

## **SISTEMAS DE ALERTA SÍSMICA APLICADOS AL FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD EN ESPAÑA; TRABAJOS EN CURSO**

*Dr. Miguel Herraiz Sarachaga*

*Profesor Titular*

*Director del Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I (Geofísica y Meteorología)*

*Universidad Complutense de Madrid, España.*

*mherraiz@fis.ucm.es*

*Francisco Sánchez Dulcet*

*Colaborador Honorífico*

*Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I (Geofísica y Meteorología).*

*Universidad Complutense de Madrid, España.*

*fjsanche@fis.ucm.es*

*Dr. José Luis Rodríguez Rodríguez*

*Jefe de Implantación.*

*Dirección Ejecutiva de Red de Alta Velocidad.*

*Dirección General de Desarrollo de la Infraestructura. Administrador de Infraestructuras Ferroviarias.*

*jlrodriguez@adif.es*

## **Sistemas de Alerta Sísmica aplicados al ferrocarril de Alta Velocidad en España; trabajos en curso**

### **Resumen**

El ferrocarril de Alta Velocidad ha experimentado un gran desarrollo en España en los últimos años. Algunos trazados, tanto previstos como de líneas actualmente en servicio, transcurren sobre las áreas consideradas de mayor peligro sísmico por la Norma Sismorresistente Española. Esta situación se agrava por las estrictas exigencias geométricas requeridas para este tipo de trenes. Por lo tanto, es necesario un Sistema de Alerta Sísmica para garantizar la seguridad de los viajeros. Junto con el efecto de sitio, la función de transferencia suelo-carril es el elemento más importante a considerar en estos sistemas, pues es el carril quien transfiere la acción sísmica a las ruedas del tren. Otro aspecto importante a tener en cuenta es la presencia del balasto. A pesar de los muchos intentos para modelar su comportamiento dinámico, su naturaleza como medio discreto obliga a que dicha función de transferencia tenga que ser, hoy por hoy, deducida experimentalmente. La metodología aquí descrita incluye el procedimiento para obtener datos de velocidad y aceleración en la vía, y la descripción de los eventos sísmicos que pueden producir valores significativos de los parámetros de disparo del sistema.

### **Palabras clave**

Alerta Sísmica Temprana, Simulación de movimientos fuertes, Tren de Alta Velocidad, Efecto de Sitio, Balasto.

## **Earthquake Warning Systems for high speed railways in Spain**

### **Abstract**

High-speed railways in Spain have been extensively developed in the last few years. Some of the alignments, in active and planned lines, cross through areas considered the most hazardous Spanish seismic zones by the current Spanish Building Code. This problem gets worse due to the stringent geometric parameters required for this type of railway. An Earthquake Early Warning is therefore needed to guarantee passengers safety. Together with site effects, the ground-rail transference function is the most important element to consider in this type of system because the rails transfer the seismic action to the train's wheels. Another important point to be taken into account is the presence of ballast. Although there have been many attempts at modelling the dynamic performance of ballast, its discrete nature demands that its transference function should be deduced experimentally. The methodology described here includes the procedure for obtaining track velocity and acceleration data, and the description of events which can produce significant values for the triggering parameters.

### **Keywords**

Earthquake Early Warning, Strong Motion Simulation, High Speed Trains, Site Effect, Ballast.

## **Introducción**

La Península Ibérica en su conjunto puede ser vista como una zona de actividad sísmica moderada con algunas áreas (parte de Galicia, Pirineo Oriental, Sureste, Golfo de Cádiz...) donde la actividad de baja magnitud se ve acompañada esporádicamente por terremotos importantes que pueden producir víctimas y grandes daños. El terremoto más reciente de estas características tuvo lugar en Arenas del Rey, Granada, en 1884, pero en los últimos años ha habido también sismos de magnitud superior a 5, como los de Mula y Bulla (Murcia) ocurridos respectivamente en 1999 y 2002, que causaron notables daños. A esta actividad generada por las fallas activas situadas en la península hay añadir la influencia de zonas sismogénicas próximas

como la Falla Azores-Gibraltar que es responsable de los terremotos más importantes que afectan a buena parte del territorio español peninsular. La sección de esta falla próxima al Cabo de San Vicente originó en 1755 el sismo conocido como “terremoto de Lisboa” que causó en nuestro país cerca de mil víctimas (casi todas debidas al tsunami que asoló las costas de Huelva y Cádiz) y numerosos destrozos. El peligro sísmico es por tanto en España una realidad que debe ser tenida cuidadosamente en cuenta en las obras civiles de particular importancia, entre las que se encuentran las infraestructuras ferroviarias.

Con el objetivo final de mejorar la seguridad del servicio ferroviario, el Grupo de Atenuación e Ingeniería Sísmica de la Universidad Complutense de Madrid, UCM, inició en 1997 la colaboración con RENFE (Red Nacional de Ferrocarriles Españoles) para estudiar los problemas sísmicos que podían afectar al AVE (Alta Velocidad Española) en la línea Madrid-Sevilla y el efecto vibratorio que estos trenes ejercen sobre el suelo. Dicho trabajo puso de manifiesto que en algunos puntos de la vía la sismicidad natural podía alcanzar niveles críticos para la seguridad de los trenes. Esto era debido a la amplificación del movimiento originada por el tipo de suelo, la topografía del emplazamiento, la geología más superficial, etc. Es decir, por el conjunto de fenómenos que en sismología se conocen como “efecto de sitio”. Asimismo, el estudio incluyó mediciones realizadas en la vía con este objetivo y permitió comprobar el papel fundamental del balasto en la transmisión de las vibraciones.

