

La tecnología GNSS en el sistema de señalización ERTMS

GNSS Technology in the ERTMS Signalling System

Susana Herranz de Andrés^{1*}, Ricardo Campo Cascallana², Daniel Molina Marinas³, José Bueno Pérez⁴

Resumen

La evolución del sistema ERTMS está asociada a la introducción de nuevas tecnologías que permitan la mejora del sistema, supongan beneficios para el sector, y contribuyan a una disminución de su coste, manteniendo la estabilidad de sus especificaciones técnicas para garantizar la compatibilidad hacia atrás. El uso de los sistemas de navegación por satélite (GNSS-Global Navigation Satellite System), y en concreto del sistema europeo Galileo (GNSS Europeo) en el sistema de señalización ERTMS permitirá reducir el equipamiento en vía para localizar el tren (circuitos de vía, contadores de ejes, eurobalizas), impulsando la implantación de soluciones ERTMS de bajo coste para modernizar la señalización en líneas regionales o de bajo tráfico. Aparece el concepto de baliza virtual, que es una localización en la vía georreferenciada con una identificación y un telegrama de información ERTMS asociado que no requiere de instalación física en vía. El tren llevará a bordo la lista de balizas virtuales con sus coordenadas, y la geolocalización del tren por satélite permite conocer el paso por dichas balizas virtuales como si estas estuvieran físicamente instaladas sobre la traviesa. Distintos proyectos de investigación europeos han abordado y siguen trabajando en este tema, entre ellos los proyectos ERSAT-GGC y GATE4Rail, en los que participa el Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria del CEDEX.

Palabras clave: Sistema Europeo de Señalización Ferroviaria (ERTMS), Sistema de Navegación por Satélite (GNSS), señalización ferroviaria, Galileo, baliza virtual.

Abstract

The evolution of ERTMS is intertwined with the use of new technologies that allow the enhancement of the system, bringing benefits for the railway sector, reducing the deploying and maintenance costs, while maintaining the stability of the technical specifications, to ensure backwards compatibility. The use of Global Navigation Satellite Systems (GNSS), and specifically of Galileo (European GNSS) in the ERTMS system, will entail the reduction of trackside equipment currently needed for train location, by promoting the deployment of lower cost ERTMS solutions for upgrading regional or low traffic lines. The new concept of Virtual Balise, which is a georeferenced location in the track with an identifier and its associated telegram, doesn't involve a physical placement on the track. The principle of operation is based on storing the list and coordinates of virtual balises, and on using the boarded satellites geolocation system to locate the train through these virtual balises, as if they were physically installed on the track. Several past and ongoing European projects have been carried out in this field, including ERSAT-GCC and GATE4Rail, both of them with the participation of CEDEX Railway Interoperability Laboratory.

Keywords: European Rail Traffic Management System (ERTMS), Global Navigation Satellite System (GNSS), railway signalling, Galileo, virtual balise.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema ERTMS se concibió como un sistema de señalización estándar que se adoptase en toda Europa para sustituir a los sistemas nacionales existentes y que fuera interoperable, evitando fronteras tecnológicas entre los distintos sistemas de señalización de cada país. Dadas sus altas prestaciones, su implantación se ha iniciado en proyectos ferroviarios “demandantes”, como líneas de alta velocidad o de muy alta densidad de

tráfico. Las ingenierías vinculadas a estos proyectos han creado la imagen de que es un sistema con un coste muy elevado, por lo que su implantación en otros puntos de la red ferroviaria, como líneas regionales o de bajo tráfico, en los que las grandes inversiones no son tan rentables, no se ha producido. Para que la implantación del ERTMS sea asequible, el coste debe disminuir sin comprometer la seguridad ni la interoperabilidad.

Por otro lado, a día de hoy, el uso de los sistemas de navegación por satélite está generalizado en muchos ámbitos del transporte, sin embargo su uso en el entorno ferroviario se limita a aplicaciones no relacionadas con la seguridad (*non-safety*), como por ejemplo los sistemas de información al pasajero, que no requieren gran precisión. Para su uso en aplicaciones de seguridad (*safety*), como es la señalización ferroviaria, es importante definir unos requisitos mínimos de operación. Hay que tener en cuenta que, en contraposición con otros sectores como la aviación, el entorno ferroviario es un entorno muy exigente para la localización por GNSS debido a la presencia de obstáculos como trincheras, pasos elevados, túneles, zonas

* Autora de contacto: susana.herranz@cedex.es

¹ Susana Herranz de Andrés. Ingeniera de Telecomunicaciones. Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF), del CEDEX.

² Ricardo Campo Cascallana. Ingeniero Industrial. Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF), del CEDEX.

³ Daniel Molina Marinas. Doctor en Ciencias Físicas. Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF), del CEDEX.

⁴ José Bueno Pérez. Doctor ingeniero Naval. Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF), del CEDEX.

urbanas o con vegetación, en los que la calidad de la señal GNSS se ve afectada.

El Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) Galileo, desarrollado por la Unión Europea, se ha diseñado para ofrecer servicios de posicionamiento con mayor calidad de la que permite el sistema GPS en la actualidad. Además, se ha complementado con el sistema europeo de aumentación EGNOS, que mejora las prestaciones de los sistemas GNSS para aplicaciones como el transporte, donde la precisión y la fiabilidad son críticas.

La Agencia Ferroviaria Europea (EUAR-European Union Agency for Railways) ya apuntaba en su informe sobre perspectivas de evolución del ERTMS (ERTMS Longer Term Perspective, 2015) [2], al uso de tecnologías de navegación por satélite (GNSS) como uno de los principales factores que contribuirían a la evolución del ERTMS, al permitir por un lado, una disminución de equipamiento en vía con la consiguiente reducción de costes de despliegue y mantenimiento, y por otro, una mejora en la precisión de la odometría.

Igualmente, en el plan de trabajo de ERTMS publicado por la Comisión Europea en mayo de 2020 (Work Plan 2020 of the European Coordinator for ERTMS) [1], se señala el posicionamiento por satélite como una de las tecnologías clave

(game changer) para la futura evolución del sistema ERTMS, y como una de las nuevas características a incluir en la futura revisión de las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad (TSI de CCS) que se publicarán en 2022.

Por otro lado, pero en la misma dirección, la GSA ha editado un documento (GSA-Report on Rail User Needs and Requirements) [3] donde se describen los distintos requisitos y necesidades de los usuarios para la aplicación de EGNSS en el entorno ferroviario, entre ellos para su aplicación en ERTMS. Tal y como se menciona en dicho informe, la aplicación de GNSS a ERTMS podría ser un medio idóneo para integrar la función de localización del tren dentro de los sistemas embarcados en los niveles 2 y 3 de ETCS, y para proporcionar la función de monitorización de la integridad del tren en el nivel 3 de ETCS. Para alcanzar este objetivo, se debe garantizar que el posicionamiento por satélite cumpla los requisitos RAMS (Reliability, Availability, Maintenance and Safety) que requiere el sistema ERTMS, de tal forma que sea un sistema de posicionamiento seguro, incluyendo la fusión con otros sensores adicionales (por ejemplo, sensores inerciales, acelerómetros u odometrías avanzadas del tren) que permitan alcanzar los niveles de seguridad requeridos.

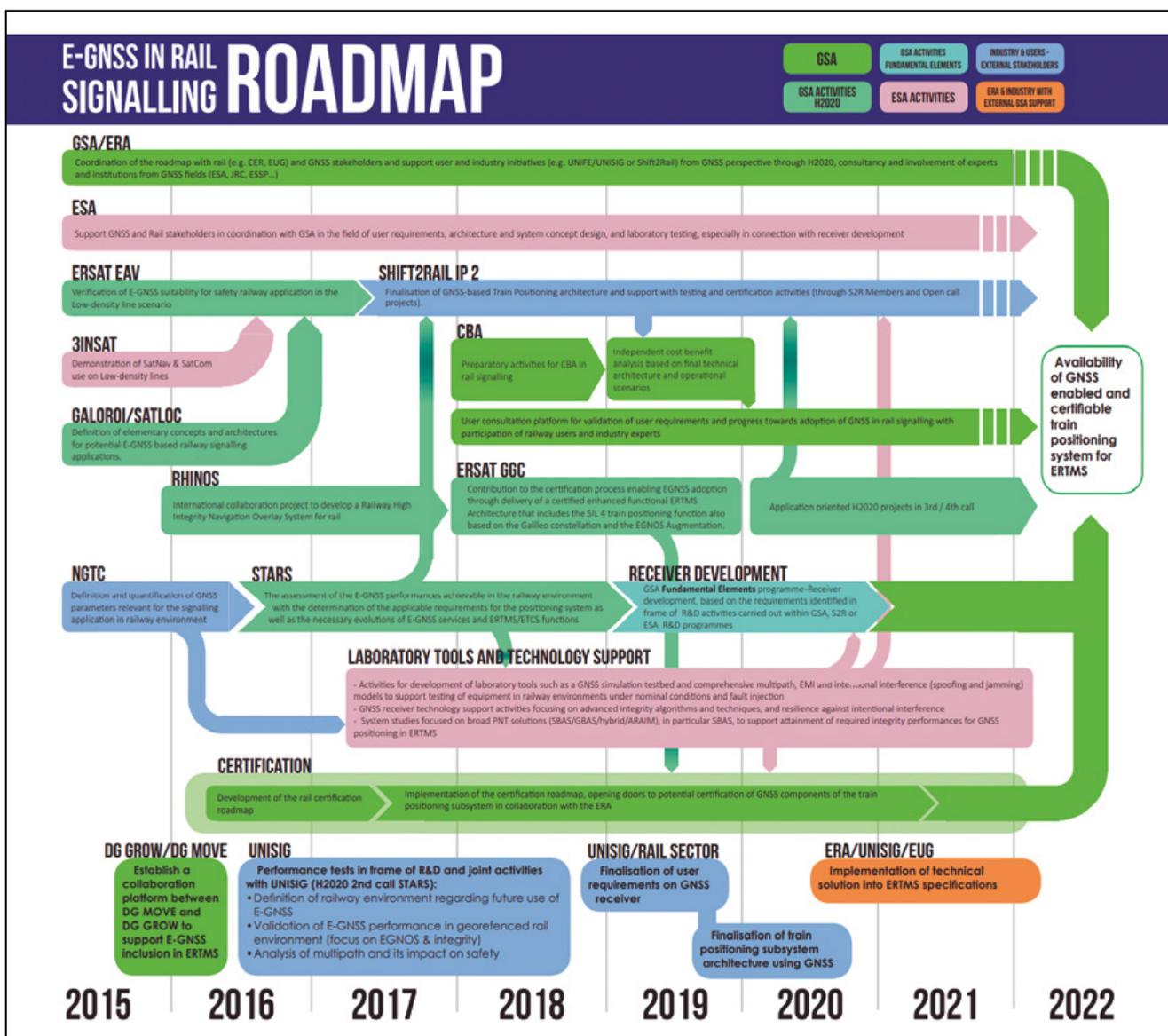


Figura 1. Hoja de ruta para la introducción de Galileo en la señalización ferroviaria (Fuente: ©GSA, ©European GNSS Agency).

