

ANÁLISIS COSTE - BENEFICIO

Efecto de la velocidad de diseño en el coste de construcción de la infraestructura

Ignacio González Franco ⁵

Los datos disponibles sobre los costes de construcción de infraestructuras de alta velocidad presentan un enorme rango de variación: se mencionan valores que oscilan entre los 4 y los 48 millones de euros₂₀₀₅ por kilómetro de vía doble. Esta dispersión se explica por diferencias de orografía y tipo de terreno, diversas normativas técnicas, ambientales y urbanísticas; distintos costes según países y también diferentes características técnicas y prestaciones.

Resulta muy complejo realizar un análisis de tipo "top down" que separe el efecto de todos estos factores y que permita analizarlos por separado. Por ello, en este artículo se realiza un análisis de tipo "bottom-up" para analizar la influencia que tiene en el coste de inversión de una nueva infraestructura ferroviaria la velocidad para la que se diseña ésta. Dejando fijos los demás factores -como son los costes unitarios, la calidad portante del terreno o las normativas aplicables-, se comprueba que se mantienen grandes diferencias entre los costes de construcción según el relieve del terreno; pero para el mismo tipo de relieve, es mucho menos importante la variación del coste al cambiar la velocidad.

Pueden resumirse las conclusiones señalando que los costes muestran, para una misma velocidad, una gran variabilidad según el relieve del terreno (observándose diferencias del orden 1 a 8), mientras que la variabilidad en un mismo tipo de relieve al cambiar la velocidad es más limitada: oscila entre 1 a 1,3 y 1 a 1,97 al pasar de 200 a 350 km/h para la construcción de una nueva línea de vía doble.

PALABRAS CLAVE

Costes de la alta velocidad, construcción de líneas, velocidad, diseño de líneas.

⁵ igonalez@ffe.es. Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Effect of the design speed on the construction cost of the infrastructure

Ignacio González Franco

ABSTRACT

The data available on the construction costs of high speed infrastructures show an enormous range of variation: several studies mention values which fluctuate between 4 and 48 million euros2005 per kilometre of double track. This dispersion is explained by differences in orography and types of terrain, various technical, environmental and urban regulations implemented; different costs according to countries and also different technical characteristics and performance.

It is very complex to carry out a "top down" analysis that isolates the effect of all these factors and allows them to be analysed separately. For this reason, in this paper we carry out a "bottom-up" analysis to analyse the influence of the design speed of a new railway infrastructure on its investment cost. The other factors being fixed -such as unit costs, type of terrain or applicable regulations-, it is proved that there are big differences on the construction costs depending on the orography of the terrain used; but for the same orography the variation in the cost when changing the speed is not particularly important.

The conclusions of the analysis can be summarized by pointing out that, for the same speed, costs show a great variability depending on the relief of the terrain (finding differences in the order of 1 to 8), while variability in the same type of relief is more limited when changing the speed: it fluctuates between 1 to 1.3 and 1 to 1.97 when going from 200 to 350 km/h for the construction of a new double track line.

KEY WORDS

High speed costs, construction of lines, speed, design of lines.

Efeito da velocidade de dimensionamento no custo de construção da infraestrutura

Ignacio González Franco

RESUMO

Os dados disponíveis sobre os custos de construção de infraestruturas de alta velocidade apresentam um enorme intervalo de variação: mencionam-se valores que oscilam entre os 4 e os 48 milhões de euros2005 por quilómetro de via dupla. Esta dispersão explica-se por diferenças em termos de orografia e tipo de terreno, diversidade de normativas técnicas, ambientais e urbanísticas; custos distintos associados a cada país e também diferentes características técnicas e prestações.

Desta forma é muito complexo realizar uma análise do tipo "top down" que separe o efeito de todos estes factores e que permita a sua análise separadamente. Por isso, neste artigo realiza-se uma análise do tipo "bottom-up" para analisar a influência no custo de investimento de uma nova infraestrutura ferroviária da velocidade para a qual esta é dimensionada. Mantendo todos os restantes factores fixos -tais como os custos unitários, a capacidade resistente do terreno ou as normativas aplicáveis-, comprova-se que se registam grandes diferenças entre os custos de construção em função do relevo do terreno; mas para o mesmo tipo de relevo, o impacto da velocidade na variação do custo é muito menos importante.

As conclusões podem resumir-se destacando que os custos apresentam, para uma determinada velocidade, uma grande variabilidade em função do relevo do terreno (sendo observadas diferenças da ordem de 1 a 8), enquanto a variabilidade para o mesmo tipo de relevo ao alterar a velocidade é mais limitada: oscilando entre 1 a 1,3 e 1 a 1,97 ao passar de 200 a 350 km/h para a construção de uma nova linha em via dupla.

PALAVRAS CHAVE

Custos da alta velocidade; construção de linhas; velocidade; dimensionamento de linhas.

Ignacio González Franco

Efecto de la velocidad de diseño en el coste de construcción de la infraestructura

Introducción y planteamiento

El objetivo principal de este artículo es analizar el efecto de la variación de la velocidad para la que se diseña una línea ferroviaria en los costes de construcción de esta línea.

El trabajo se enmarca en el ámbito de un estudio más ambicioso que pretende optimizar la velocidad de diseño de una línea ferroviaria que se proyecta construir, tratando de mejorar su rentabilidad económico-social (u optimizar según algún otro criterio). El aumento de la velocidad de diseño de una línea ferroviaria requiere normalmente una mayor inversión y mayores costes de mantenimiento de la infraestructura, pero también aumenta los ingresos, reduce los costes operativos y permite la captación (creciente con la velocidad) de viajeros procedentes de otros modos de transporte con mayores costes externos. Por todo ello, es relevante el análisis de las relaciones funcionales entre la velocidad de diseño y cada uno de los resultados de costes e ingresos, para poder simular el resultado que se obtendría en términos de rentabilidad económico social o financiera con cada velocidad. Este estudio global se realiza en una tesis doctoral (González Franco, 2015) en elaboración en el momento de redactar este artículo.

La cuestión del efecto de la velocidad en los costes de construcción de la infraestructura tiene un interés en si mismo, ya que permite orientar sobre cuáles son las relaciones funcionales entre velocidad e inversión y cuáles las diferencias de costes previsibles al variar la velocidad.

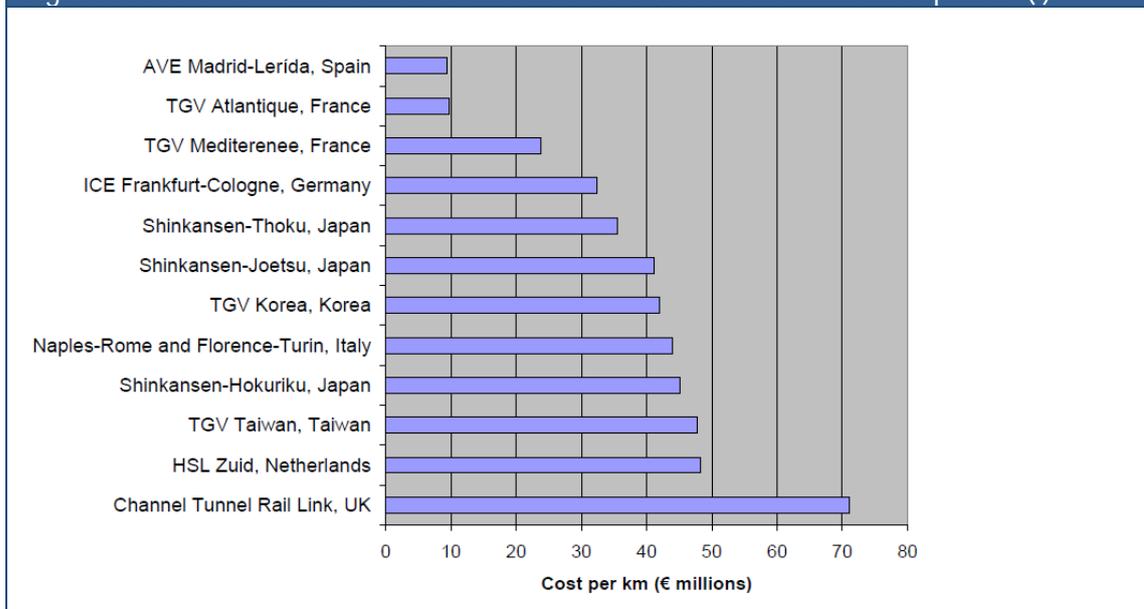
Analizar la influencia que tiene la velocidad en los costes de inversión es una tarea complicada: Los datos disponibles sobre los costes de construcción de infraestructuras de alta velocidad presentan un enorme rango de variación: se mencionan valores en diferentes estudios que oscilan entre los 4 y los 48 millones de euros₂₀₀₅ por cada kilómetro de vía doble electrificada para velocidades del orden de 300 km/h o más (Cenit, 2008). Esta dispersión en los costes se explica por diferencias de relieve y calidad de terreno, por las diversas normativas técnicas, ambientales y urbanísticas que se aplican en cada caso; por ser distintos los costes según países y su evolución en el tiempo; y también por ser diferentes las características técnicas y las prestaciones que se exigen a la infraestructura (entre ellas, la velocidad para la que se ha diseñado cada uno de los tramos de la línea).