Como resultado de la experiencia adquirida por el grupo en este tema, en la segunda mitad del año 2006 ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias) solicitó al equipo la realización de un estudio para instalar un Sistema de Alerta Sísmica en la línea Córdoba-Málaga. En este recorrido el peligro sísmico alcanza un nivel de notable importancia, problema que también se presenta en otras líneas de Alta Velocidad en ejecución o diseño. Esta situación puede comprobarse observando la Figura 1 en la que la Red Ferroviaria de Altas Prestaciones del Plan Estratégico de Infraestructuras y Transportes se ha superpuesto sobre el mapa de peligro sísmico de la Norma de Construcción Sismorresistente, NCSE-02, actualmente en vigor.

El objetivo de esta investigación, llevada a cabo entre febrero de 2007 y octubre de 2008, se desarrolló en el marco de un Convenio de colaboración UCM-ADIF, con la participación adicional de la empresa Aplicaciones Tecnológicas ATEC S.L., y consistía en la determinación del terremoto que debe disparar dicho sistema (“sismo de disparo”). La empresa Aplicaciones Tecnológicas ATEC S.L. también colaboró en esta fase, suministrando instrumentación adicional, y como responsable del algoritmo de discriminación y el hardware de la estación prototipo (Herraiz et al., 2008; Sánchez-Dulcet et al., 2008).

Como consecuencia de los resultados alcanzados en esta etapa (Herraiz et al., 2009), y de la experiencia adquirida en este tipo de estudios por parte de las diferentes entidades participantes está previsto continuar las investigaciones con vistas al establecimiento de una metodología de empleo general para la definición del sismo de disparo de un Sistema de Alarma Sísmica para líneas de Alta Velocidad, y su aplicación práctica en un prototipo a instalar en un punto de la línea Córdoba-Málaga, todavía por determinar. Los trabajos correspondientes a esta nueva etapa comenzarán en el primer semestre de 2010 y se extenderán durante un plazo de dos años, incluyendo el seguimiento y verificación del prototipo.

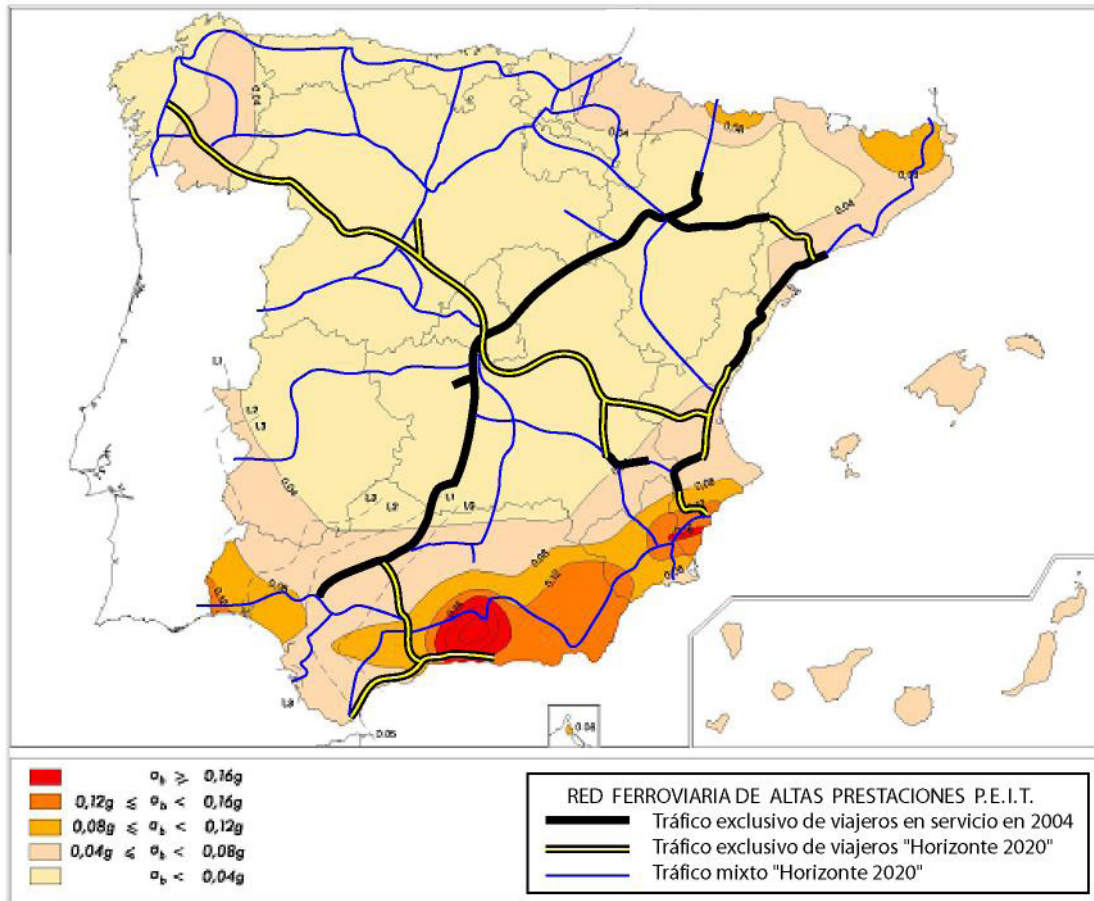


Figura 1. Red de Altas Prestaciones superpuesta sobre el mapa de peligro sísmico de la NCSE-02