Con este fin, se han venido promoviendo distintos proyectos de investigación por parte de la Agencia Espacial Europea (ESA), de la Agencia Europea de Navegación por Satélite (GSA, H2020), y de la iniciativa *Shift2Rail*, como GRAIL, RHINOS, STARS, ERSAT o *GATE4Rail*. La introducción de EGNSS (Galileo) en el ERTMS sigue una hoja de ruta definida por la GSA que ha ido avanzando con la participación de los actores del sector y la consecución de los objetivos de los distintos proyectos de investigación y grupos de trabajo.

Uno de los conceptos claves en estos proyectos de implantación de GNSS en el ERTMS, es el de **baliza virtual**. Por baliza virtual se entiende una localización precisa en la vía, de tal forma que cuando el tren identifique que pasa por ella, le asignará una referencia de posición ETCS, como si fuera una baliza física real instalada en la vía. Para ello, el tren tendrá que estar equipado con un sistema de posicionamiento por satélite y gestionar un mapa de la vía que incluya un listado de referencias posicionales con un identificador y un telegrama vinculado. De esta manera, aunque se incluye un equipo adicional en la arquitectura del tren, se minimiza el impacto en la funcionalidad ETCS, facilitando de esta forma la integración de las dos tecnologías.

En este artículo se expone el proyecto ERSAT-GGC, que terminó a finales de 2019, y se informa del proyecto GATE-4Rail, actualmente en marcha. El Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF) del CEDEX participa activamente en estos proyectos europeos, con el compromiso de aplicar la tecnología EGNSS a la señalización ferroviaria europea ERTMS.

2. PROYECTO ERSAT-GGC

El proyecto **ERSAT GGC (ERTms+SATellite-Galileo Game Changer)** es un proyecto europeo del programa H2020 financiado por la GSA (*European Global Navigation Satellite Systems Agency*) [6], que comenzó en noviembre de 2017 con una duración de 24 meses. Sus principales objetivos son: el contribuir a la estandarización del **proceso de certificación para la adopción de GNSS (Global Navigation Satellite System) en el estándar ERTMS** y la **caracterización de las líneas ferroviarias en función de la calidad de la señal GNSS** recibida. El Consorcio del proyecto europeo se forma con 14 socios de cinco países miembros de la Unión Europea: Italia (RFI, Hitachi STS -antes, Ansaldo STS-, RINA, Trenitalia, RadioLabs, Italcertifer y Bureau Veritas), Francia (Universidad Gustav Eiffel -antes, IFSTTAR-, y SNCF), España (ADIF, CEDEX e INECO), Alemania (DLR) y Bélgica (UNIFE).

El objetivo principal del proyecto es la definición de una metodología para la toma de datos en vía, y el desarrollo de unas herramientas de análisis de estos datos tomados en campo, de forma que se valide un proceso estándar de clasificación de tramos de línea como adecuados o no adecuados para la localización de balizas virtuales. De este modo, el proyecto se concibe como el paso final para poner en uso la aplicación de baliza virtual en el despliegue del sistema de señalización europeo ERTMS mediante el uso de sistemas de navegación multi-constelación (Galileo, GPS, GLONASS y/o BeiDou) y multi-frecuencia (E1/E5 en Galileo o L1/ L5 en GPS) con servicios de aumentación (SBAS en Europa).

La definición del procedimiento de toma de datos en campo incluye la definición tanto de los requisitos de los equipos de medidas de la señal GNSS como de las propias

características de la medición que debe cubrir las posibles rutas en diferentes instantes de tiempo para contemplar distintos ciclos de posiciones de los satélites.

El CEDEX, junto con ADIF e INECO, ha participado en el proyecto instalando la instrumentación en un tren de ADIF y participando en una campaña de medida en la línea Almorchón-Mirabueno para su clasificación desde el punto de vista de la detección del GNSS, y para la validación de las herramientas desarrolladas por otros socios del proyecto para dicha clasificación de una línea.

2.1. Introducción

La aplicación de GNSS en ERTMS se basa en el uso de balizas virtuales para dar información de posicionamiento en ciertos tramos de la vía, con objeto de reducir el número de balizas físicas, mejorar la incertidumbre en la posición y reducir costes de instalación y mantenimiento. Para procesar las balizas virtuales se define un nuevo módulo en el equipo embarcado, llamado Virtual Balise Reader (VBR), que procesará las señales GNSS para localizar las balizas virtuales.

El proyecto ERSAT-GGC ha desarrollado los siguientes puntos clave en el ámbito de la integración del módulo VBR para el uso de balizas virtuales en el ERTMS:

- Definición de una arquitectura de referencia ERTMS que incluya el posicionamiento del tren basado en satélite, de tal forma que el impacto en las especificaciones existentes sea mínimo.
- Definición del proceso, la metodología y las herramientas necesarias para clasificar las áreas de la vía como adecuadas o no para posicionar balizas virtuales. Para ello se define, desarrolla y valida el procedimiento y las herramientas de clasificación de las líneas, culminando con tres campañas de ensayo (en Italia, Francia y España) en las que se aplica el procedimiento definido en el proyecto y se evalúan los resultados en varios laboratorios (RINA, RFI, CEDEX).

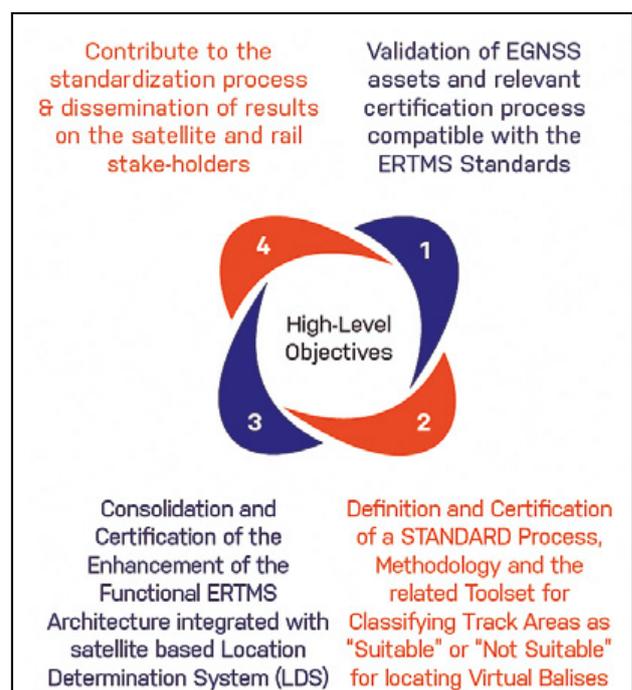


Figura 2. Objetivos principales del proyecto ERSAT-GGC [6].

- Evaluación independiente por Organismos Notificados (NoBOs): el objetivo es la evaluación de la arquitectura ERTMS propuesta, así como del procedimiento y las herramientas para la clasificación de las líneas, por parte de los organismos notificados participantes en el proyecto.
- Finalmente, se realizó una demostración del proyecto con una campaña de medidas de muestra en la línea Cagliari-San Gavino (Cerdeña).

2.2. Arquitectura ERTMS propuesta

Un paso fundamental para incluir la tecnología GNSS y el concepto de **baliza virtual** en el sistema ERTMS es la definición de una arquitectura funcional que lo permita.

Esta propuesta de arquitectura ya se exploró en proyectos anteriores (ERSAT-EAV, NGTC, STARS, RHINOS, etc.), y en ERSAT-GGC se ha revisado y consolidado. El objetivo es definir una arquitectura capaz de integrarse en las futuras evoluciones del sistema ERTMS con el mínimo impacto y garantizando la compatibilidad con los sistemas ERTMS existentes. Para ello, se analizaron los escenarios en los que tendría impacto el uso de balizas virtuales, así como las infraestructuras y conjuntos de ensayos que podrían ser necesarios.