La escasez de datos referentes a diferentes infraestructuras ferroviarias que presentan características similares pero con distintas velocidades de diseño, limita el análisis y dificulta la elaboración de una metodología válida basada en la explotación de datos de pasado que posibilite una comparación homogénea. Este hecho se agrava a consecuencia del distinto contexto económico y geográfico en que se presenta cada una de las diferentes referencias disponibles. Por ejemplo, los precios básicos asociados a la estructura de costes (salarios, materiales,...) marcan relevantes diferencias según el país y año que se analiza. Otra dificultad añadida y notable entre diferentes países son las diferentes leyes de expropiación, los criterios de definición de la superficie expropiable, indemnizaciones, etc. También la diferente calidad del terreno en cuanto a resistencia portante (como se comprueba en el caso de los Países Bajos) tiene enorme influencia.

Estas variaciones provocan grandes diferencias entre proyectos que presentan los mismos requerimientos técnicos, lo que al final se traduce en grandes diferencias en costes de inversión. El estudio elaborado por (Steer Davies, 2004), en el que se

contempla el coste de construcción de líneas de alta velocidad en diferentes países del mundo (España, Francia, Alemania, Japón, Corea, Italia, Taiwán, Países Bajos y Reino Unido) refleja perfectamente la variabilidad observada (Figura 1).

Figura 1. Coste de construcción de líneas de alta velocidad en diversos países (I)



Fuente: Steer Davies, 2004

Otro estudio realizado por el CENIT (CENIT, 2008), confirma también la diferencia en costes según línea y país (véase Tabla 1).

Tabla 1. Coste de construcción de líneas de alta velocidad en diversos países (II)

País	Líneas	M€/km (*)
Francia	París-Lyon	4,44
	TGV-Atlántico	7,40
	Valence - Marsella	14,52
Japón	Tokaido	19,26
	Sanyo	21,48
	Joetsu	48,13
	Tohoku	31,84
Alemania	Hannover-Würzburg	25,18
	Mannheim-Stuttgart	26,66
	Colonia - Frankfurt	26,97
España	Madrid-Sevilla	7,22
	Madrid - Lleida	10,37
Reino Unido	Londres-Folkestone (1er tramo)	31,12

(*) Actualizados año 2005

Fuente: CENIT, 2008

Las diferencias en costes no sólo se observan cuando se comparan líneas de diferentes países, sino también en infraestructuras de un mismo país. Si se analizan los costes de construcción de líneas de alta velocidad españolas se aprecia también una grandísima variabilidad en lo relativo a costes unitarios (véase tabla 2), lo que dificulta enormemente la determinación de una metodología común y válida.

Ignacio González Franco*Efecto de la velocidad de diseño en el coste de construcción de la infraestructura***Tabla 2. Costes de inversión de líneas de alta velocidad españolas**

	Madrid-Barcelona-Figueras						
	Madrid-Lleida	Lleida-Barcelona	Barcelona-Frontera Francesa	Madrid-Sevilla	Cordoba-Malaga	Bobadilla-Granada	Madrid-Toledo
<i>Puesta en servicio</i>	2003	2008	2013	1992	2007	2015	2005
<i>km de explotación</i>	468	196	134	476	155	125	21
<i>Velocidad diseño</i>	350	350	350	270	350	-	220
<i>Coste total (M€)</i>	4405	4635	3429	2821,4	2277,5	1410	215
<i>Coste por kilómetro (M€/km)</i>	9,4	23,6	25,6	5,9	14,7	11,3	10,2

	Madrid-Levante					
	Madrid-Valladolid	Torrejón-Montilla	Montilla-Requena-Valencia	Montilla-Albacete	Variante de Pajares	Orense-Santiago
<i>Puesta en servicio</i>	2007	2010	2010	2010	-	2011
<i>km de explotación</i>	201	224	144	70	50	87
<i>Velocidad diseño</i>	500	350	350	350	350	350
<i>Coste total (M€)</i>	4503	2785	2924	583	3006	2547
<i>Coste por kilómetro (M€/km)</i>	22,4	12,4	20,3	8,3	60,1	29,3

Fuente: Datos Adif 2009-2010

Ante las dificultades y limitaciones descritas, y para aislar el efecto de la velocidad en el coste de construcción, se opta por un enfoque diferente a través de un modelo de los que Hidalgo (2005) denomina "ingenieriles" o "bottom-up", es decir, prescindiendo de tratar de explicar o repartir (con un enfoque "top-down") los costes globales existentes, para construir el coste como agregación de los costes de cada uno de los elementos. Para ello es preciso establecer las relaciones funcionales entre las variables de entrada (la velocidad de diseño, en este caso) y el coste de construcción para cada uno de los subsistemas o elementos que conforman la línea ferroviaria.

Se desarrolla un modelo en el que se mantienen iguales todas las variables que no sean la velocidad ni el relieve del terreno (así, se consideran parámetros fijos la calidad del terreno, los costes unitarios, las normativas técnicas, etc.) Se trata de analizar el coste de construcción de una línea de vía doble electrificada de alta velocidad y se aplica a un caso ejemplo para el que se adoptan los valores normativos y de costes unitarios de España en 2015.

El análisis se referirá a una línea diseñada exclusivamente para tráfico de viajeros, y siempre a una línea de nueva construcción. Debe advertirse que en el caso de modernización de líneas existentes y su adaptación a velocidades superiores, por ejemplo a 200 kilómetros por hora, los costes son mucho mayores que los necesarios para construir una línea nueva de las mismas características, e incluso con frecuencia son superiores a los necesarios para construir una línea nueva a velocidades superiores, aunque todo ello lógicamente depende del alcance de la obra tipo de terreno, etc.

En este análisis es relevante el estudio (Oskar Fröidh, 2012), en el que se realiza un detallado análisis sobre los costes y su sensibilidad con la velocidad máxima, empleando para ello datos reales, extraídos mayoritariamente de proyectos suecos y noruegos. Otro estudio que aporta una gran base de datos es el de (Baumgartner, J.P. 2001). En él se calculan los diferentes costes de construcción para dos velocidades máximas de diseño diferentes (100 km/h y 300 km/h), distinguiendo entre los costes de ingeniería civil y plataforma, costes de señalización y comunicaciones, costes de electrificación, etc.

Existe también una gran cantidad de estudios relativos a otras disciplinas que tienen por objeto determinar el trazado óptimo teniendo en cuenta sus costes (Lee & Cheng, 2001) y otros que tienen en cuenta la optimización del trazado dependiendo de limitaciones propias del sistema ferroviario (radios de curva, pendientes...). Como estudios importantes en este campo se pueden citar (Malo Gaona, 1992) y (Linkerhägner, 1985).

Hay relevante literatura que trata sobre métodos constructivos, definición de las diferentes fases de construcción de una línea e importantes análisis de los distintos costes que supone realizar una línea ferroviaria. Se puede destacar (López Pita, 2008).

En relación a la normativa puede citarse como relevantes las I.G.P⁶ o NRV⁷ que especifican los requisitos y/o valores máximos y mínimos para la mayor parte de los parámetros relacionados con la explotación ferroviaria y que indirectamente están relacionados con los costes de construcción.

Definición de los tipos de relieve

Una clasificación relevante de los diferentes tipos de relieve del terreno y su relación con el coste es la realizada por el Adif en el documento de "Principales ratios de costes por kilómetro" de 2008, que clasifica el tipo de orografía, no por el gradiente que tiene o que tendrá la infraestructura ferroviaria, sino por la cantidad y tipo de obra ejecutada. Por ejemplo, se afirma que: "(...) un terreno llano es aquel que sólo necesita obras de tierra, pasos de drenaje y, en alguna ocasión, algún paso superior". En el caso del terreno semillano se especifica que: "(...) obras de tierra, pasos de drenaje, pasos superiores y algunos viaductos de pequeño porte" y por último, para el caso de terreno accidentado se expone que: "(...) obras de tierra, pasos superiores, viaductos y túneles (doble vía y/o bitubo con galerías de conexión)". Esta definición establece matices insuficientes dentro de los llamados "terrenos accidentados"

Teniendo en cuenta que no existe una definición clara del tipo de relieve de una infraestructura ferroviaria y que las clasificaciones existentes pueden causar confusión, se procede a elaborar una clasificación que englobe todos los posibles casos.