## Sistemas de Alerta Sísmica: Concepto

Por Sistema de Alerta Sísmica se entiende un dispositivo que actúa en tres etapas: (1) registro de las ondas sísmicas incidentes, (2) análisis de las señales así obtenidas, y (3) puesta en marcha de un protocolo de actuación si dicho análisis indica que estas ondas corresponden a un terremoto capaz de dañar las zonas urbanas o instalaciones sensibles a proteger. Dada la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, todo este proceso debe poder realizarse en muy pocos segundos.

El concepto de Sistema de Alerta Sísmica fue publicado por primera vez en el *San Francisco Daily Evening Bulletin* de noviembre de 1868 por J. D. Cooper y se basaba en aprovechar la mayor velocidad de las ondas electromagnéticas respecto de las sísmicas, para hacer llegar una alarma transmitida por telégrafo.

*"... A very simple mechanical contrivance can be arranged at various points from 10 to 100 miles from San Francisco, by which a wave of the earth high enough to do damage, will start an electric current over the wires now radiating from this city, and almost instantaneously ring an alarm bell, which should be hung in a high tower near the center of the city ..."* (Cooper, 1868)

Desafortunadamente, el nivel tecnológico del momento impidió la realización práctica de la idea de Cooper, y el 18 de abril de 1906 tuvo lugar el terremoto de San Francisco, que provocó, directa o indirectamente, cerca de 800 muertos. Sus efectos, junto con los del posterior incendio de tres días de duración, destruyeron más

de 28.000 edificios y dejaron sin vivienda a cerca de 225.000 personas. La población de la ciudad era, en aquellas fechas, de 400.000 habitantes (NOAA, 1972).

Transcurrieron más de 100 años, hasta que, en 1972, el profesor M. Hakuo, del *Earthquake Research Institute* de la Universidad de Tokio, propuso la misma idea para la ciudad de Tokio, despertando el interés entre las autoridades de los *Japanese National Railways*, que promovieron la investigación y desarrollo del proyecto. En 1982 ya se había completado el *Coast-line Detection System* para el tren de Alta Velocidad Tokio-Osaka “*Shinkansen*”. El Sistema de Alerta Sísmica para la ciudad de México, muy similar, fue instalado en 1991 (Nakamura, 1996).

En su artículo, de menos de 400 palabras, Cooper ya ponía entonces de manifiesto tres de los principales aspectos a tener en cuenta en el diseño de un Sistema de Alerta Sísmica:

- Estimación de la magnitud del terremoto (“...*a wave of the earth high enough to do damage...*”).
- Discriminación de falsas alarmas (“...*nothing but the distant undulation of the surface of the earth should ring it...*”).
- Automatismo del sistema (“...*This machinery would be self-acting, and not dependent on the telegraph operators, who might not always retain presence of mind enough to telegraph at the moment, or might sound the alarm too often...*”).

A continuación, tras una breve revisión del estado actual del desarrollo e implantación de los Sistemas de Alerta Sísmica en todo el mundo se comenta el tratamiento dado a cada uno de estos aspectos en el sistema aquí considerado.

## Estado actual de los Sistemas de Alerta Sísmica

Actualmente existen dos enfoques distintos para el cálculo de los parámetros con los que trabajan los Sistemas de Alerta Sísmica (Allen et al., 2009):

- Sistemas de tipo *front-detection* o de alarma regional y
- Sistemas de tipo *on-site* o de alarma en un lugar específico.

Los sistemas del tipo “*front detection*”, como los instalados en el ferrocarril japonés, en Taiwán y en la ciudad de México, analizan el movimiento del terreno registrado por instrumentos instalados en las áreas fuente de terremotos, empleando para ello los métodos tradicionales de sismología con el fin de estimar la magnitud del terremoto y el movimiento esperado en distintos lugares, emitiendo mensajes de alerta hacia áreas urbanas más alejadas.

Los sistemas del tipo “*on-site*”, de más reciente desarrollo, analizan la parte inicial de las ondas P (“primarias”) registradas por instrumentos instalados en las proximidades del elemento sensible a proteger, emitiendo mensajes de alerta antes de que tenga lugar el inminente movimiento fuerte del terreno provocado por la llegada de las ondas S (“secundarias”). El denominado *Urgent Earthquake Detection and Alarm System*, *UrEDAS*, en servicio desde 1992 en la red ferroviaria de Alta Velocidad del Japón emplea este método.