En el sistema ERTMS, las balizas físicas (eurobalizas), instaladas en puntos concretos de la vía, se utilizan para transmitir distintas informaciones al equipo embarcado por medio de los telegramas almacenados en ellas o transmitidos por los LEUs (*Line Side Electronic Unit*). La detección de las balizas físicas se produce cuando la antena del tren pasa sobre la baliza,

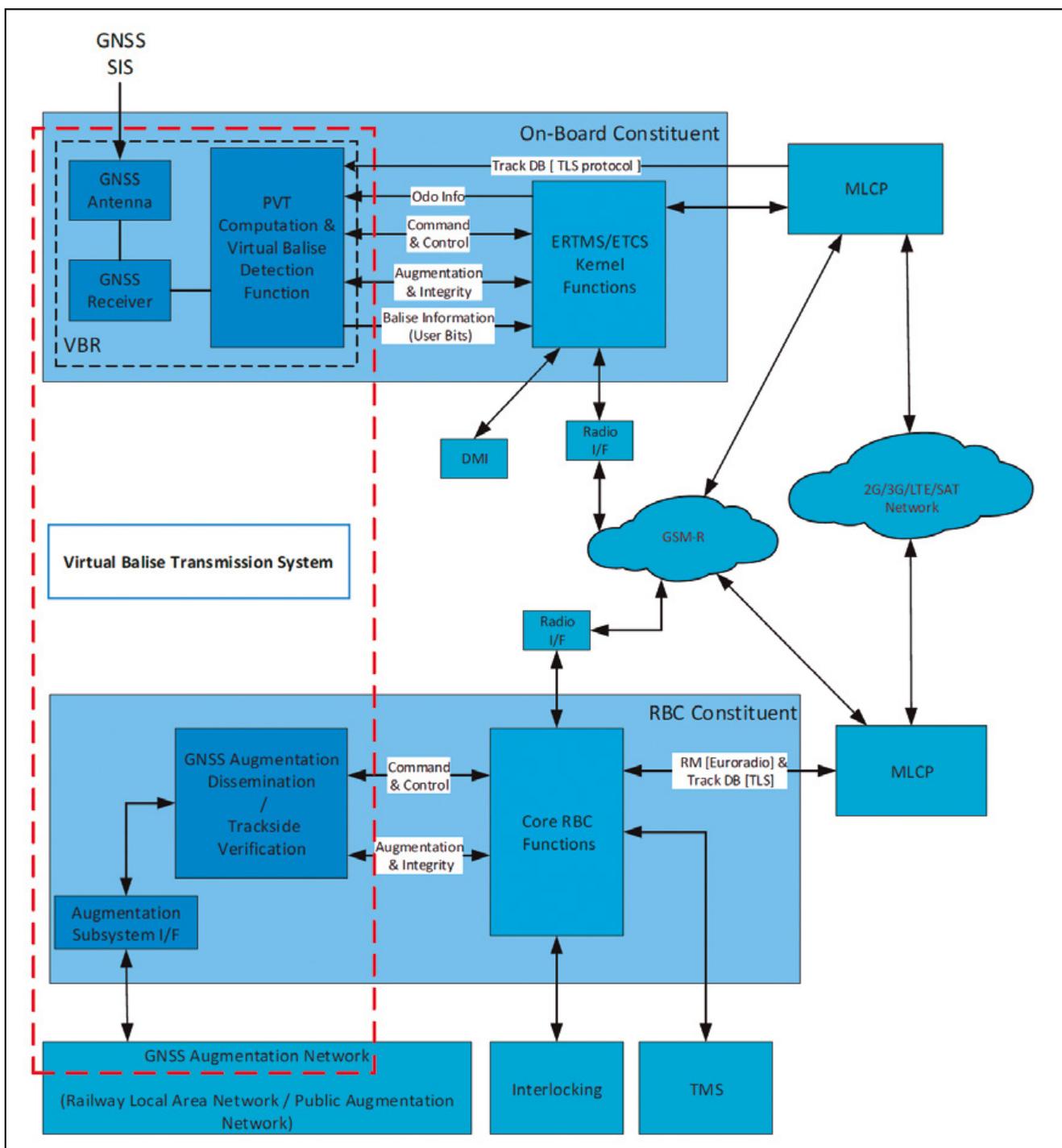


Figura 3. Arquitectura funcional para la introducción del concepto de **baliza virtual** [4].

la energía y la baliza comienza a transmitir el telegrama, que es a su vez recibido y procesado por el equipo embarcado. Es decir, se trata de una transmisión puntual en las localizaciones donde están situadas las eurobalizas.

Las eurobalizas se utilizan en los tres niveles ERTMS, aunque en los niveles 2 y 3 su uso principal es para transmitir información de localización, con objeto de que el equipo embarcado pueda resetear los intervalos de confianza de la posición del tren.

Las balizas virtuales en cambio son puntos virtuales situados en la vía, representados por coordenadas en una base de datos geográfica, de tal forma que su detección se produce cuando la posición GNSS estimada a bordo coincide con la posición de la baliza virtual en dicha base de datos geográfica. Cuando se detecta una baliza virtual, se envía al equipo embarcado el telegrama correspondiente a la misma, por analogía con el funcionamiento de la baliza física. Para dar respuesta a este concepto, se ha propuesto una arquitectura en la que las funciones e interfaces de la arquitectura de referencia ERTMS/ETCS siguen siendo aplicables (por ejemplo, las relacionadas con el sistema de eurobaliza).

Se contempla el nuevo Sistema de Transmisión de Balizas Virtuales (VBTS), que es un sistema de transmisión puntual, análogo al Sistema de Transmisión de Eurobaliza de la arquitectura de referencia ERTMS, siendo su función la de entregar la información de las balizas virtuales al equipo embarcado. Dentro de este sistema VBTS, el *Virtual Balise Reader* (VBR), análogo al BTM de la arquitectura de referencia ERTMS (*Balise Transmission Module*, parte embarcada encargada de la detección de eurobalizas), tiene como función la detección de las balizas virtuales y transmisión de su información al equipo embarcado. Su principio de funcionamiento se basa en el procesamiento en tiempo real de las señales GNSS fusionadas con otros sensores (inerciales IMU, odómetro) con el objetivo de generar el disparo al paso por la localización de la baliza virtual, reportándola al EVC.

2.3. Definición del proceso de clasificación de las líneas ferroviarias desde el punto de vista GNSS

El uso de GNSS para la localización del tren por medio de balizas virtuales requiere que éstas solo se sitúen en áreas donde las señales GNSS tengan calidad suficiente como para que el error de posicionamiento esté acotado.

Por ello, surge la necesidad de analizar la calidad de la señal GNSS en todos los tramos de las líneas ferroviarias para determinar si se están produciendo efectos adversos que pudieran tener impacto en la seguridad y la disponibilidad.

Con objeto de dar respuesta a esta necesidad, se define en este proyecto un proceso de clasificación de las líneas basado en la presencia de amenazas permanentes a la señal GNSS que puedan afectar al uso de las balizas virtuales, y se desarrollan las herramientas necesarias para ejecutarlo. Dichas amenazas se detectan individualmente, y posteriormente, se aplica una lógica de decisión que dará como resultado la clasificación de cada tramo de la línea según el siguiente código de colores:

- Verde: zona apta para el uso de balizas virtuales
- Rojo: zona no apta para el uso de balizas virtuales
- Amarillo: zona que requiere un estudio más profundo, no se puede clasificar como rojo o verde, serían necesarias medidas adicionales

Los principales componentes del proceso son un HW de medida para la adquisición de datos y señales GNSS, y un posterior procesado SW (*toolset*) para la detección de amenazas locales a la señal GNSS que pudieran tener impacto en la baliza virtual.

Una vez realizada la adquisición de datos mediante campañas de medida en las vías a clasificar, el *toolset* realiza el análisis de amenazas utilizando las siguientes técnicas:

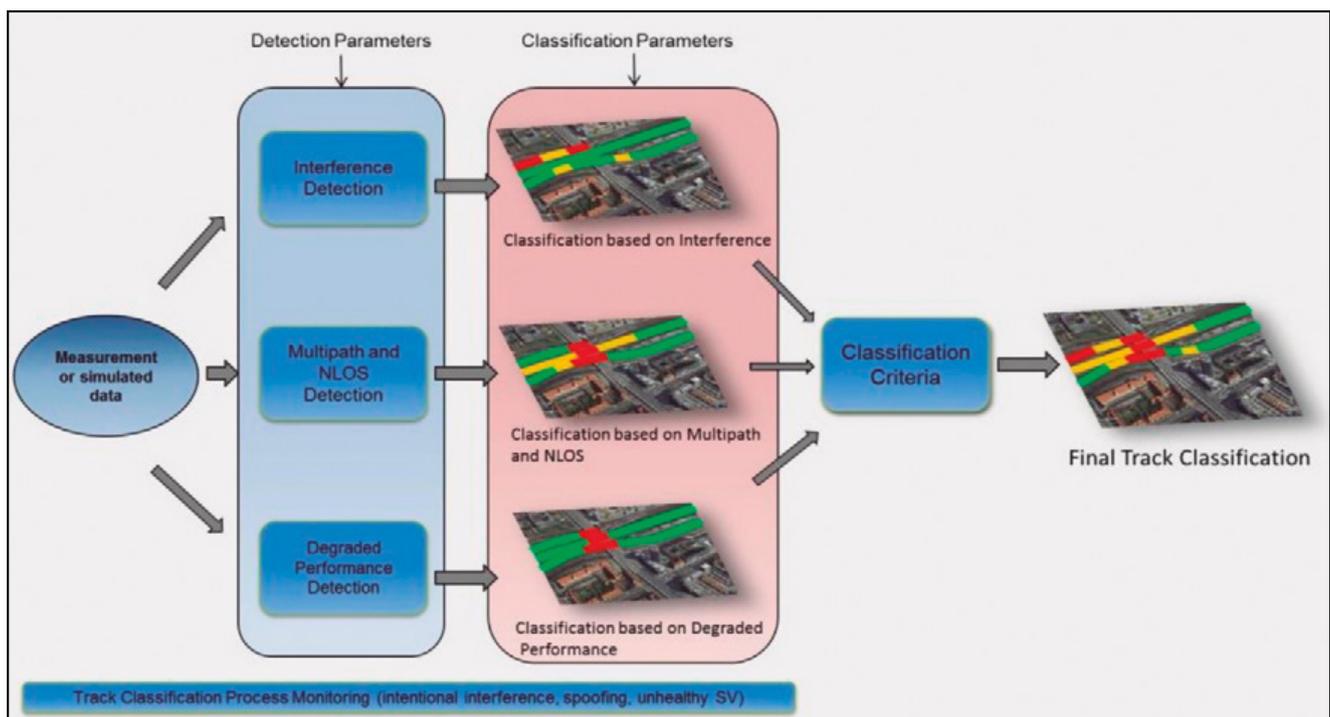


Figura 4. Esquema del proceso de clasificación [5].