El proceso seguido consiste, en una primera fase, en el análisis de la orografía y relieve del terreno con la que se puede encontrar una infraestructura. Para ello, se utiliza un mapa de elevaciones del terreno que contiene la altitud de diferentes países de la Unión Europea y del Norte de África. En este proceso se emplean modelos digitales del terreno⁸ (MDT's) procedentes del STRM (Shuttle Radar

⁶ I.G.P. Instrucciones y Recomendaciones para Redacción de Proyectos de Plataforma

⁷ N.R.V Normativa Renfe Vía

⁸ Los MDT, son un conjunto de datos numéricos almacenados digitalmente que describen la distribución espacial de una característica del territorio. Se construyen a partir de los MDE. A diferencia de los MDT, los MDE, son una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno.

Ignacio González Franco

Efecto de la velocidad de diseño en el coste de construcción de la infraestructura

Topography Misión) en los que se obtiene una importante base de datos topográficos.

Estos mapas de elevaciones del terreno permiten distinguir, a simple vista, las diferentes zonas según "complejidad". Pero a la hora de asignar una clasificación determinada para cada tipo de terreno que muestre, a su vez, una relación con la infraestructura ferroviaria, los mapas de pendientes medias son más útiles que los mapas de altitudes, básicamente por dos razones: (i) definen la orografía del terreno al igual que hace la altitud, y (ii) presentan una estrecha relación con las pendientes del ferrocarril.

Se puede afirmar que la pendiente media del terreno es un parámetro ampliamente utilizado para la clasificación de las infraestructuras ferroviarias. De hecho, estudios como (Atkins, 2002) definen y clasifican la orografía en función de las pendientes medias del terreno. La clasificación realizada en este estudio es la siguiente:

- Terreno suave: gradiente < 3%.
- Terreno montañoso: 3% < gradiente < 10%.
- Terreno muy montañoso: gradiente > 10%.

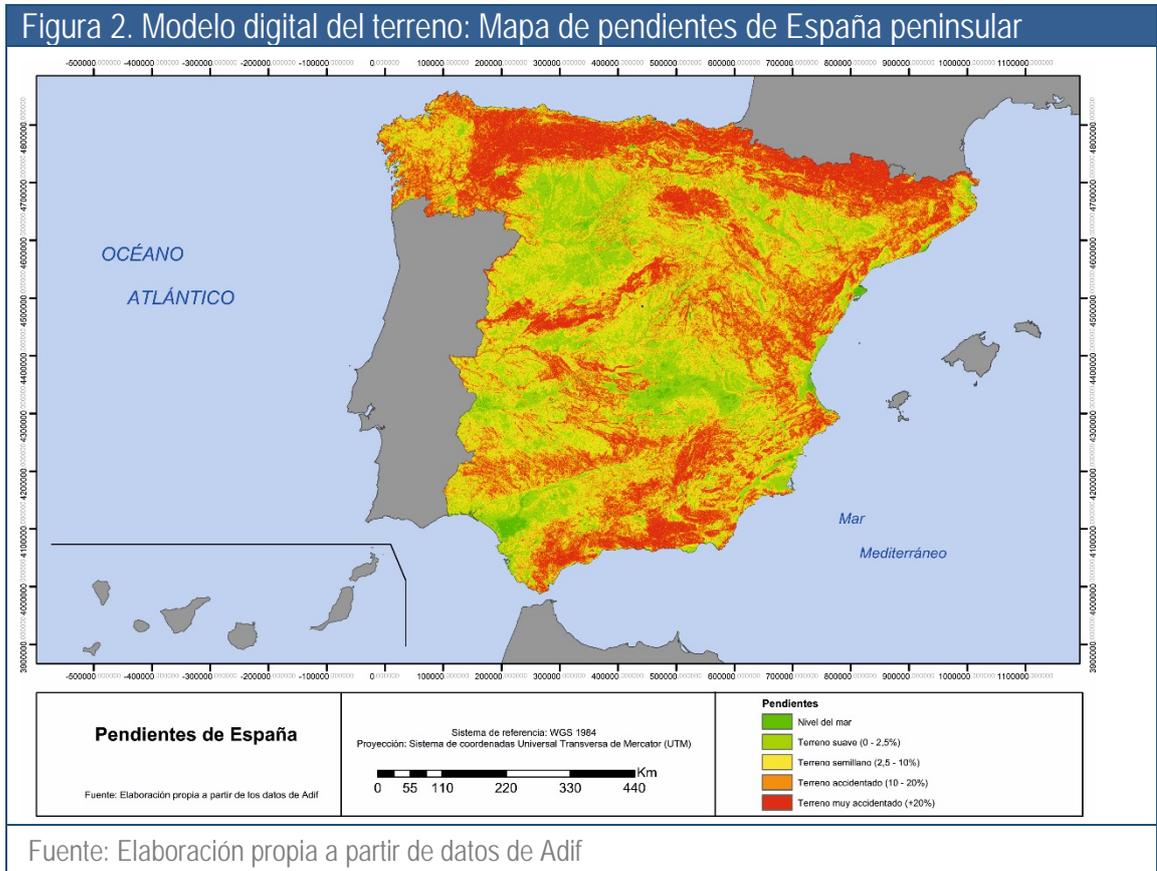
Esta clasificación puede ser suficiente para países con territorios generalmente suaves, pero no puede serlo en otros países, como España, con relieves muy accidentados

Observando esta clasificación y atendiendo a los modelos digitales del terreno creados por el IGN (Instituto Geográfico Nacional), la clasificación del tipo de terreno según pendientes medias puede adquirir un mayor grado de definición para contemplar todas clases de países y quedaría de la siguiente forma:

- Terreno suave: 0% < gradiente < 2,5%.
- Terreno semillano: 2,5% < gradiente < 10%
- Terreno montañoso: 10% < gradiente < 20%
- Terreno muy accidentado: gradiente > 20%

Centrándose en España, uno de los escenarios más desfavorables en cuanto a relieve del terreno, como se refleja en la figura 2, es posible crear un mapa de pendientes que refleje, según la clasificación anterior, las diferencias orográficas y poder así determinar aquellos terrenos que son más complejos para la construcción de una infraestructura.

A partir del MDT de altitudes se ha realizado el mapa de pendientes de la España peninsular utilizando un Sistema de Información Geográfica (GIS):



En el mapa resultante se pueden diferenciar zonas diferentes en función de la pendiente media de terreno en la que, a grandes rasgos, se pueden distinguir tres conjuntos morfo-estructurales: (i) una gran meseta central rodeada y circundada por cadenas montañosas; (ii) una serie de cordilleras próximas a la costa; y (iii) dos grandes depresiones: una localizada en el extremo suroeste (depresión del Guadalquivir) y otra en el cuadrante noreste (depresión del Ebro).

La construcción de una misma infraestructura ferroviaria en distintos relieves, no presentará las mismas características de trazado, ni por supuesto la misma cantidad de obra construida y, por lo tanto, no supondrá el mismo coste si se trata de un relieve u otro. Se entiende que construir una infraestructura que atraviese el sistema pirenaico, que presenta pendientes medias superiores al 20%, precisará gran cantidad de túneles y de viaductos, lo que supondrá un coste muy elevado. En contraposición se encuentra la meseta septentrional, con grandes llanuras con bajos gradientes (entre 0 y 2,5%).

Ignacio González Franco

Efecto de la velocidad de diseño en el coste de construcción de la infraestructura

Relaciones funcionales entre velocidad y costes

El objetivo principal de este artículo, consiste en analizar y cuantificar económicamente la influencia que tiene la velocidad máxima de diseño sobre los costes de construcción de una línea de alta velocidad en cada tipo de relieve del terreno. Para ello es necesario analizar, como paso intermedio, el efecto de la velocidad en una serie de características y equipamientos de la infraestructura. Se va a realizar el análisis para cada tipo de relieve del terreno, y por ello una línea completa debería descomponerse en en tantos tramos como secciones con diferente relieve tenga, y el coste total sería la suma de los costes de cada uno de estos tramos.