Cada uno de estos tipos presenta sus propias ventajas e inconvenientes. Así, los sistemas de tipo “*front-detection*” son más exactos en sus estimaciones, pero requieren más tiempo para la adquisición de datos. Además, por su propia naturaleza, no pueden ser usados para alertar a los lugares más cercanos al epicentro. Por el contrario, los sistemas tipo “*on-site*”, si bien determinan los parámetros del terremoto con menor precisión, necesitan para ello un tiempo mucho menor, de sólo unos pocos segundos. Esto resulta de vital importancia cuando se trata de viviendas e instalaciones situadas en las proximidades del epicentro.



La rápida recepción de las alertas permite la activación automática de mecanismos de seguridad en los sistemas de transporte público, redes de distribución de gas y electricidad, hospitales, etc. tendentes a minimizar los efectos del terremoto.

En todo caso, la adopción de uno u otro tipo de sistemas viene fuertemente condicionada por la distribución geográfica de las fuentes sísmicas. Si éstas se encuentran agrupadas en una o varias zonas sismogénicas situadas a una cierta distancia de la zona a proteger, de manera que el tiempo empleado por las ondas sísmicas en su recorrido hasta dicha zona es superior al requerido para su análisis clásico (Figura 2, parte superior), resultaría más apropiada la instalación de un sistema de tipo "front-detection". Por el contrario, si la zona a proteger se encuentra muy próxima a las fuentes sísmicas, o incluso sobre ellas, (Figura 2, parte inferior), resultaría más apropiado un sistema de tipo "on-site".

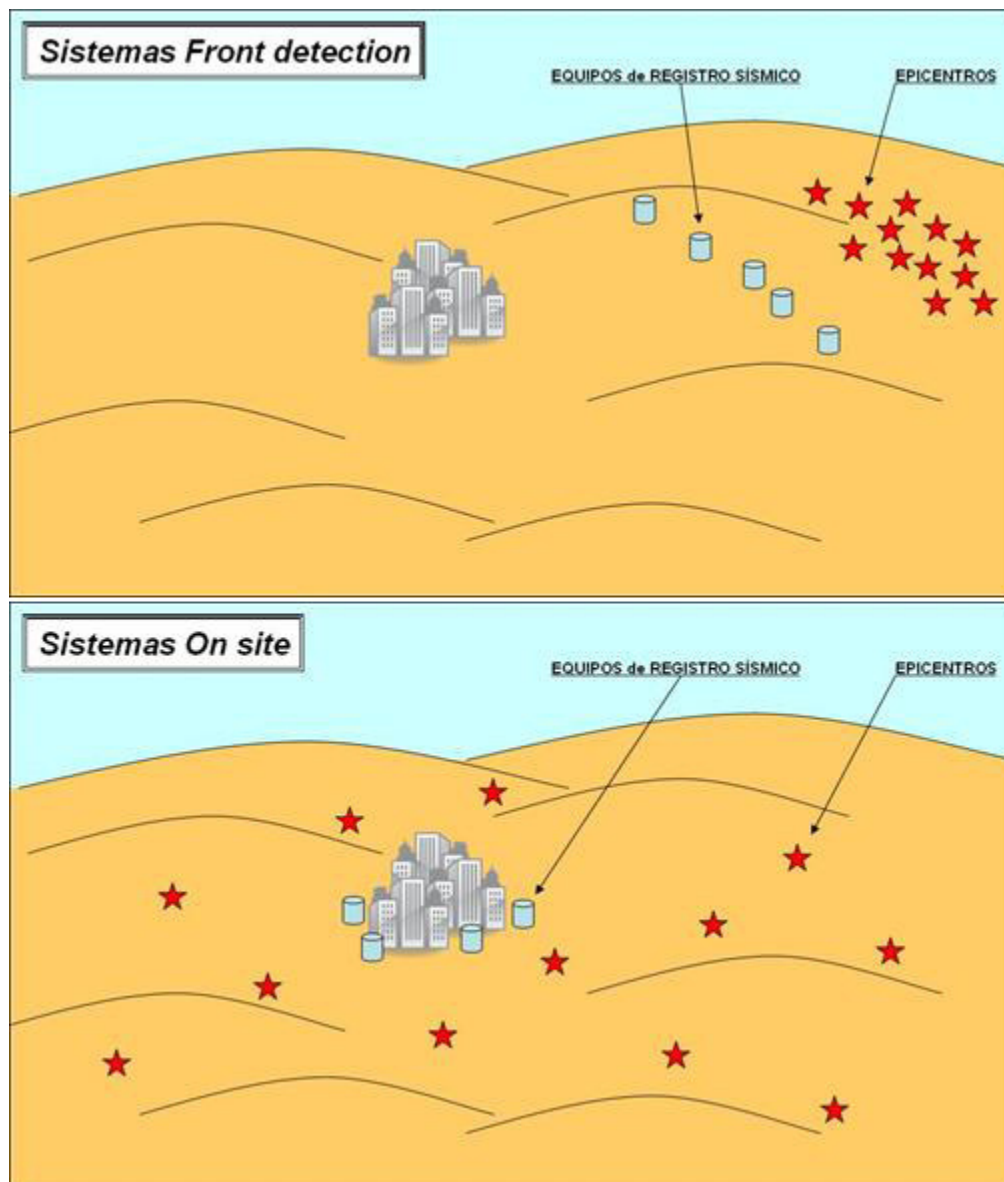
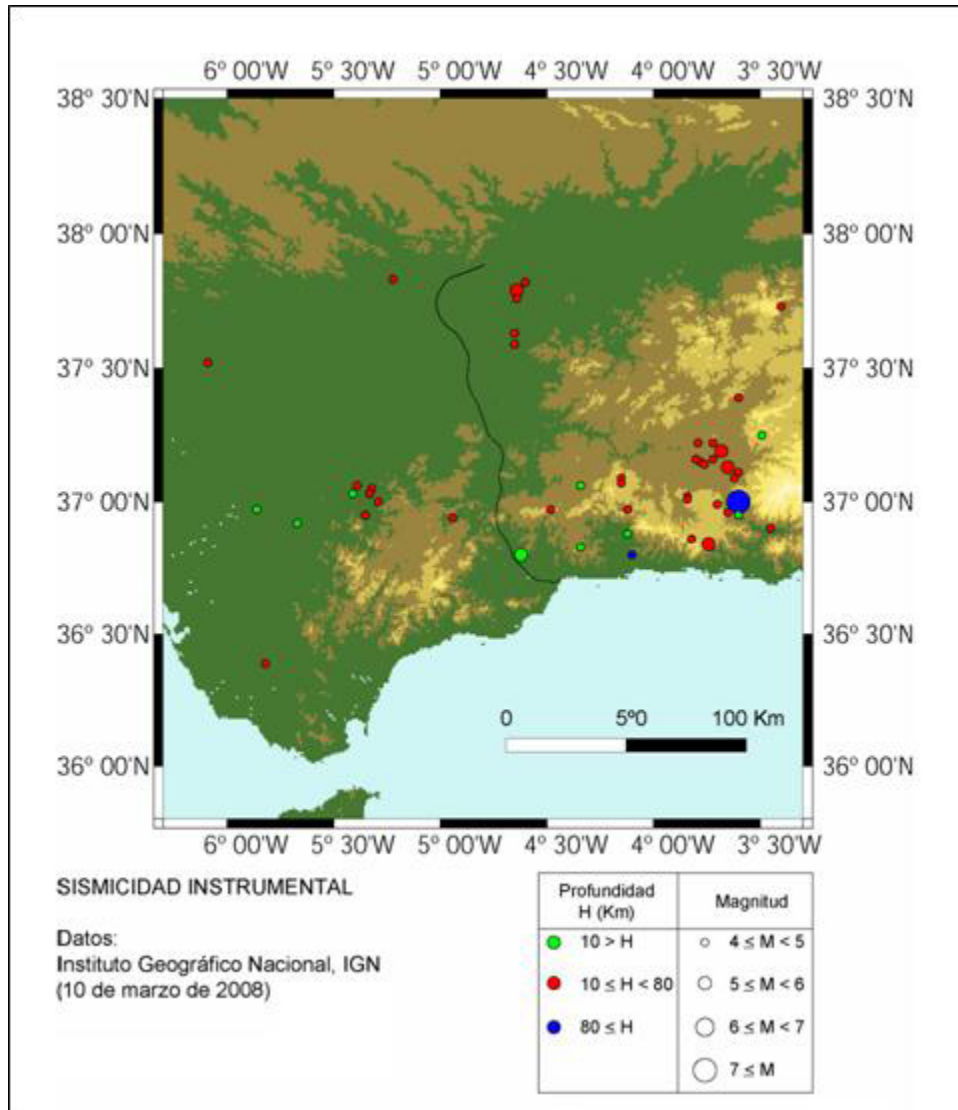