1. Análisis de la señal de satélite registrada por los receptores GNSS:

- Detección de *Multipath*
- Detección de *Non Line Of Sight* (bloqueo)
- Detección de interferencias de RF
- Observación de la relación señal/ruido
- Observación del control de ganancia automática
- Análisis de la calidad de la señal

2. Análisis con métodos complementarios:

- Detección de interferencias de RF con analizador de espectros
- Visibilidad de cielo abierto con cámara ojo de pez

3. Análisis con métodos de simulación con modelos 3D del terreno:

- Obtención de NLOS
- Utilización de simulaciones de posiciones de satélite

Con la aplicación de estas técnicas, se obtiene la clasificación final de la línea.

2.4. Campañas de medida: la campaña de medida en España

Para la realización de medidas en la línea se requiere en primer lugar la adquisición de los equipos de medida y su instalación a bordo del tren (para lo cual es preciso gestionar las autorizaciones necesarias), y la planificación de las campañas de medida de tal forma que los recorridos a realizar permitan recoger datos que cubran las distintas constelaciones durante el tiempo suficiente como para cubrir sus distintos ciclos (24 horas para GPS, 10 días para Galileo). Las herramientas de

medida pueden instalarse en un tren dedicado o en un tren comercial contando con las autorizaciones pertinentes.

Para cada instalación de los equipos de medida en un tren, se requiere realizar una calibración previa del sistema que será válida para esta instalación concreta, con objeto de determinar los umbrales de medida (parámetros de calibración) que luego habrán de tenerse en cuenta para el análisis de las señales adquiridas durante las medidas dinámicas (campañas de medida).

Para verificar el proceso de clasificación con respecto al HW propuesto y para la validación del SW desarrollado, se han realizado y analizado en el laboratorio del CEDEX las siguientes campañas de medida:

- Campaña de medidas en la línea Cagliari-San Gaviño (Italia)
- Campaña de medidas en la línea Almorchón-Alhondiguilla (España)

La campaña de medidas realizada en España ha sido organizada y coordinada por ADIF y ha contado con la participación de CEDEX e INECO para la preparación y ejecución de la misma, así como con la participación de IFSTTAR y DLR durante la realización de medidas.

a) Selección de línea a clasificar:

En primer lugar, se estudió la mejor opción para la selección de la línea a clasificar, y ADIF optó por seleccionar la línea nº 528 Almorchón (Badajoz)-Mirabueno (Córdoba), realizándose la campaña en el tramo Almorchón-Alhondiguilla, con una longitud de 89,3 km y una velocidad máxima de 60 km/h.

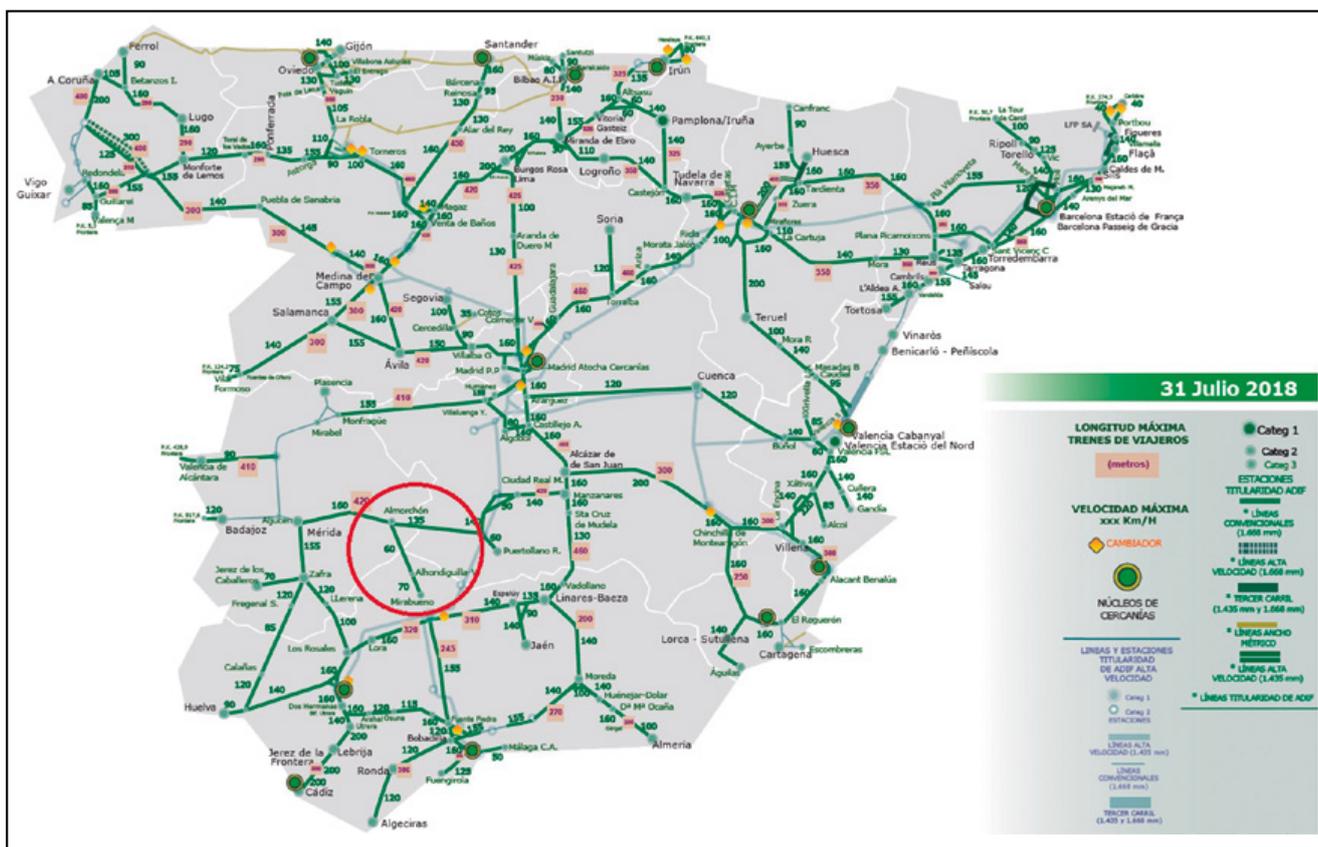


Figura 5. Localización de la línea de Almorchón-Alhondiguilla [5].

La selección de esta línea se debe al interés en evaluar la posibilidad de uso de la tecnología GNSS en este tipo de líneas regionales de bajo tráfico para la implantación de un sistema ERTMS de bajo coste.

La estación de Almorchón se establece como base de operaciones desde donde parten todos los surcos de recorridos de pruebas hasta Alhondiguilla y vuelta a la misma estación.

Las características principales de la línea son: vía única, línea de bajo tráfico, no electrificada.

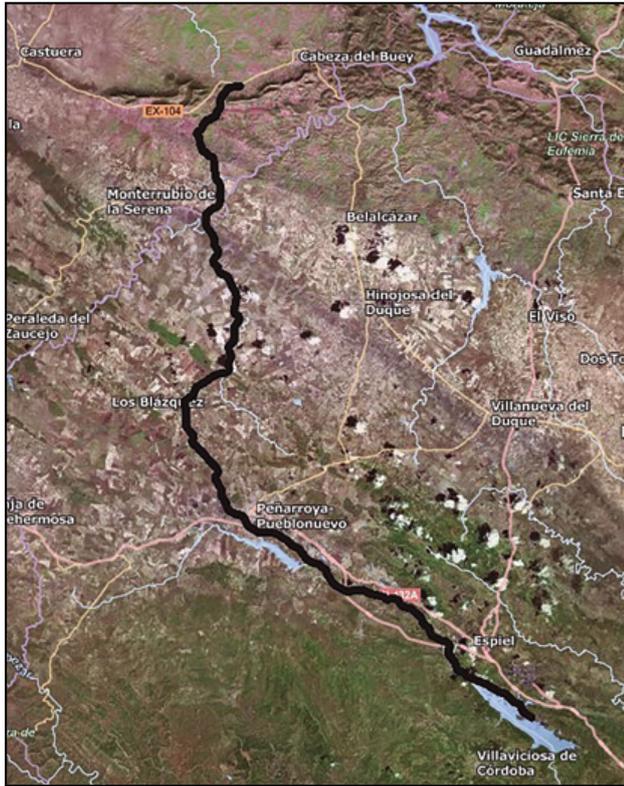


Figura 6. Línea española Almorchón-Alhondiguilla visualizada en SignA [5].



Figura 7. Estación de Almorchón.



Figura 8.1. Vista del tren entrando en Alhondiguilla en la línea de pruebas.



Figura 8.2. Tren en la línea de Almorchón.

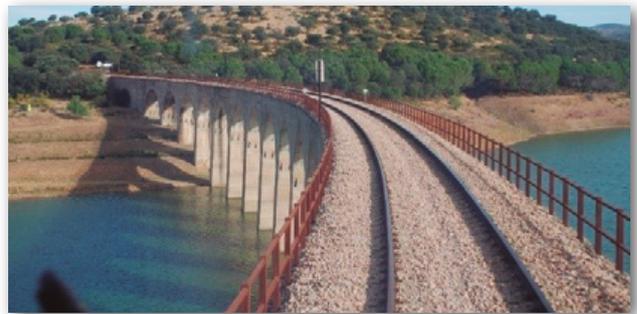


Figura 8.3. Vista de la línea.



Figura 8.4. Vista de la línea, zona de trinchera.



Figura 8.5. Vista de la línea desde el tren.



Figura 8.6. Puente metálico sobre el río Zújar.



Figura 8.7. Paisajes del entorno de la línea.



Figura 8.8. Paisajes del entorno de la línea.