La influencia de la velocidad en características tales como el radio de curva, la pendiente, etc. es clara y ampliamente estudiada. Sin embargo, la relación con otras características de la infraestructura (como el porcentaje de túnel, viaducto; movimiento de tierras; características de la electrificación y señalización, etc.) no es tan evidente y tampoco lo es su relación con el coste de inversión. Se han identificado hasta ocho relaciones funcionales entre velocidad, características de la infraestructura y costes.

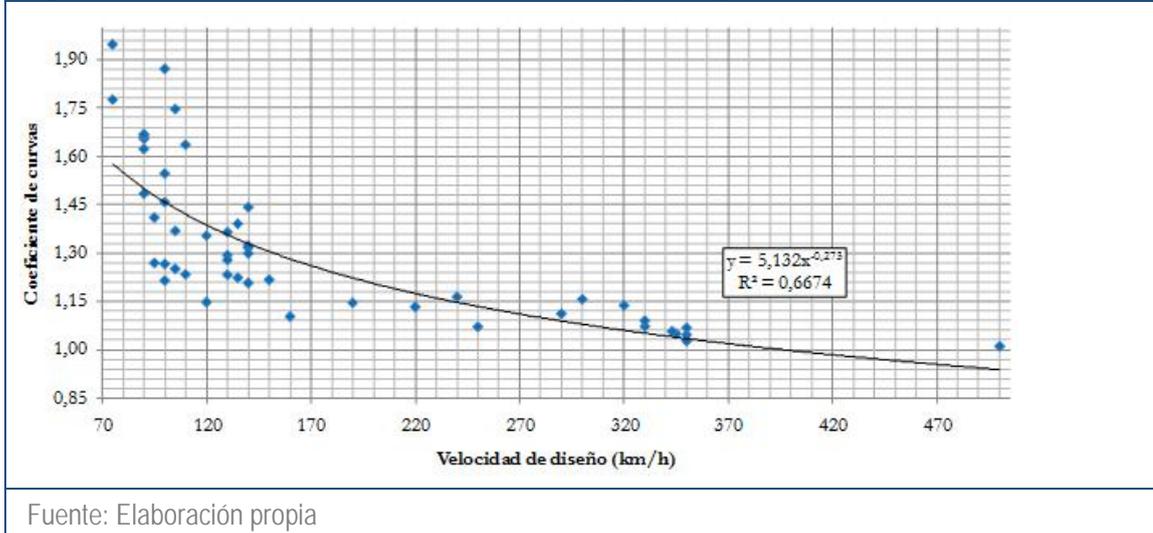
[En lo sucesivo, y si no se indica lo contrario, para simplificar la exposición, cuando se indique “velocidad” debe entenderse como “velocidad máxima de diseño de la línea”.]

Efecto de la velocidad en la longitud de la línea

La “sinuosidad” de las líneas ferroviarias viene condicionada por el radio de curva mínimo que tiene su trazado en planta. Puede afirmarse que a mayor velocidad, se exigen mayores radios de curva y por ello, menos sinuosa será la línea (más recta). Ello trae como consecuencia una menor distancia entre origen y destino, lo que afectará al coste final de la infraestructura, pues se construirán menos kilómetros de línea (infraestructura, vía e instalaciones). Esta reducción de la distancia ferroviaria al aumentar la velocidad se presenta especialmente en los dos tipos extremos de orografía: en terrenos llanos y en terrenos muy montañosos.

En España, según García Álvarez y Fernández González (2008), las líneas de alta velocidad tienen, en promedio, un recorrido inferior en un 13% al de la línea convencional entre los mismos puntos. En algunos recorridos, como el de Madrid a Valladolid la reducción de la distancia llega al 28%, y entre Madrid y Málaga es del 19%.

Figura 3. Relación entre la velocidad de diseño y la longitud de la línea



Efecto de la velocidad en el tipo de obra construida y en el coste

La velocidad juega un papel fundamental en los costes de construcción de tramos montañosos o muy montañosos ya que influye fuertemente en la cantidad y en la longitud de túneles y viaductos, cuya construcción es mucho más costosa que la construcción sobre terreno natural o con movimientos de tierras. Cuanto menor es la velocidad que se exige, hay mayor posibilidad de “escapar” de zonas con relieves muy accidentados, ya que puede emplear radios más pequeños, ofreciendo así la posibilidad de construir una línea que transcurra, por ejemplo, por el cauce de los ríos o que rodee las montañas, evitando cruzar aquéllos con viaductos o atravesar éstas con túneles.

Esto se traduce en un menor coste de construcción, y aparece como especialmente relevante en tramos de orografía compleja, mientras que carece de relevancia en tramos llanos. El porcentaje de línea que transcorre en viaducto o en túnel es un buen indicador de este efecto.

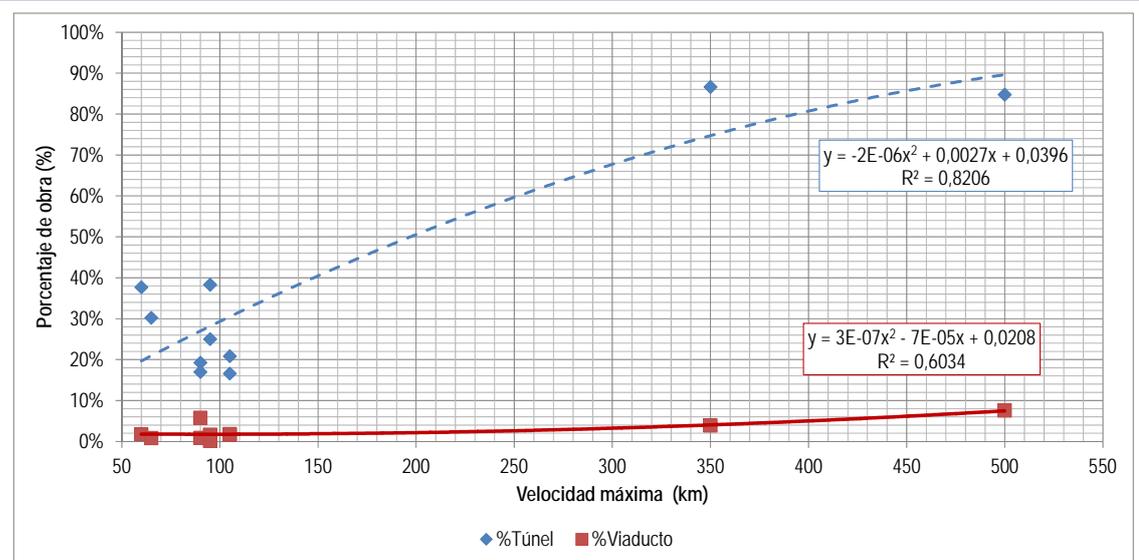
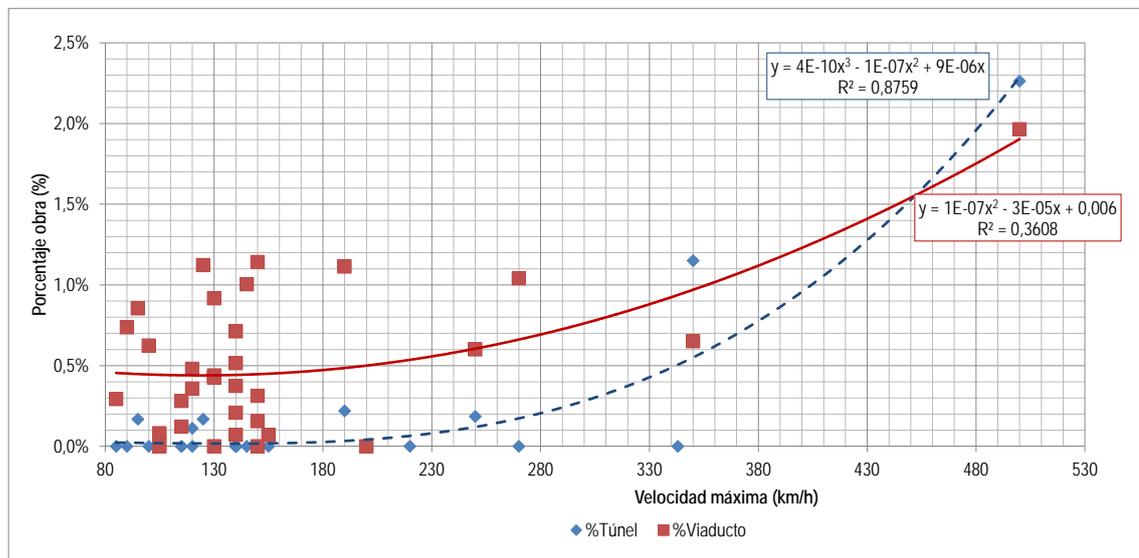
Un análisis empírico del porcentaje de línea que discurre en viaducto y en túnel en función de la velocidad de diseño de la línea y del tipo de relieve del terreno se muestra en las figuras 4a y 4b para los dos casos más extremos: relieve suave y relieve muy montañoso. Aunque los datos disponibles no son suficientes como para obtener un alto grado de ajuste, sí que puede observar que mayores velocidades requieren más porcentaje de viaducto y túnel en todos los tipos de terreno, pero se observan algunas diferencias:

- Mientras que en terrenos llanos los viaductos suelen ser más numerosos y largos que los túneles, en los muy montañosos es al revés.
- Por otra parte en los relieves suaves el porcentaje de unos y otros solo crece de forma relevante a velocidades altas, en el caso de las líneas en relieves muy montañosos, a partir de una cierta velocidad ya el aumento de la velocidad no incide en un crecimiento importante del porcentaje de túnel o de viaducto.