Figura 2. Representación esquemática del tipo de Sistema de Alerta Sísmica más adecuado, en función de la distribución geográfica de las fuentes sísmicas

### Sistemas de Alerta Sísmica para la línea Córdoba-Málaga 4

La distribución geográfica de la sismicidad en el entorno del tramo de línea objeto de estudio (Figura 3), hizo aconsejable la aplicación de un sistema de tipo “on-site”. En concreto, se seleccionó la metodología propuesta por Wu y Kanamori (2005a; 2005b y 2008), Wu y Zhao (2006) y Wu et al. (2007).



**Figura 3. Sismicidad instrumental ( $M \geq 4$ ) en el entorno de la línea objeto de estudio**

El método estima el tamaño de un terremoto a través del cálculo del denominado  $\tau_c$ , que representa el periodo promedio durante la fase inicial del movimiento incidente, y se obtiene a partir de la componente vertical de los registros de velocidad,  $v(t)$ , y desplazamiento,  $u(t)$ , de acuerdo con la expresión [1]:

$$r = \frac{\int_0^{t_0} v^2(t) dt}{\int_0^{t_0} u^2(t) dt} \Rightarrow t_c = \frac{2p}{\sqrt{r}} \quad [1]$$

Los límites de integración corresponden a la primera llegada de la onda P ( $t=0$ ) y los siguientes tres segundos ( $t_0=3$  s).

Para su obtención en este trabajo se han empleado registros sísmicos de velocidad y de aceleración procedentes de la base de datos del Instituto Geográfico Nacional, IGN, y registros de velocidad procedentes del Instituto Andaluz de Geofísica, IAG, y de la red conjunta integrada por la Universidad Complutense de Madrid, el Real Instituto y Observatorio de la Armada, ROA, y el grupo *GeoForschungsZentrum*, GFZ, de Posdam.