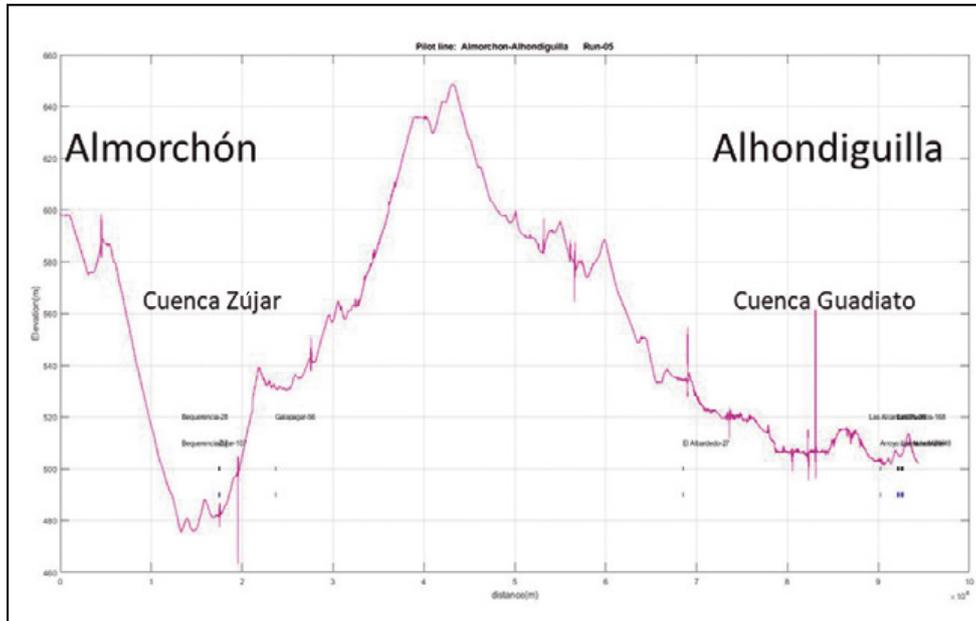


Figura 9. Perfil de elevación de la línea obtenido directamente de los registros del receptor GNSS.

Desde el punto de vista geográfico la vía recorre en su trazado desde Alhondiguilla hasta Bélmez, toda la cuenca del Guadiato (río que naciendo en la Sierra Morena desemboca en el Guadalquivir), y una vez pasada Sierra Morena el trazado del tren sigue la cuenca del Zújar (río que desemboca en el Gadiana), hasta llegar a Almorchón, discurriendo principalmente por campo abierto, con pasos elevados y alguna zona boscosa y de trinchera. El tren descubre en su recorrido paisajes de gran belleza (figuras 8 y 9).

b) Selección del material rodante y del equipo de medida:

ADIF aporta para la campaña de adquisición de datos su tren laboratorio BT-02, compuesto por cuatro coches con una locomotora diésel y espacio interior para la instalación de los equipos de medida (figura 10).

Una vez seleccionada la instrumentación de medida siguiendo las especificaciones técnicas definidas en el proyecto, se procede a la instalación e integración de los equipos a bordo del tren. La instrumentación consiste en una antena GNSS instalada en el techo del tren en

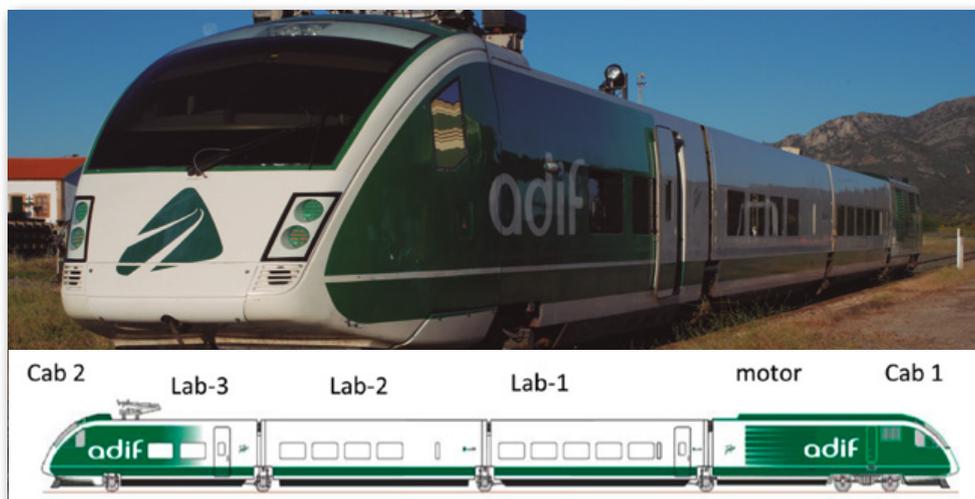


Figura 10. Material rodante de ADIF [5].

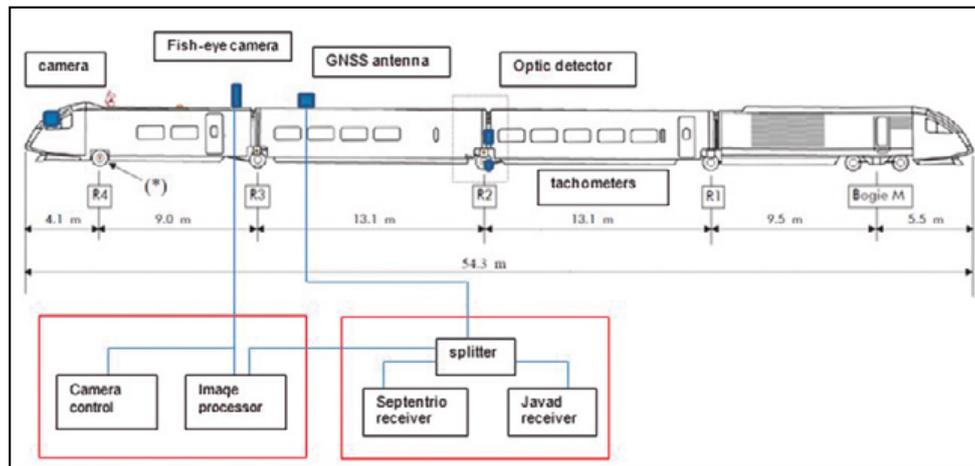


Figura 11. Esquema de instalación de equipos a bordo [5].

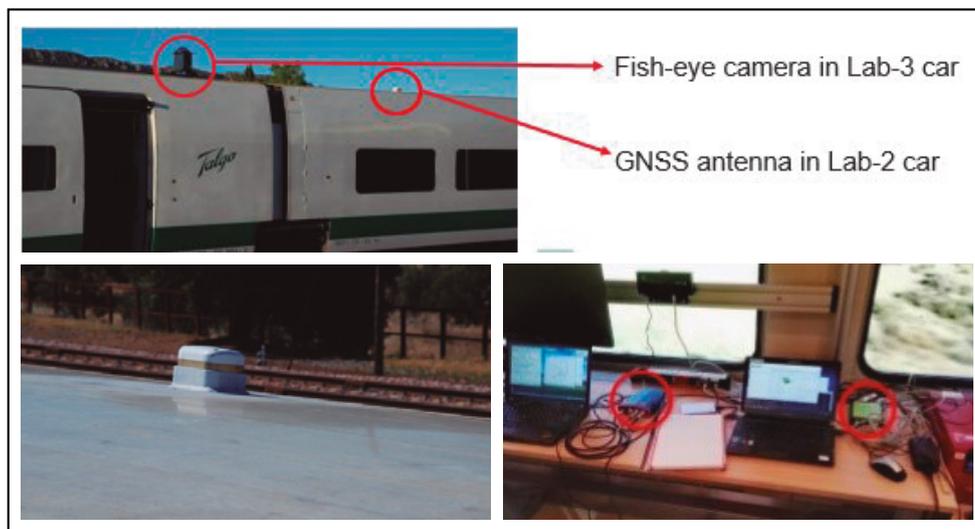


Figura 12. Detalle de la antena GNSS instalada en el techo del tren y receptores y sistemas de control y registro en el interior del tren [5].

una zona libre de obstáculos conectada directamente a un *splitter*, que distribuye la señal al receptor GNSS principal, y a otro receptor GNSS adicional instalados en el interior del coche laboratorio nº 2. Se contó también con una cámara en cabina para registrar el entorno de la vía. Adicionalmente, se instaló un sistema de cámara de ojo de pez en el techo para analizar la visibilidad de los satélites con el sistema de control instalado en el interior del coche laboratorio nº 3.

c) Preparación y ejecución de la campaña de pruebas

La integración e instalación de los equipos se realizó de acuerdo a especificaciones, y se planificaron los distintos recorridos a realizar para cubrir distintos momentos del día, de tal forma que se tuvieran muestras espaciadas en 24 horas, para garantizar la repetición de la constelación GPS, y en 10 días, para garantizar la repetición de la constelación Galileo.

La campaña de pruebas se llevó a cabo durante 10 días (del 21 al 31 de mayo de 2019), en distintas franjas horarias (mañana, tarde y noche) para cubrir las distintas posiciones de los satélites. Adicionalmente, el 21 de mayo se hizo una adquisición de datos con el tren parado en una zona de cielo abierto y sin interferencias, para la calibración de los equipos GNSS (figura 13).

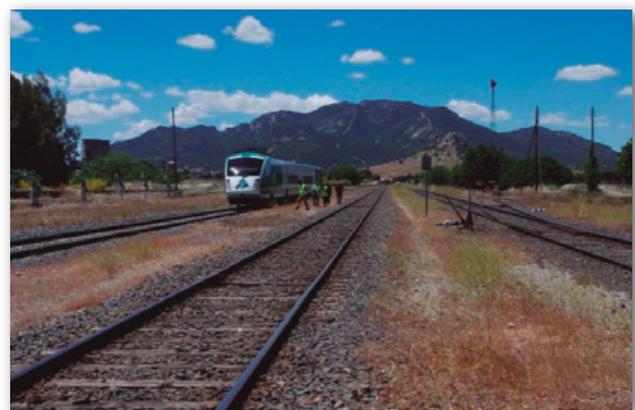


Figura 13. Calibración de equipos GNSS.