Ignacio González Franco

Efecto de la velocidad de diseño en el coste de construcción de la infraestructura

Figuras 4a y 4b. Porcentaje de túnel y viaducto en función de la velocidad máxima según el tipo de relieve



Nota: De arriba a abajo: 4a, relieve llano; 4b relieve muy montañoso. Fuente: Elaboración propia.

Efecto de la velocidad y la rampa máxima

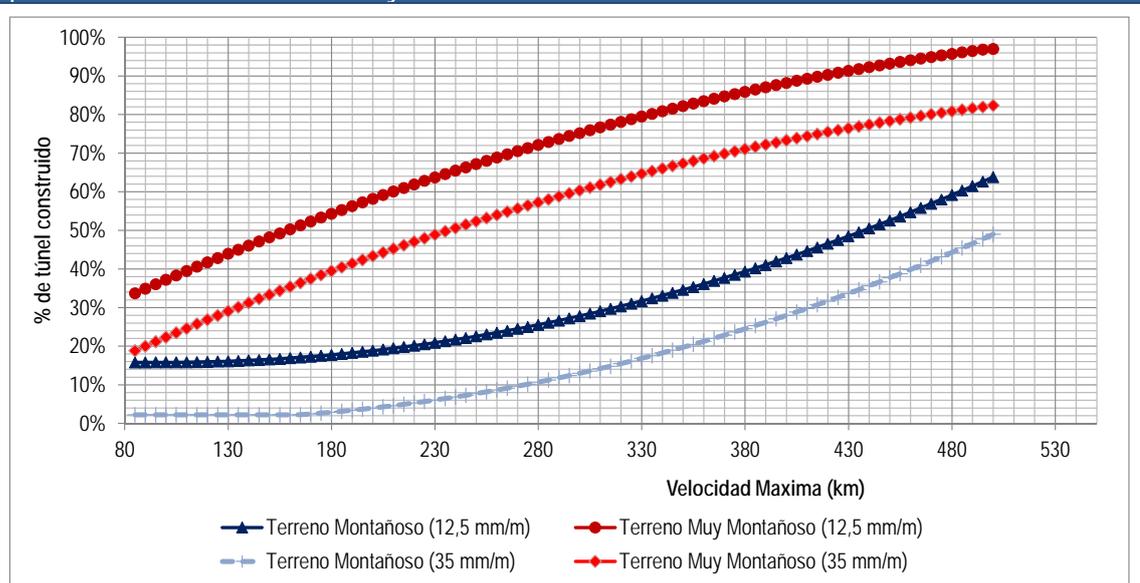
Las rampas con una fuerte inclinación permiten un mayor ajuste del trazado al relieve y, por lo tanto, se reduce la necesidad de túneles y viaductos, lo que en definitiva supone una clara reducción de los costes de inversión. La línea de París a Lyon constituye el ejemplo más claro: diseñada con rampas de 35 milésimas, no existe ningún túnel en toda la longitud de la línea (más de 400 kilómetros).

Las rampas pueden tener mayor inclinación (hasta 30 e incluso 40 milésimas) cuando solo se admite tráfico de viajeros (es el caso que se está analizando), mientras que en líneas para tráfico mixto de viajeros y mercancías, la inclinación de las rampas suele estar limitada hasta unas 15 a 20 milésimas.

También son posibles rampas con mayor inclinación cuando los trenes tienen mayor potencia. Un aumento de la velocidad de diseño requiere a los trenes más potencia, pero a la vez les permite negociar rampas con mayor inclinación y con ello, reducir el número de túneles y viaductos necesarios y su longitud.

En la figura 5 se aprecia la diferencia en el porcentaje de línea en túnel en terreno montañoso y muy montañoso según la rampa máxima admitida. Puede observarse cómo pasar de 12,5 a 35 milésimas reduce en unos 15 puntos porcentuales el porcentaje de longitud de línea en túnel y alrededor de un 30 por ciento la longitud en túnel.

Figura 5. Porcentaje de túnel para diferentes velocidades máximas, considerando pendientes máximas de 35‰ y 12,5‰.



Fuente: Elaboración propia

Ignacio González Franco

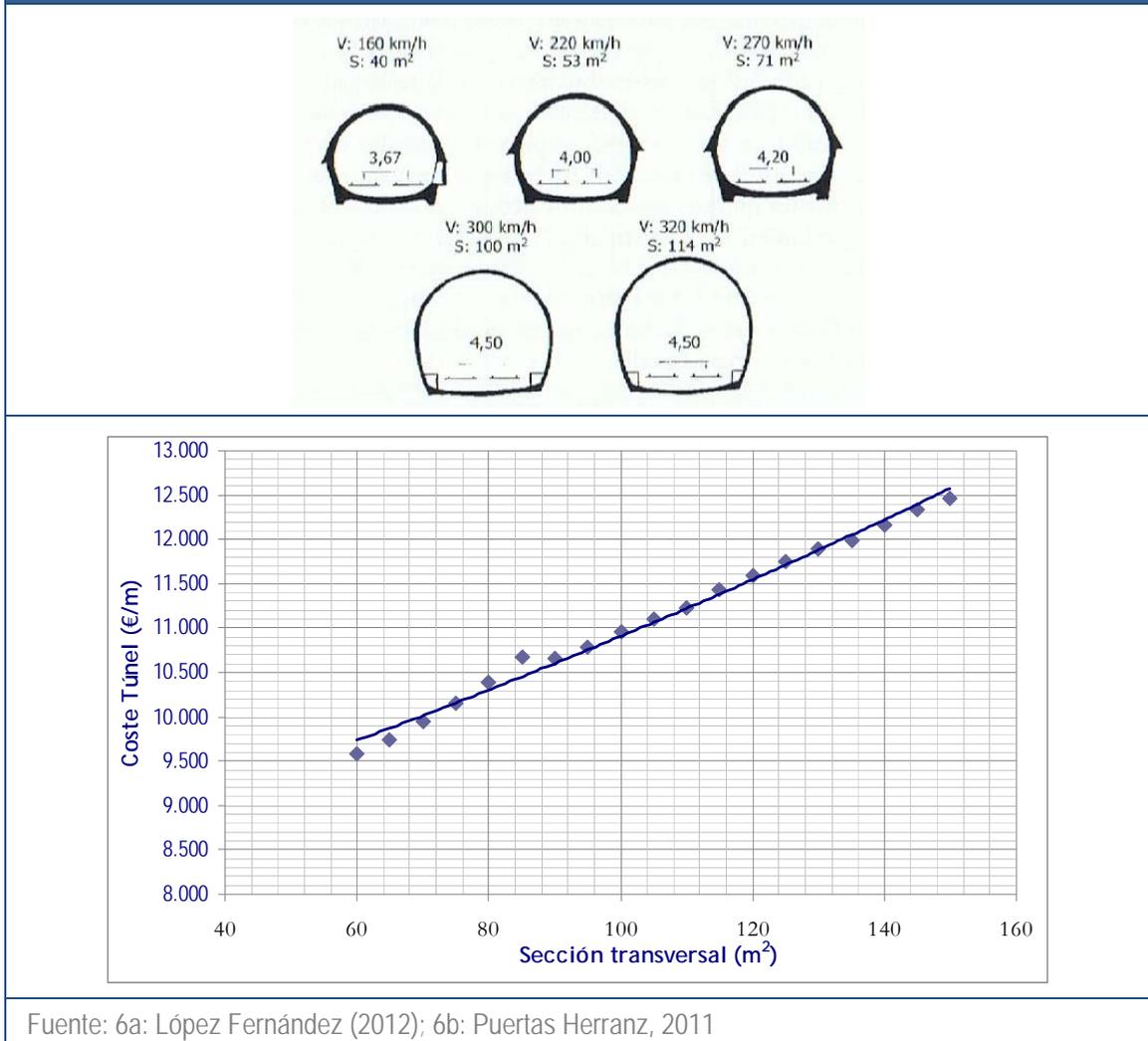
Efecto de la velocidad de diseño en el coste de construcción de la infraestructura

Efecto de la velocidad y la sección de túnel

La sección libre de los túneles debe ser mayor cuanto mayor sea la velocidad a la que va a circular el tren por el túnel para no rebasar los límites admisibles de la presión aerodinámica. Esto es así, al menos para túneles de menos de 700 metros de longitud, mientras que para longitudes mayores se mantiene la misma sección necesaria.

