con versión impresa que pretende acoger los artículos que dan a conocer resultados de investigaciones, estudios o desarrollos relevantes en el ámbito del transporte en general y del ferrocarril en particular.

**diciembre 2013**  
**número 7**

**Accesibilidad de la red actual de Cercanías de Madrid y la incidencia en la misma del Plan de Infraestructuras Ferroviarias de Cercanías para Madrid (2009-2015)**

**Análisis cinemático del tiempo empleado por los trenes a su paso por limitaciones de velocidad**

**Análisis de una vía con traviesas cuadro**

**Diseño de Redes de Comunicaciones bajo las Restricciones Típicas de un Entorno Ferroviario**

**Economía y Técnica, de la mano en las Telecomunicaciones Ferroviarias**

**Suicidios y accesos a vía no autorizados en los ferrocarriles: análisis y medidas para su mitigación y prevención**

**Tratamiento de consolidación de terraplén en el PK 208/100 a 208/200 de la línea Calatayud-Valencia mediante inyecciones de fracturación hidráulica con lechada estable de cemento, a través de tubos manguitos**



FUNDACIÓN DE LOS  
FERROCARRILES  
ESPAÑOLES