En la campaña de pruebas participó personal de ADIF, CEDEX, INECO, IFSTTAR y DLR. Los datos registrados por los distintos equipos se almacenaron para su posterior análisis.

d) Resultados

Los datos se descargan para su análisis en el laboratorio del CEDEX con el *toolset* desarrollado en el proyecto, obteniéndose la clasificación final de la línea. Como se verá, la

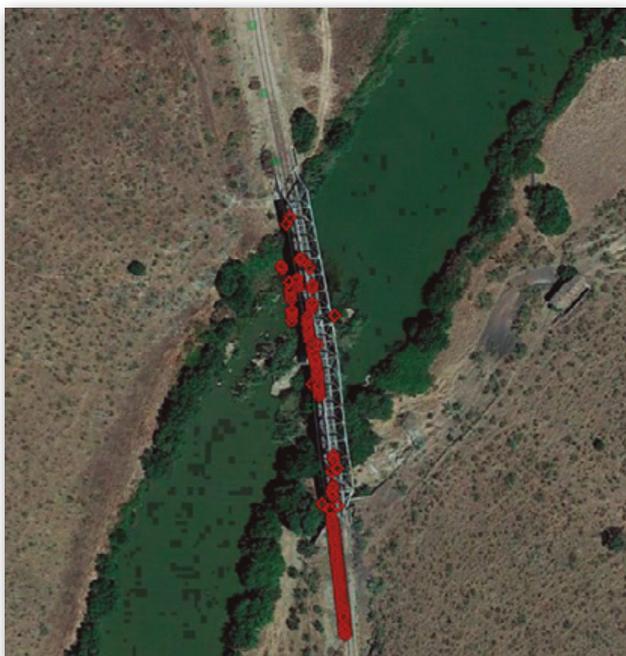


Figura 14a. Análisis preliminar: área con un puente metálico, se observa dispersión en la localización (Visualizado en Google Maps).



Figura 14b. Vista del puente metálico.



Figura 14c. Análisis preliminar: área con un paso elevado sobre una carretera, se observa dispersión en la localización (Visualizado en Google Maps).



Figura 14d. Vista del paso elevado.

herramienta realiza un análisis de la señal GNSS detectando la existencia de efectos de *multipath*, visibilidad de satélites e interferencias, y marca los tramos de líneas según el código de colores definido en el procedimiento: verde, rojo y amarillo.

En un análisis preliminar de la solución PVT (Posición Velocidad Tiempo), extraída directamente del receptor GNSS, se observó que la mayor parte de la línea estaba libre de amenazas a la señal GNSS, al tratarse de una línea en campo abierto, sin construcciones cercanas ni zonas de cañones o túneles. Se pudieron observar errores de localización en zonas como un puente metálico y en pasos elevados. El análisis detallado posterior realizado con el *toolset*, que identifica los efectos adversos sobre las señales GNSS, corroboró estos análisis preliminares y detectó asimismo problemas en estas zonas (figura 14).

2.5. Herramienta de análisis

Para el análisis de la campaña con la herramienta (*toolset*) de clasificación de la señal GNSS del proyecto ERSAT-GGC, es necesario disponer de los siguientes datos de entrada:

- Ficheros *Raw Data* de cada viaje, que contienen los datos adquiridos por el receptor GNSS, en el formato propietario del receptor utilizado.
- *Track Maps*: ficheros con las coordenadas de latitud, longitud y altura (3D) de cada punto de la vía y su correspondiente PK (1D) espaciados con una resolución de 1 metro. Cada fichero corresponde a cada sección de vía. Datos generados a partir de algoritmos aplicados a los registros GNSS obtenidos en los 20 recorridos de pruebas.
- *Run Tables*: ficheros generados para cada viaje durante la campaña de pruebas, con los datos de inicio y fin del viaje, y tramos de vía recorridos, preparados en el formato acordado en el proyecto.
- *3D Models*: modelos 3D del terreno, obtenidos de la base de datos del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Los *Track Maps* (dato de entrada para el *toolset*) contienen las coordenadas de las distintas secciones de la vía. Para crearlos, se dividió la vía en secciones entre nodos (desvíos), de tal forma que cada circulación se ejecutaba sobre una ruta consistente en una concatenación de secciones de la vía (*Track ID*) (figuras 15 y 16).

El *toolset* analiza los datos adquiridos para determinar las distintas amenazas que pudieran existir sobre la señal GNSS. Para ello distintas técnicas analizan la señal para:

- Detección de *Multipath*.
- Detección de *Non Line Of Sight* (bloqueo).
- Detección de interferencias de RF.
- Detección de zonas con comportamiento degradado de la señal GNSS mediante simulación con modelos 3D del terreno.
- Detección de obstáculos mediante cámara de ojo de pez.

Se realizó la integración del *toolset* en el LIF, dedicando una estación de trabajo a tal efecto.

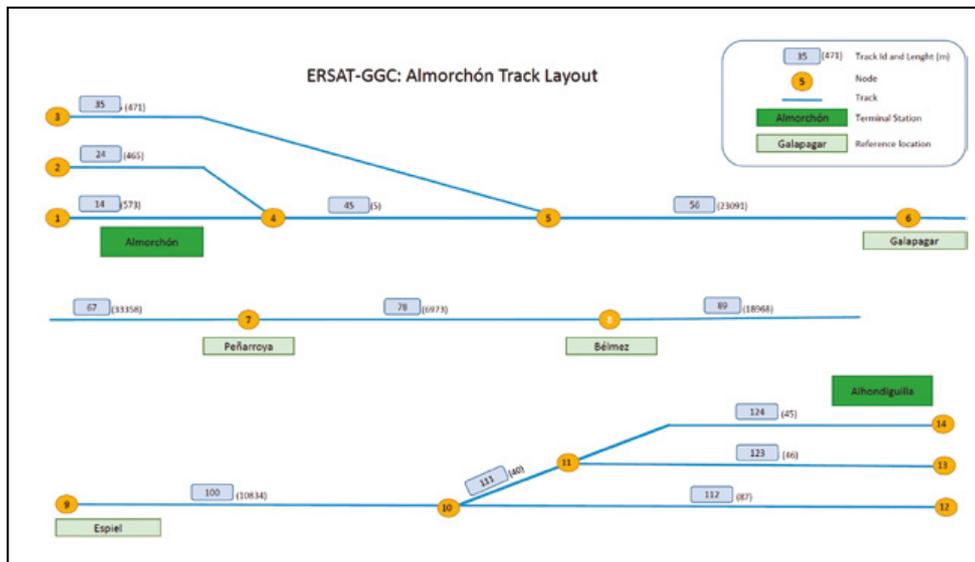


Figura 15. Esquema de la topología 1D de la línea distribuida en secciones [5].

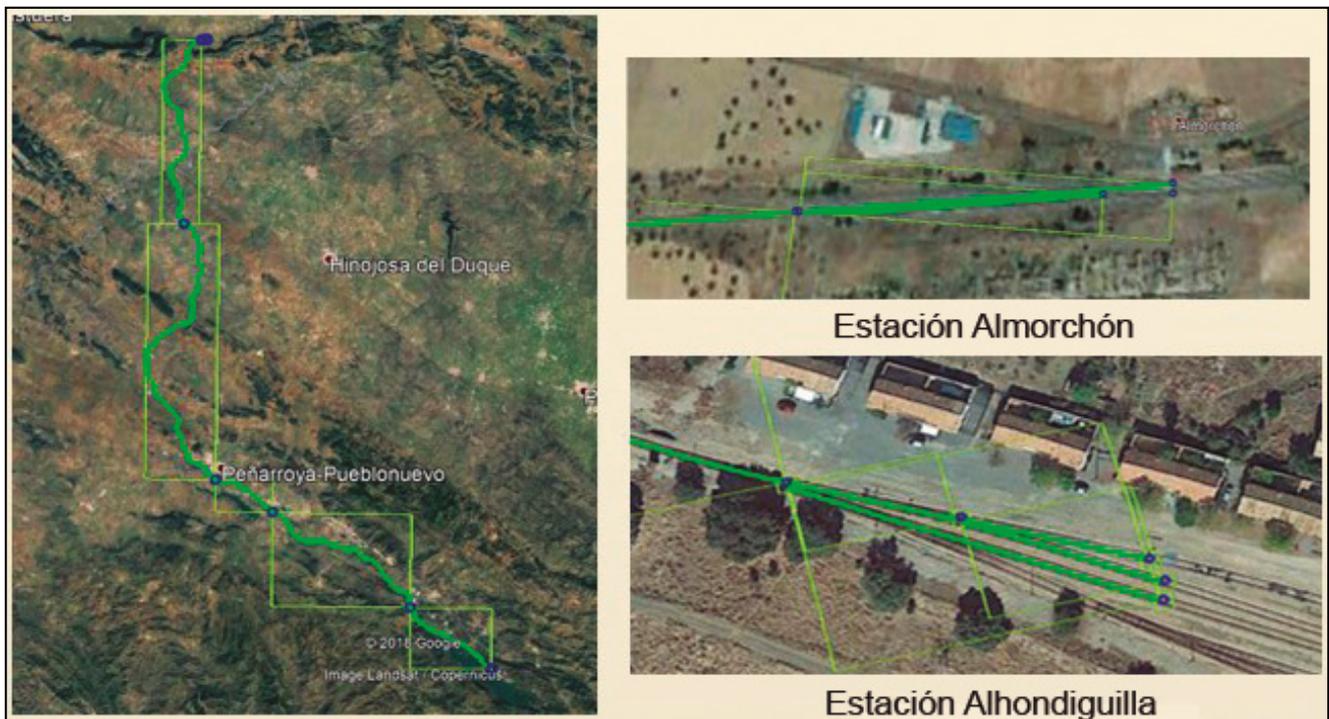


Figura 16. Representación de la topología en 3D, Track Maps y Track ID (Visualizado en Google Maps) [5].