Mayores secciones de túnel significan mayor coste para el mismo tipo (monotubo o bitubo), por lo que un aumento de la velocidad conlleva desde este punto de vista un aumento del coste de inversión. Dependiendo de la proporción de línea que discurra en túnel (y de la propia de longitud de los túneles), el aumento del coste al crecer la velocidad será mayor o menor.

Figuras 6a y 6b. Sección del túnel en función de la velocidad máxima y costes de construcción del túnel de menos de 700 metros en función de la sección.



Fuente: 6a: López Fernández (2012); 6b: Puertas Herranz, 2011

Efecto de la velocidad en la anchura de la plataforma

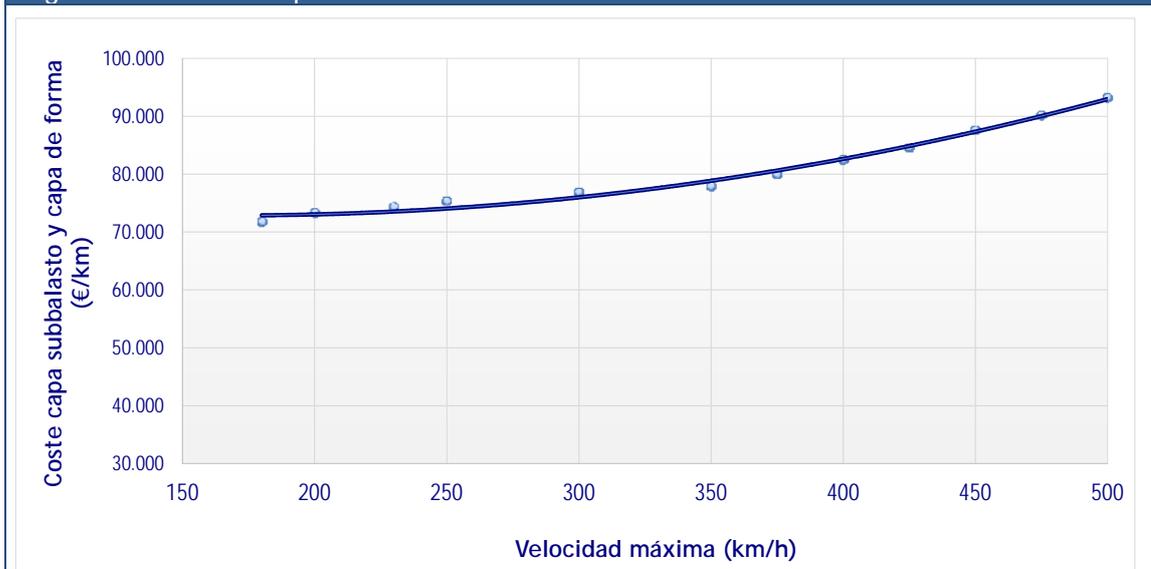
Cuanto mayor sea la velocidad a la que circulan los trenes en una línea con vía doble, se requiere mayor distancia entre los ejes de las vías, al efecto de mantener dentro de valores admisibles los esfuerzos aerodinámicos que se transmiten los trenes en el cruce.

Ello incrementa -para un mismo gálibo estático de los vehículos- la anchura de la plataforma y con ella se incrementa el coste de inversión en la subestructura.

Para la cuantificación de este efecto, se ha dado por aceptable la presión que ejercen entre si dos trenes que circulan a 350 km/h y se cruzan en una línea de vía doble con entreeje de 4,70 metros. Partiendo de este valor aceptado, se ha calculado el entreeje necesario para mantener la misma presión a cada una de las velocidades. A partir de esa presión, se calcula el ancho de plataforma que permite estimar la inversión en su construcción.

En la figura 7 se aprecia el crecimiento del coste de la plataforma al aumentar la velocidad.

Figura 7. Coste de la plataforma en función de la velocidad



Fuente: Elaboración propia

Ignacio González Franco

Efecto de la velocidad de diseño en el coste de construcción de la infraestructura

Efecto de la velocidad en el coste de la vía

Cuanto mayor es velocidad, se requiere un mayor espesor de la capa de balasto bajo traviesa, lo que supone un incremento en el coste de este elemento.

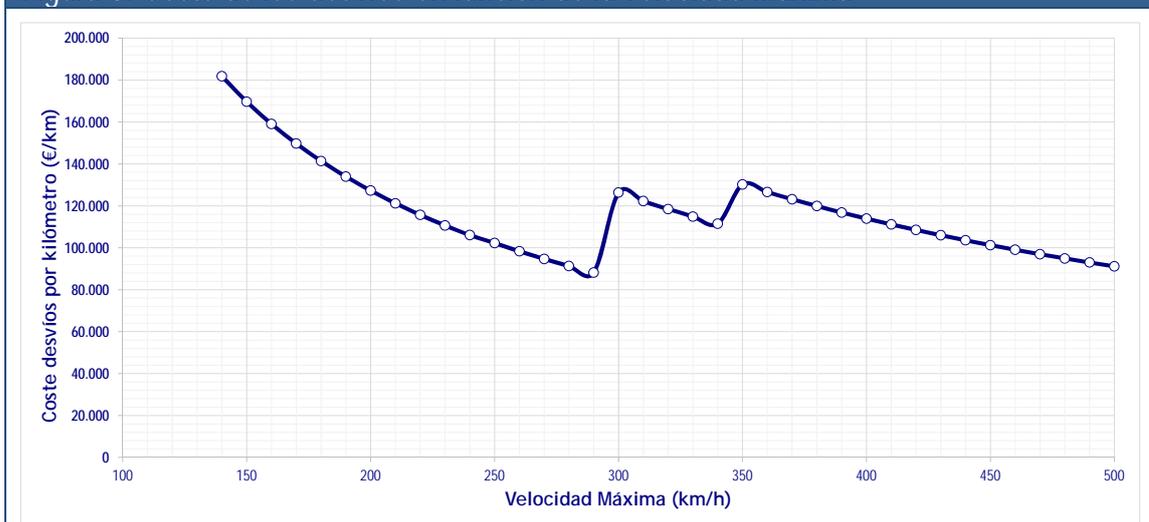
Además, la velocidad también afecta a la tipología de desvíos empleada: mayor velocidad implica la instalación de desvíos de punta móvil y de mayor radio, lo que incrementa el coste sustancialmente de cada uno de ellos y el coste de su montaje. Esta variación es de carácter casi discreto, ya que es a partir de una cierta velocidad cuando se precisa un tipo diferente de desvíos, aunque velocidades mayores requieren mayor radio de paso por la vía desviada.

Sin embargo, al crecer la velocidad es necesario un menor número de desvíos para mantener la misma capacidad y nivel de respuesta ante incidencias, ya que los trenes tardan menos tiempo en recorrer los cantones de vía entre estaciones, apartaderos o puestos de banalización (que es donde se concentran los desvíos). Por ello, para una determinada capacidad, medida en número de trenes de diverso tipo por hora, se precisa la instalación de un menor número de desvíos.

El carril o las traviesas que son los otros componentes de la vía, ni los costes de montaje de vía presentan variaciones de cantidad, calidad o coste al variar la velocidad.

Para velocidades mayores de 350 km/h resulta casi imprescindible la vía en placa, que significa un mayor coste de construcción, aunque éste se compensa generalmente en el conjunto del ciclo de vida con el ahorro posterior en mantenimiento.