Inicialmente fueron seleccionados, atendiendo a la distancia existente entre el epicentro y el tramo de vía objeto de estudio, un total de 629 registros de aceleración y 246 de velocidad, correspondientes a 208 terremotos de magnitud superior a 3.0 ocurridos desde 1993. Más tarde, el número de acelerogramas se redujo a 111, como resultado de un análisis de la relación señal/ruido.

Sin embargo, a pesar de la evidencia histórica de terremotos destructivos en la zona (Mezcua, 1982; Martínez Solares y Mezcua, 2002; Goded et al., 2008), la falta de registros instrumentales de eventos con magnitud mayor que 5.0 en las proximidades del trazado hace necesario el empleo de acelerogramas sintéticos, con el fin de extender el rango de magnitud del presente estudio hasta incluir terremotos capaces de causar daños en las infraestructuras de la vía.

Actualmente se han realizado una primera serie preliminar de simulaciones siguiendo la metodología propuesta por Sabetta y Pugliese (1996), que están siendo contrastadas con las obtenidas con el software SMSIM v2.0 (Boore, 2002), sin descartar la futura aplicación de otras metodologías.

Con esta primera serie se ha pretendido simular el terremoto de Montilla de 5 de Julio de 1930, cuyo epicentro se estima situado a una distancia aproximada de la vía de 20 km. Aunque no existe ningún registro instrumental de este evento, sí están disponibles los acelerogramas correspondientes al terremoto de magnitud 4.3 que tuvo lugar el 16 de abril de 1996, con epicentro muy cercano. En consecuencia, se han simulado eventos de magnitud 6.0 y 6.5 con distancias epicentrales de 20; 30 y 50 km. Estos valores de magnitud concuerdan con las posibles magnitudes realistas en la zona, y que son capaces de provocar daños en el ferrocarril.

La Figura 4 muestra, como ejemplo, la componente horizontal de los acelerogramas sintéticos calculados para una magnitud 6.0 a una distancia epicentral de 50 km, sobre sedimentos superficiales (espesor menor de 20 metros), sobre sedimentos profundos (espesor mayor de 20 metros), y sobre roca. Hay que destacar el hecho de que los valores de aceleración máxima PGA obtenidos (0.07g, 0.04g y 0.04g respectivamente) son el límite inferior de los esperados en más de la mitad del tramo considerado.



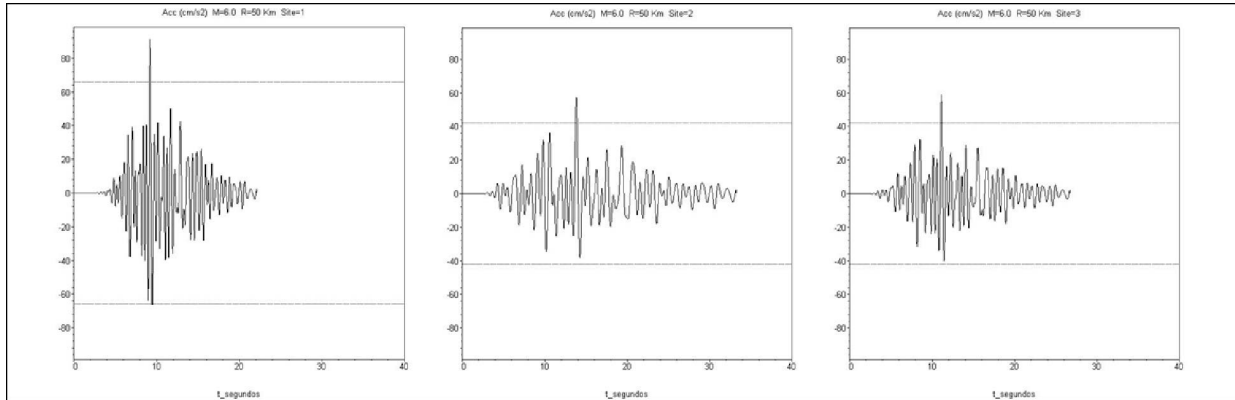


Figura 4. Componente horizontal de los acelerogramas sintéticos calculado para una magnitud 6.0 a una distancia epicentral de 50 km, de izquierda a derecha: sobre sedimentos superficiales (espesor menor de 20 metros), sobre sedimentos profundos (espesor mayor de 20 metros), y sobre roca

### Registro del movimiento inducido en la vía 5

Un segundo grupo de datos utilizado en este trabajo comprende el registro del movimiento provocado por el paso de más de 400 trenes en diferentes elementos de la vía (Figura 5) y, simultáneamente, en el terreno próximo, adquiridos durante la ejecución de de tres campañas realizadas en la vía y sus proximidades durante los meses de enero, junio y julio de 2008.