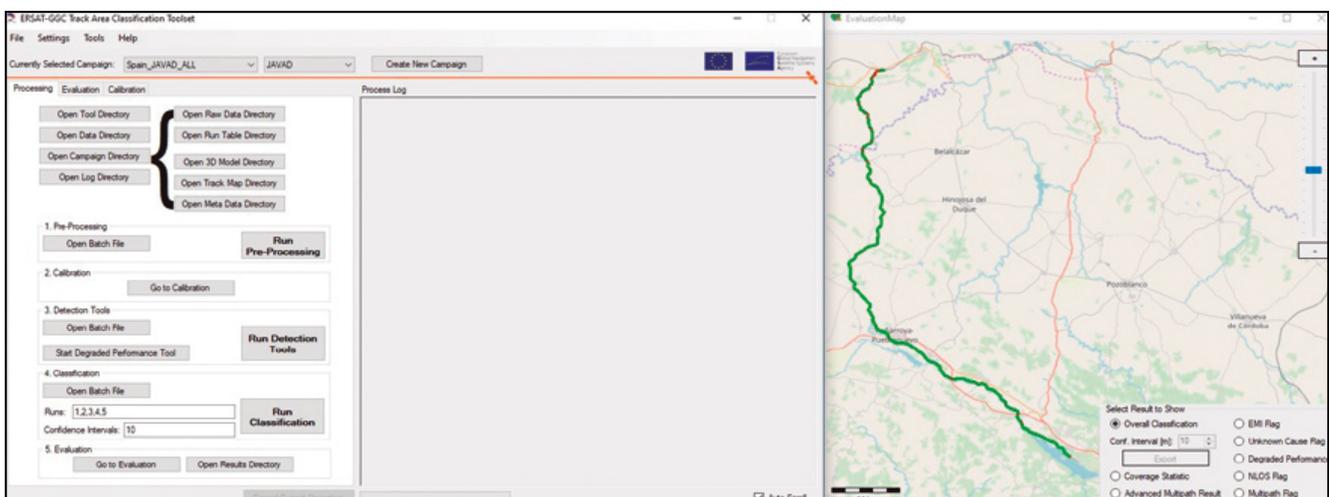


Figura 17. Detalle del interfaz de usuario.

Para la organización de los datos recogidos y analizados en cada campaña, se definió el procedimiento de gestión de las bases de datos con el objetivo de facilitar su trazabilidad durante las distintas fases de procesado en la herramienta (*toolset*). Las fases se detallan a continuación:

1. Calibración: en la fase de calibración se procesan los datos de las medidas estáticas realizadas para calibrar las herramientas.
2. Pre-proceso: en este paso, se procesan los datos en bruto (*Raw Data*) de las medidas dinámicas (las distintas circulaciones) para obtener los datos de entrada al *toolset*.
3. Detección: aplicación de las distintas técnicas para obtener los datos intermedios previos a la clasificación.
4. Clasificación: en esta fase se seleccionan los viajes que se quieren clasificar.
5. Evaluación: la evaluación da el resultado final de cada viaje o grupo de viajes para todas las técnicas de clasificación. En este paso se obtiene la clasificación de la línea según el código de colores definido en el proyecto (verde, rojo, amarillo). Como se comentó previamente, una clasificación en amarillo representa que no hay suficientes datos para clasificar esa zona. Se observó que para obtener un resultado con el mínimo número de zonas clasificadas en amarillo, era recomendable analizar el mayor número de viajes agrupados.

En la figura 18 se muestra la clasificación de la línea tras procesar los datos de todos los viajes, donde se puede observar que se obtiene una clasificación en verde en la mayoría de los tramos.

Esta clasificación final de la línea de pruebas en su mayoría en verde, es consecuente con lo esperado, al tratarse de una línea que discurre en gran parte por cielo abierto.

A continuación se muestran ejemplos de algunos puntos clasificados en rojo por la herramienta de ER-SAT-GGC y, donde se puede observar que coinciden con zonas de paso superior de carreteras, puentes metálicos y zonas de trinchera y de gran vegetación. En este apartado cabe destacar el ejemplo del puente metálico del río Zújar en donde la herramienta detecta la presencia de *multipath* (fenómeno debido a múltiples reflexiones de la señal emitida por el satélite y dando lugar a una distorsión en la señal) en la zona de vigas metálicas del puente cuando el tren se encuentra circulando sobre él (figuras 19, 20 y 21).

Se ha realizado también en el LIF el ejercicio de clasificación de la línea regional italiana de Cerdeña en el tramo Cagliari-San Gavino, siguiendo el procedimiento definido anteriormente para la línea española. En relación a las características de la línea, cabe destacar que aparecen dos zonas claramente diferenciadas: 1) la zona norte: transcurre en gran parte por cielo abierto; y 2), la zona sur: discurre por varios núcleos urbanos.

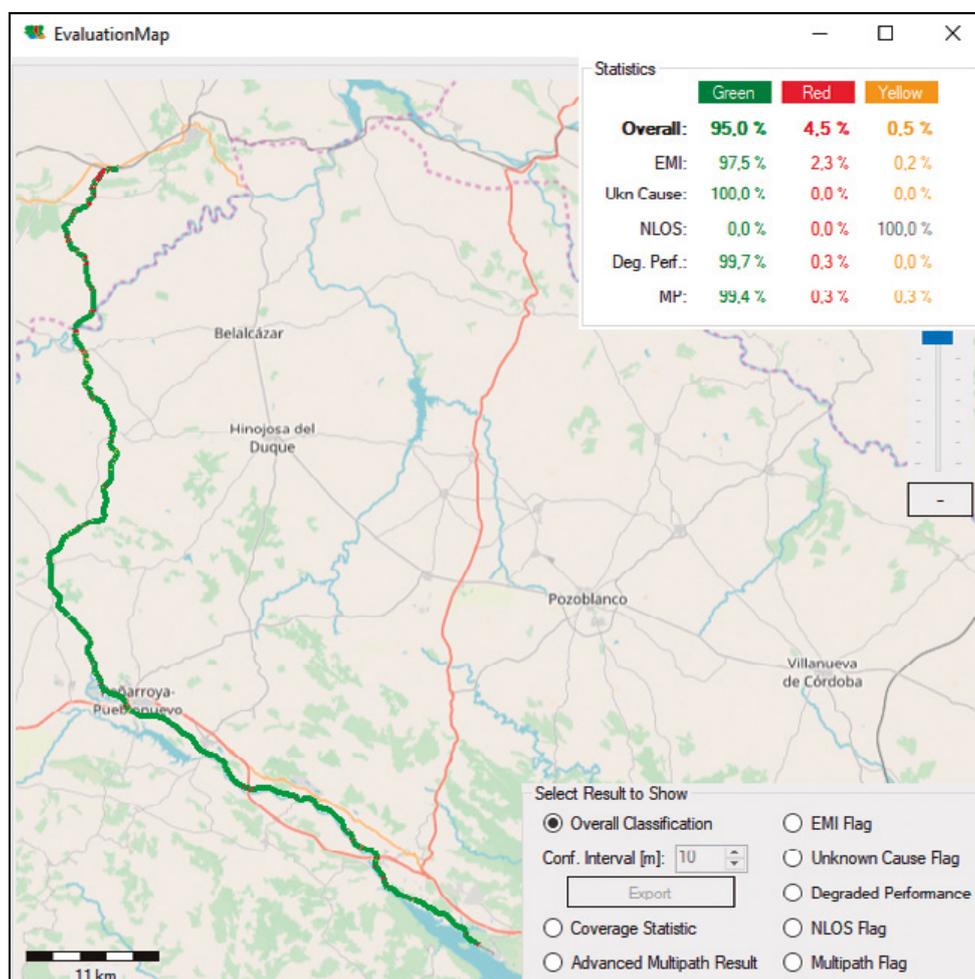


Figura 18. Clasificación de la línea Almorchón-Alhondiguilla.



Figura 19. Ejemplo de detección de multipath en puente metálico sobre el río Zújar, seguido de una trinchera (Fuente: ERSAT-GGC y visualizado en Google Maps).



Figura 20. Ejemplo de detección de *multipath* paso elevado, con zona arbolada en el entorno (Fuente: ERSAT-GGC y visualizado en Google Maps).



Figura 21. Ejemplo de detección de *multipath* zona de trinchera y árboles (Fuente: ERSAT-GGC y visualizado en Google Maps).

En la figura 22 se puede observar cómo la clasificación de la línea en la zona norte es en su mayoría verde y consecuente con lo esperado, mientras que en la zona sur se observan zonas rojas en los entornos urbanos. En un análisis posterior

de estas zonas, se ha comprobado que están asociadas al fenómeno de interferencia *multipath* relacionado con la existencia de construcciones y vegetación en las proximidades de la vía y multitud de pasos superiores de carreteras.