Figura 8. Coste de los desvíos en función de la velocidad máxima



Fuente: Elaboración propia

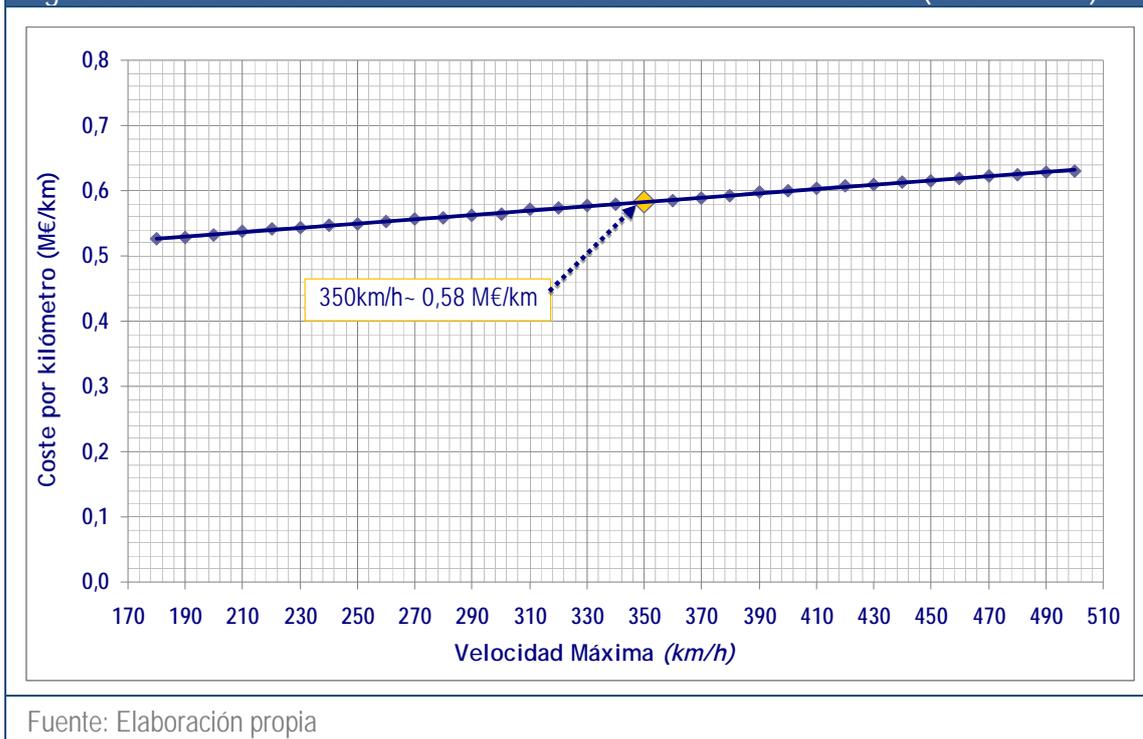
Efecto de la velocidad máxima de diseño y coste de electrificación

Una mayor velocidad máxima, a igualdad de los demás factores, supone un mayor coste del sistema de electrificación, debido a dos razones:

- Con una mayor velocidad de circulación se precisa mayor potencia de los trenes que circularán por la línea y, por tanto, la potencia de la subestación también será mayor (ya que se requiere más potencia en los transformadores).
- También al aumentar la potencia, se incrementa la intensidad de la corriente eléctrica que circula por los cables, y por ello es necesario emplear cables con mayor sección.

Tanto por el aumento de potencia de los transformadores o por el aumento de sección de los cables o por ambas causas, el coste se incrementa al crecer la velocidad, si bien como se muestra en la figura 9 el incremento no es muy elevado: pasar de 200 a 350 km/h aumenta el coste de la electrificación un 7,7%.

Figura 9. Coste de la electrificación en función de la velocidad máxima (terreno llano)



Ignacio González Franco

Efecto de la velocidad de diseño en el coste de construcción de la infraestructura

Efecto de la velocidad en los costes de señalización y comunicaciones

La influencia de la velocidad máxima en el coste de la señalización reside básicamente en el tipo de señales y el sistema de protección del tren:

- Para velocidades mayores de 140 km/h se requieren señales de tipo luminoso, bloqueo automático y algún sistema de repetición de señales y frenado automático.
- A partir de 200 km/h suelen requerirse sistemas de señalización en cabina y sistemas de protección del tren de información continua.
- A partir de 300 kilómetros por hora se requieren además sistemas de protección del tren de supervisión continua.

Todo ello supone un incremento, generalmente de tipo discreto, del coste de los sistemas de señalización y comunicaciones.

Hay sin embargo otras relaciones funcionales que producen una reducción del coste al aumentar la velocidad:

- La necesidad de un menor número de apartaderos o puestos de banalización (por las razones apuntadas al tratar de los desvíos).
- La reducción de costes al reducir la longitud de la línea (reducción que se concreta en circuitos de vía, cableado antenas, balizas y señales).

Efecto de la velocidad máxima de diseño en los costes de expropiación

La influencia de la velocidad en la partida de costes de expropiación se debe a dos causas:

- Un aumento de la velocidad reduce el número de kilómetros de la línea ferroviaria (por tener que ser ésta menos sinuosa). Por lo tanto, se reduce la superficie a expropiar
- A mayor velocidad se requiere, como se ha indicado, mayor cantidad y longitud de túneles. La cantidad de suelo expropiada en un túnel es inferior que en el caso de cielo abierto, por lo que el coste de expropiación se reducirá con el aumento de la velocidad, especialmente en terrenos montañosos y muy montañosos donde el porcentaje de línea en túnel es mayor.

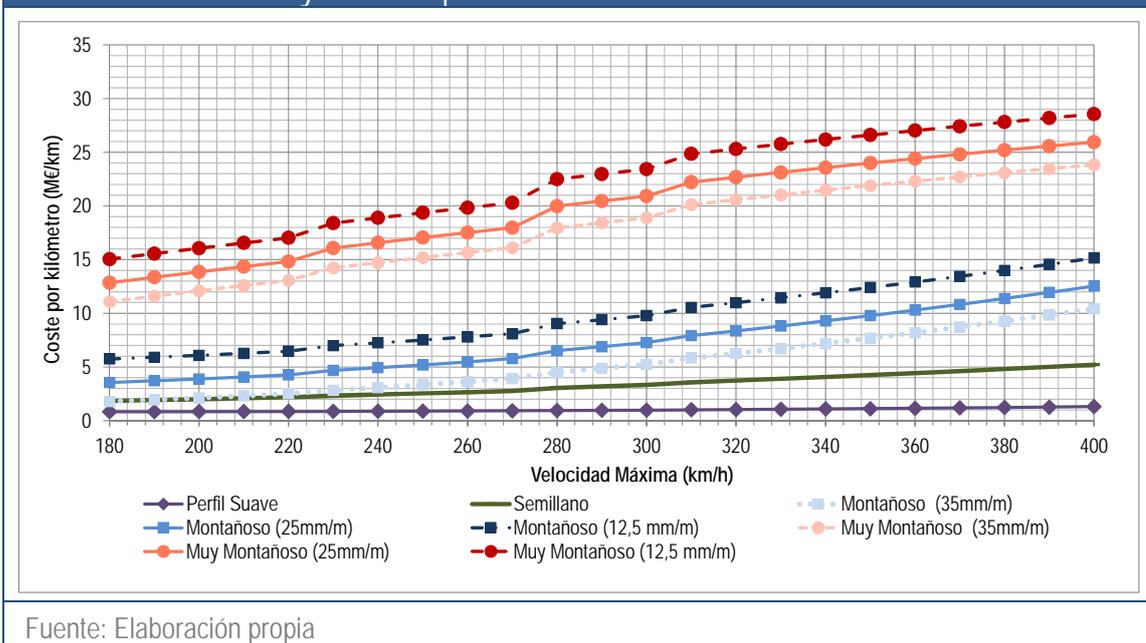
Coste conjunto en una línea

Se puede calcular el coste total de inversión en función de la velocidad, como suma del coste de inversión en la subestructura, superestructura, el coste de expropiación y el coste en estaciones.

Coste conjunto según el relieve del terreno y la rampa admisible

Se muestra gráficamente en la figura 12 los resultados de la simulación para el coste de inversión total en función de la velocidad máxima de diseño para cada tipo de relieve del terreno considerado y de la rampa máxima admisible.