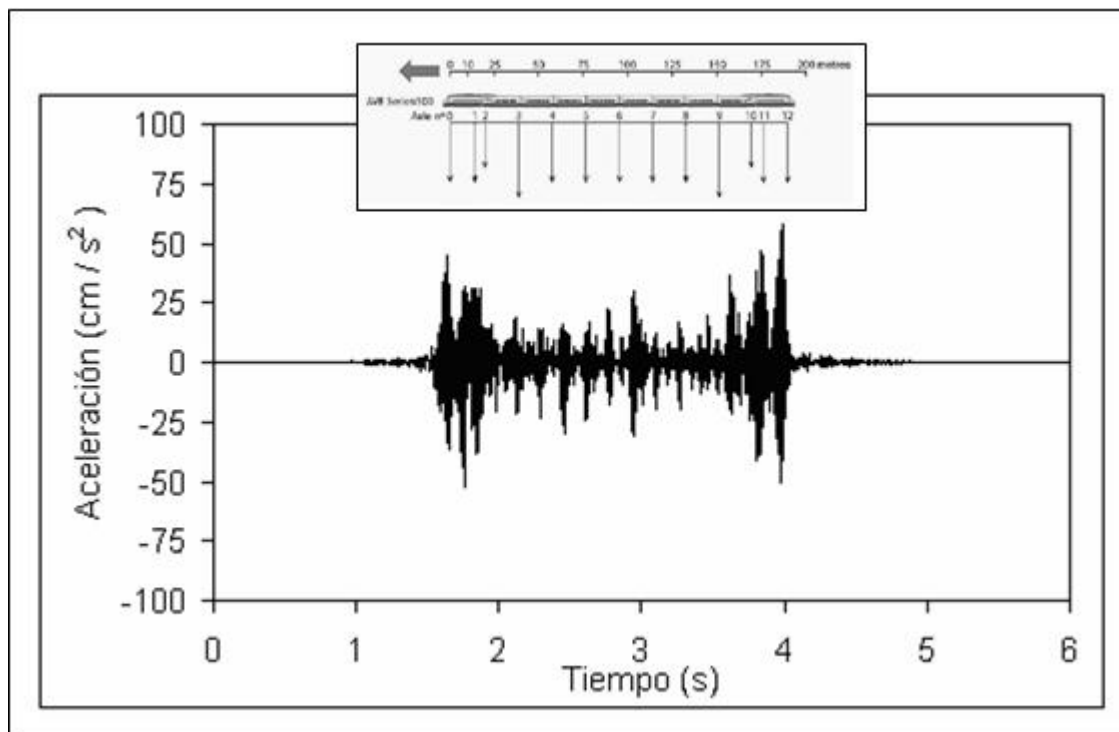


Figura 5. Emplazamiento de los acelerómetros instalados en la traviesa y en el balasto durante la primera campaña de toma de datos, en enero de 2008

Su análisis permitirá, por una parte, obtener la ya citada función de transferencia y, por otra, contribuir al establecimiento de criterios de discriminación de falsas alarmas provocadas por la circulación habitual. Para la distribución geográfica de los puntos de medida se tuvieron en cuenta tanto criterios sismológicos (peligro sísmico, condiciones geotécnicas y relieve topográfico), como criterios de gestión del tráfico ferroviario, atendiendo, básicamente, a la velocidad comercial de circulación en los diferentes sectores de la línea.

Además de los datos obtenidos en las citadas campañas, también se obtuvieron registros del mismo tipo (en el balasto y en el terreno próximo a la vía) en una instalación semipermanente que funcionó en registro continuo entre febrero y junio de 2008. Finalmente, entre el 7 de junio y el 14 de julio de 2008 se llevaron a cabo los ensayos preliminares de un primer prototipo.

Si bien existe abundante bibliografía sobre el tratamiento y el procesado de acelerogramas (ver, por ejemplo, Boore y Bommer, 2005 o Akkar y Boore, 2009), las características propias de las vibraciones inducidas por el paso de los trenes, derivadas de su mecanismo de generación (Figura 6), obligan al empleo de una metodología específica. Dicha metodología está siendo desarrollada actualmente, junto con la técnica a emplear para la obtención de la ya citada función de transferencia suelo-carril. En este sentido, reviste una especial importancia el establecimiento del rango de frecuencias para el que puedan considerarse válidos los resultados preliminares obtenidos (Mikami *et al.*, 2008)



**Figura 6. Componente transversal a la vía de la aceleración registrada en el balasto, provocada por el paso de un tren AVE Serie 100. Obsérvese la exacta correspondencia entre los máximos relativos y la distribución de cargas.**

## Conclusiones

A pesar de las dificultades derivadas de las características de la moderada sismicidad del entorno de la zona de interés, la expresión [2] que relaciona el valor del periodo característico  $\tau_c$  con la magnitud obtenida en este trabajo es muy similar a las establecidas en los trabajos citados más arriba para regiones de alta sismicidad como Taiwán, California o Japón, si bien presenta un coeficiente de correlación menor, como consecuencia de los bajos valores de magnitud utilizados en su cálculo.

$$\log t_c = 0.209 \cdot M - 1.219 \quad [2]$$

Entre otros, éste es uno de los motivos por los que, para futuras etapas de esta investigación se ha considerado como parámetro de disparo del sistema el empleo combinado de otros descriptores del movimiento del terreno, como el cálculo progresivo, en tiempo real, de la Intensidad de Arias (Arias, 1970) o de la Velocidad Absoluta Acumulativa, CAV, (EPRI, 1991), junto con la obtención del ya citado periodo característico  $\tau_c$ .

Por otra parte, para complementar la información geotécnica facilitada por ADIF, está previsto llevar a cabo un estudio detallado de las propiedades del subsuelo en los distintos emplazamientos previstos para la posible instalación del prototipo, mediante la aplicación de la técnica de refracción con microtemores, REMI, descrita por Louie (2001), y conseguir así una mejor estimación del efecto de sitio.

## Bibliografía

- Akkar, S., Boore, D.M. "On Baseline Corrections and Uncertainty in Response Spectra for Baseline Variations Commonly Encountered in Digital Accelerograph Records". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 99, No. 3 (2009): pp. 1671-1690
- Allen, R.M., Gasparini, P., Kamigaichi, O., Böse, M. "The Status of Earthquake Early Warning around the World: An Introductory Overview". *Seismological Research Letters*, Vol. 80, No. 5 (2009): pp. 682-693
- Arias, A. (1970). "A measure of earthquake intensity", in *Seismic Design for Nuclear Power Plants*. Ed. R.J. Hansen. Cambridge, MA, MIT Press, pp 438-469
- Boore D.M. *SMSIM – Fortran Programs for Simulating Ground Motions from Earthquakes: Version 2.0*. A revision of Open File Report 96-80-A. U.S. Geological Survey, 2002
- Boore D.M., Bommer J.J. "Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 25 (2005): pp. 93-115
- Cooper J.D. "Earthquake Indicator". *San Francisco Daily Evening Bulletin*, Nov. 3,(1868)
- EPRI, Electrical Power Research Institute. *Standardization of the cumulative absolute velocity*. Technical Report TR-100082 (Tier 1). EPRI, Palo Alto, CA, 1991.
- Goded T., Buforn E., Muñoz D. "The 1494 and 1680 Málaga (Southern Spain) Earthquakes". *Seismological Research Letters*, Vol. 75, No. 5 (2008): pp. 707-715
- Herraiz M., Sánchez-Dulcet F., García-Herráiz A., Mejuto J. "Investigaciones Sísmicas en torno al Tren de Alta Velocidad" in 6ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Tomar, Portugal, 2008, pp. 389-390.
- Herraiz M., Sánchez-Dulcet F., García-Herráiz A., Mejuto J., Córdoba, D., Rodríguez, J.L., Lambás, F., De Torre, J.R. "Seismic studies for high-speed railways in moderate seismicity areas in Spain" in 8th International Workshop on Seismic Microzoning Risk Reduction, Almería, España, 2009, CD
- Louie, J.N. "Master, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor Arrays". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 91, No. 2 (2001): pp. 347-364

Martínez Solares, J.M. y J. Mezcuca. *Catálogo sísmico de la Península Ibérica (880 a.C.-1900)*. Madrid: Instituto Geográfico Nacional, Monografía nº 18, 2002

Mezcuca, J. *Catálogo general de isosistas de la Península Ibérica*. Madrid, Instituto Geográfico Nacional, Publicación nº 200, 1982

Mikami, A., Stewart J.P., Kamiyama, M. "Effects of time series analysis protocols on transfer functions calculated from earthquake accelerograms". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 28 (2008): pp. 695-706

Nakamura, Y. "Real-Time Information Systems for Seismic Hazards Mitigation UrEDAS, HERAS, and PIC". Quarterly Report of R of Railway Technical Research Institute, Vol. 37, No. 3, (1996): pp. 112-127

NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. *A study of earthquake losses in the San Francisco Bay Area - Data and Analysis*, Report for the Office of Emergency Preparedness: U.S. Department of Commerce, 1972

Sabetta, P., Pugliese, A. "Estimation of Response Spectra and Simulation of Non-stationary Earthquake Ground Motion". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, No. 3 (1996): pp. 337-352

Sánchez-Dulcet F.J., De Torre J.R., Lambás F., Herraiz M. "Instrumentación Sísmica para el Sistema de Alerta Temprana en la Línea de Tren de Alta Velocidad Córdoba-Málaga" in 6ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Tomar, Portugal, 2008, pp. 467-468.

Wu, Y.M., Kanamori, H. "Experiment on an On-site Early Warning System Method for the Taiwan Early Warning System". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 3 (2005): pp. 347-353

Wu, Y.M., Kanamori, H. "Rapid Assessment of Damage Potential of Earthquakes in Taiwan from the Beginning of P waves". *Short Note. Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 3 (2005): pp. 1181-1185

Wu, Y.M., Kanamori, H. "Exploring the Feasibility of On-site Earthquake Early Warning Using Close in Records of the Noto Hanto Earthquake". *Earth, Planets and Space*, Vol. 60 (2008): pp.155-160

Wu, Y.M., Zhao, L. "Magnitude Estimation Using the First Three Seconds P-Wave Amplitude in Earthquake Early". *Geophysical Research Letters*, Vol. 33 (2006): pp. 4

Wu Y.M., Kanamori H., Allen R.M., Hauksson, E. (2007). "Determination of Earthquake Early Warning Parameters,  $\tau_c$  and  $P_d$ , for Southern California". *Geophysical Journal International*, Vol. 170, No. 2 (2007): pp. 711-717.