Figura 10. Costes totales de inversión por kilómetro en función de la velocidad máxima, del relieve del terreno y de la rampa máxima admisible



De la observación de los resultados obtenidos se destaca:

1. A medida que se incrementa la velocidad máxima, el coste de inversión aumenta, y ello ocurre para todos los tipos de relieve de terreno. Puede afirmarse que este incremento es aproximadamente lineal en todos los casos analizados.
2. A igualdad de velocidad, los costes aumentan al aumentar la dificultad del relieve del terreno. El rango de costes por kilómetro para una misma velocidad es muy amplio. Por ejemplo, para 300 kilómetros por hora oscila entre 4 y 25 millones de euros por kilómetro.
3. Para un mismo relieve y velocidad, los costes son mayores cuando se admiten rampas con inclinación más reducida.
4. Los mayores incrementos en costes producidos por incrementos en la velocidad máxima se producen en terrenos semillanos y montañosos. Esto es normal, pues es en este tipo de terrenos donde un incremento de la velocidad implica un mayor porcentaje de túneles. En terrenos muy montañosos el porcentaje de túnel y viaducto es tan elevado que

Ignacio González Franco*Efecto de la velocidad de diseño en el coste de construcción de la infraestructura*

incrementos en la velocidad no suponen incrementos sustanciales en la longitud de línea construida en túnel y viaducto.

- Se observa también que el coste por kilómetro atribuible a la construcción de una infraestructura ferroviaria en un terreno montañoso puede llegar a ser diez veces mayor que construirla en un terreno llano. Incluso puede llegar a ser casi cinco veces mayor que el coste por kilómetro en un terreno semillano. En cuanto a la diferencia entre el coste por kilómetro entre construir una infraestructura en un terreno montañoso y hacerlo en un terreno muy montañoso de media se obtiene que es aproximadamente 2,5 veces mayor la inversión por construirla en un terreno muy montañoso.
- Para un mismo tipo de terreno y para la misma rampa admisible, las diferencias de coste no tienen grandes diferencias con la velocidad, especialmente en terrenos llanos y semillanos. Desde luego, las diferencias son mucho menores que las que se producen entre diferentes tipos de terrenos para la misma velocidad. El paso de 200 a 350 km/h supone un incremento del coste del 29% en terreno llano; del 60% en terreno semillano; del 97% en terreno montañoso y del 64% en terreno muy montañoso.

El rango de costes totales de inversión que se obtienen para cada tipo de terreno en diferentes intervalos de velocidad es el que muestra la tabla 3.

Tabla 3: Rango de costes por kilómetro para cada tipo de terreno en función de la Velocidad y para líneas de nueva construcción

	Costes por kilómetro líneas de nueva construcción (M€/km)		
	Vmax<200km/h	200km/h<Vmax<350km/h	Vmax>350
Terreno Llano	4(*)	4,2 - 5	5 - 6
Terreno Semillano	5,3(*)	5,3 - 8,5	8,5 - 16
Terreno Montañoso	5,5 - 9,5(*)	6 - 17	12 - 42
Terreno Muy Montañoso	15,5 - 20,5(*)	16 - 32	27 - 60

Nota: (*) Los costes por kilómetro mostrados se han calculado para líneas de nueva construcción, en el caso de reformas o mejoras en una línea existente serían sensiblemente mayores.

Fuente: Elaboración propia

Coste para una línea con diferentes tipos de relieve

Una infraestructura ferroviaria atraviesa normalmente diferentes tramos con relieves distintos, por lo que es difícil encontrar una determinada línea que sea, en todo su trayecto, por ejemplo, totalmente llana o totalmente montañosa.

Por lo tanto, el coste total de inversión de una infraestructura está condicionado por el porcentaje de longitud que una infraestructura atraviesa en cada uno de relieves anteriormente identificados.

El coste de inversión total se estimaría simplemente multiplicando el porcentaje de longitud de la línea de cada uno de los tipos de terreno por su coste por kilómetro.

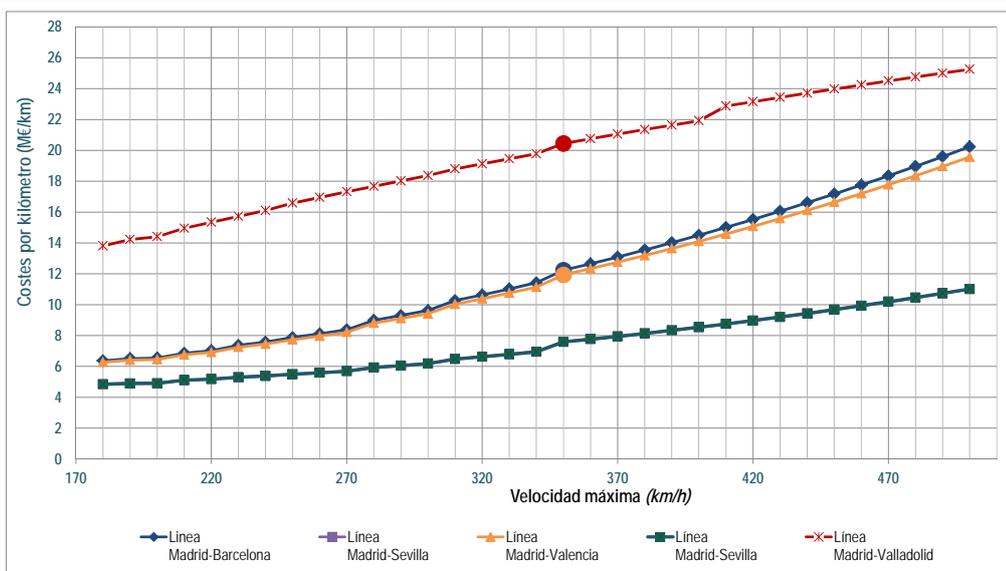
Tabla 4: Porcentaje del total de la línea según el tipo de relieve que atraviesan (llano, semillano, montañoso y muy montañoso)

	Madrid-Sevilla	Madrid-Valencia	Madrid-Valladolid	Madrid-Barcelona
Muy Montañoso	0%	0%	38%	0%
Montañoso	25,1%	58%	0%	58,1%
Semillano	5,19%	42%	0%	40,4%
Llano	69,69%	0%	62%	1,4%
<i>Longitud línea (km)</i>	<i>470,4</i>	<i>391</i>	<i>179,3</i>	<i>628</i>

Fuente: Elaboración propia

A continuación se representa gráficamente la variación del coste por kilómetro de cuatro líneas de alta velocidad (Figura 13).

Figura 11. Costes de inversión por kilómetro estimado en diferentes líneas españolas de alta velocidad en función de la velocidad



Fuente: Elaboración propia

Ignacio González Franco

Efecto de la velocidad de diseño en el coste de construcción de la infraestructura

BIBLIOGRAFÍA

- ☐ Atkins. (2002). High speed line study - milestone 8 cost model. Final report.
- ☐ Baumgartner. J.P. (2001). *Prices and costs in the railway sector*. Laboratoire d'Intermodalité des Transports Et de Planification, Lausanne.
- ☐ CENIT (2008). SP5-5.1. *Análisis de los costes de inversión asociados a cada sistema de vía*. CENIT (Centro de Innovación del Transporte).
- ☐ Fröidh, O. (2012). HSLdim: Demand, cost and benefit calculations. *KTH Architecture and the Built Environment*.
- ☐ García Álvarez, A. y Fernández González, E. (2008): *Recorridos y cociente entre trayectoria y desplazamiento en el transporte por ferrocarril*. Nota técnica 9 proyecto Enertrans, 1ª Edición, mayo de 2008, Ed.: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- ☐ González Franco (2015b) Inédito: *Metodología para la Estimación de la Combinación de Velocidades Máximas que Permiten Alcanzar el Tiempo de Viaje Comercialmente Requerido en una Infraestructura Ferroviaria*. Tesis doctoral en elaboración.
- ☐ Hidalgo. I. (2005): Introducción a los modelos de sistemas energéticos, económicos y medioambientales: descripción y aplicaciones del modelo. *Revista de economía mundial* 13, 2005, 33-75
- ☐ Lee, Y., & Cheng, J. (2001). Optimizing highway grades to minimize cost and maintain traffic speed. *Journal of Transportation Engineering*, 127(4), 303-310.
- ☐ Linkerhägner, M. (1985). Paramètres des lignes nouvelles et leur optimisation sous des aspects micro-économiques. *Les Aspects Socio-Économiques Des Trains à Grand Vitesse*, Paris. 60-81.
- ☐ López Pita, A. (2010). *Alta velocidad en el ferrocarril*. Barcelona: Edicions UPC, 2010. ISBN 978-84-9880-416-4.
- ☐ Malo Gaona, J. A. (1992). Adopción de rampas máximas en alta velocidad. Aplicación en tres alternativas de paso por el Sistema Ibérico. *O.P. Obra Pública*, (24), 18-25.
- ☐ Puertas Herranz, J. (2011). *Estimación de coste y plazo de ejecución en proyectos de túneles ejecutados mediante excavación convencional y voladura*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- ☐ Steer Davies. (2004). *High speed rail: International comparisons*. Final report. Commission for Integrated Transport.