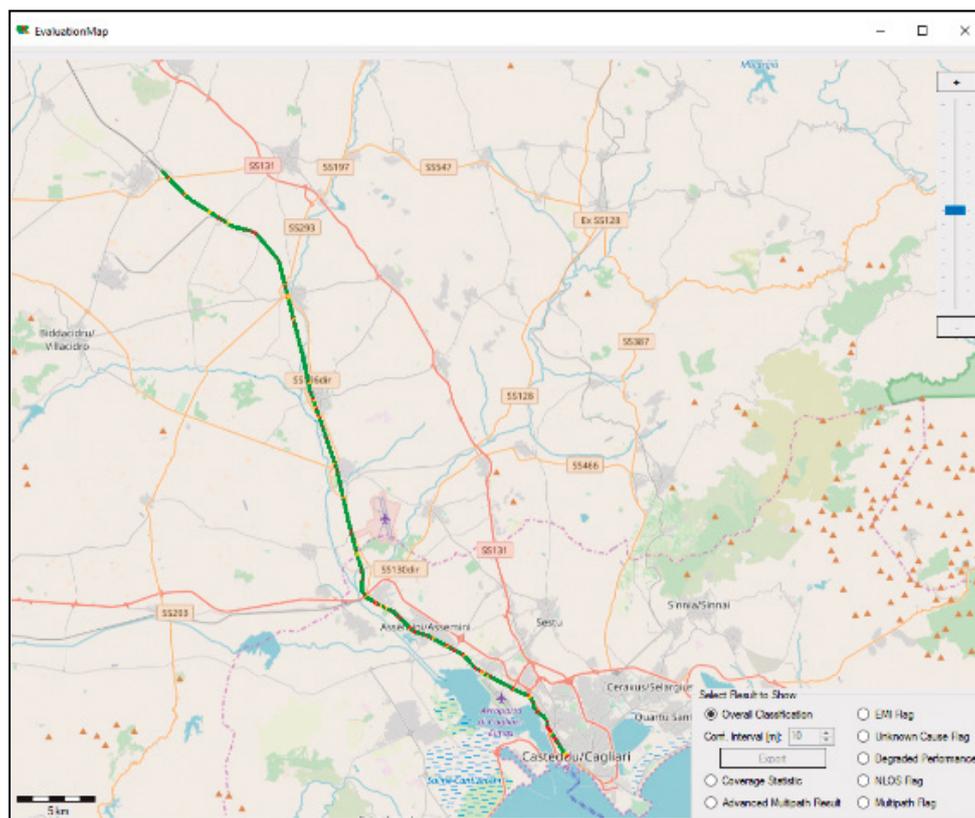


Figura 22. Clasificación de la línea Cagliari-San Gavino.

2.6. Conclusiones

El proyecto ERSAT-GGC ha contribuido a ofrecer una clasificación de las líneas ferroviarias definiendo un procedimiento estándar y desarrollando un conjunto de herramientas que permiten analizar los efectos que se producen en la señal de satélite en cada área de la vía. La clasificación de la vía con respecto a la calidad de la señal GNSS tiene distintas utilidades, entre ellas verificar qué tramos son aptos o no para el uso de balizas virtuales. Esta clasificación desde el punto de vista GNSS de una línea ferroviaria es un requisito previo en el diseño de la ingeniería ERTMS para una nueva línea o para la modernización de líneas existentes implantando ERTMS con balizas virtuales.

Hay que destacar que de los resultados obtenidos de la clasificación GNSS de la línea de Almorchón, con un 95 % en verde, puede considerarse un tipo de línea óptimo para la aplicación de la tecnología GNSS.

3. PROYECTO GATE4Rail

Dentro del desafío europeo de “Transporte inteligente, ecológico e integrado” que impulsa el uso de transportes seguros y respetuosos con el medio ambiente, se potencia la aplicación de sistemas innovadores y rentables en ámbitos como la señalización ferroviaria.

El proyecto *GATE4Rail* (*GNSS Automated Virtualized Test Environment for Rail*), financiado por *Shift2Rail*, que se inició en diciembre de 2018 con una duración de dos años [10], busca aunar la experiencia de los distintos socios en los campos de GNSS y ERTMS con la finalidad de disponer de una plataforma madura que permitirá simular los comportamientos de la señal GNSS tanto en condiciones nominales como en presencia de amenazas y su

integración en la señalización ferroviaria a través del ERTMS.

El proyecto cuenta con socios de distintos países: RadioLabs, RFI y Bureau Veritas (Italia), Universidad Gustav Eiffel (anteriormente llamada IFSTTAR) y GUIDE (Francia), UNIFE y M3SB (Bélgica) y CEDEX e INECO (España).

GATE4Rail se centra en dar solución a dos de los ejes de trabajo definidos en el programa *Shift2Rail*: 1) posicionamiento seguro del tren: mejora de la información de localización del tren mediante desarrollo de un sistema de posicionamiento seguro basado en múltiples sensores que cumplan con las normativas de seguridad ferroviaria; y 2), *Zero-on-site-testing*: tarea centrada en la reducción significativa de las pruebas en campo y el tiempo de puesta en servicio de los sistemas mediante el desarrollo de arquitecturas y plataformas que respalden la interoperabilidad y ejecución de procesos de prueba completos en laboratorio.

Dentro de este marco de trabajo y haciendo uso de las nuevas tecnologías, el proyecto *GATE4Rail* propone una plataforma geo-distribuida y virtualizada [9] para la integración de las señales GNSS en el sistema de señalización ERTMS mediante utilización de balizas virtuales (figura 23).

Para llevar a cabo esta tarea, el proyecto *GATE4Rail* contempla la caracterización de los fenómenos GNSS específicos del entorno ferroviario y el desarrollo de una metodología para su implantación en el entorno de simulación. De este modo, se abre el camino a la evaluación de componentes de posicionamiento en el ámbito ferroviario tanto en condiciones nominales como en presencia de amenazas (globales y locales) [7], [8].

En el apartado de mantenimiento y evolución de la plataforma virtualizada, este proyecto da un paso adelante en la aplicación de metodologías y herramientas de la

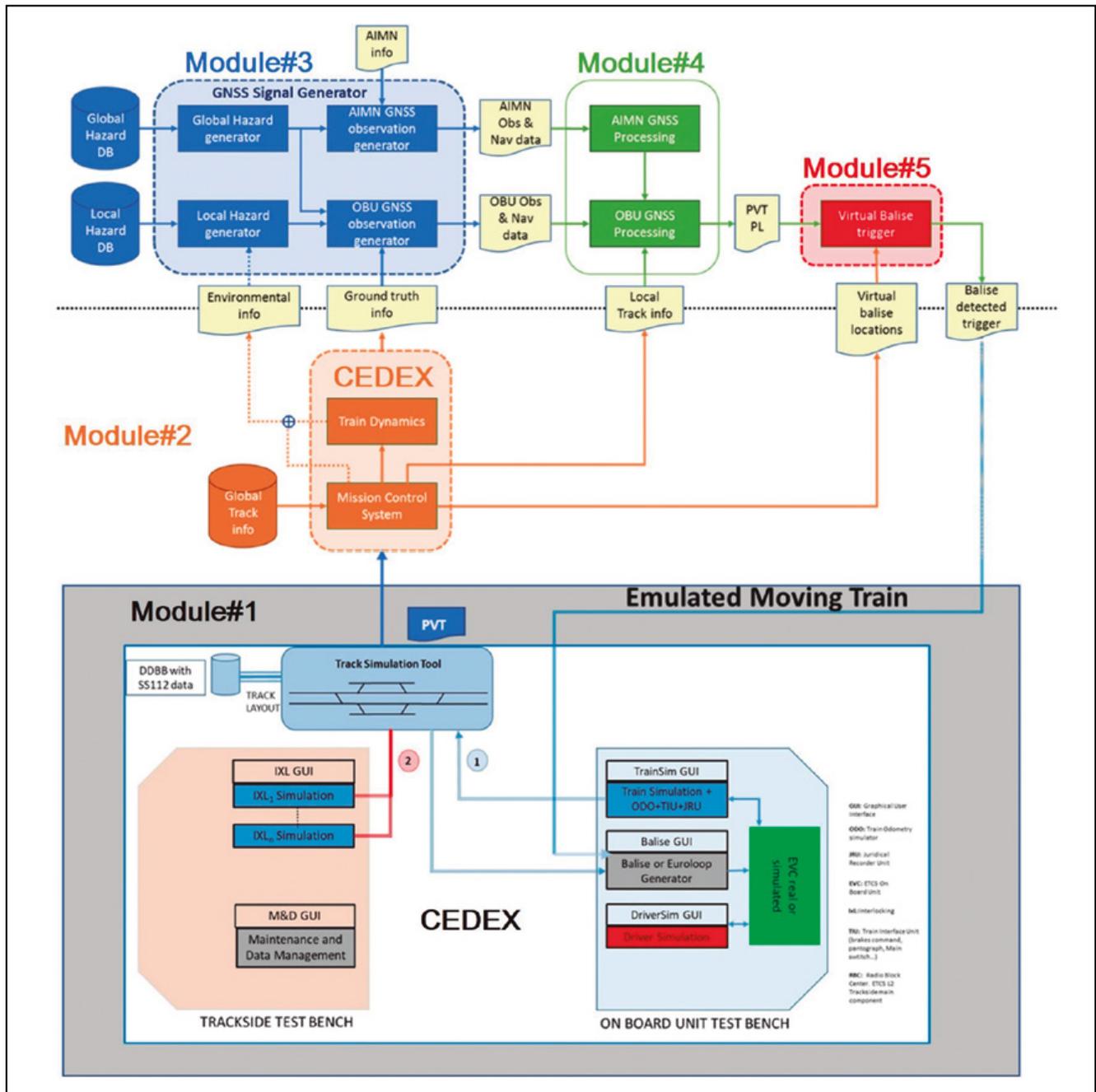


Figura 23. Arquitectura de la plataforma de ensayos.

denominada Ingeniería de Sistemas Basada en Modelos (MBSE) que aseguran la integración, modularidad y detección en fases tempranas del desarrollo de problemas asociados a fases posteriores del desarrollo.

En paralelo al enfoque MBSE, se encuentra la metodología dedicada a la automatización de las campañas de pruebas que van desde la definición de escenarios hasta la generación de informes, teniendo por objetivo el garantizar la ejecución automática y repetitividad de pruebas, siendo este un factor clave a la hora de trabajar con módulos con altos niveles de seguridad.

Como se observa en la figura 24, se hace referencia a los niveles TRL (*Technology Readiness Level*), clasificación

implementada en el programa Horizonte2020 con el objetivo de medir el grado de madurez de una tecnología previa a su integración en un sistema. En el caso de *GATE4Rail* se ha considerado un TRL4 para la tecnología validada en laboratorio (desarrollo de la plataforma virtualizada y caracterización GNSS del entorno ferroviario) y un TRL3 para prueba de concepto (metodología para la evolución y automatización de la plataforma).

De este modo, el proyecto *GATE4Rail* hace frente a la necesidad de integrar tecnologías GNSS para la evolución del Sistema Europeo de Señalización Ferroviaria (ERTMS) mediante soluciones innovadoras que supongan una reducción de costes y contribuyan a la expansión del ERTMS en Europa.

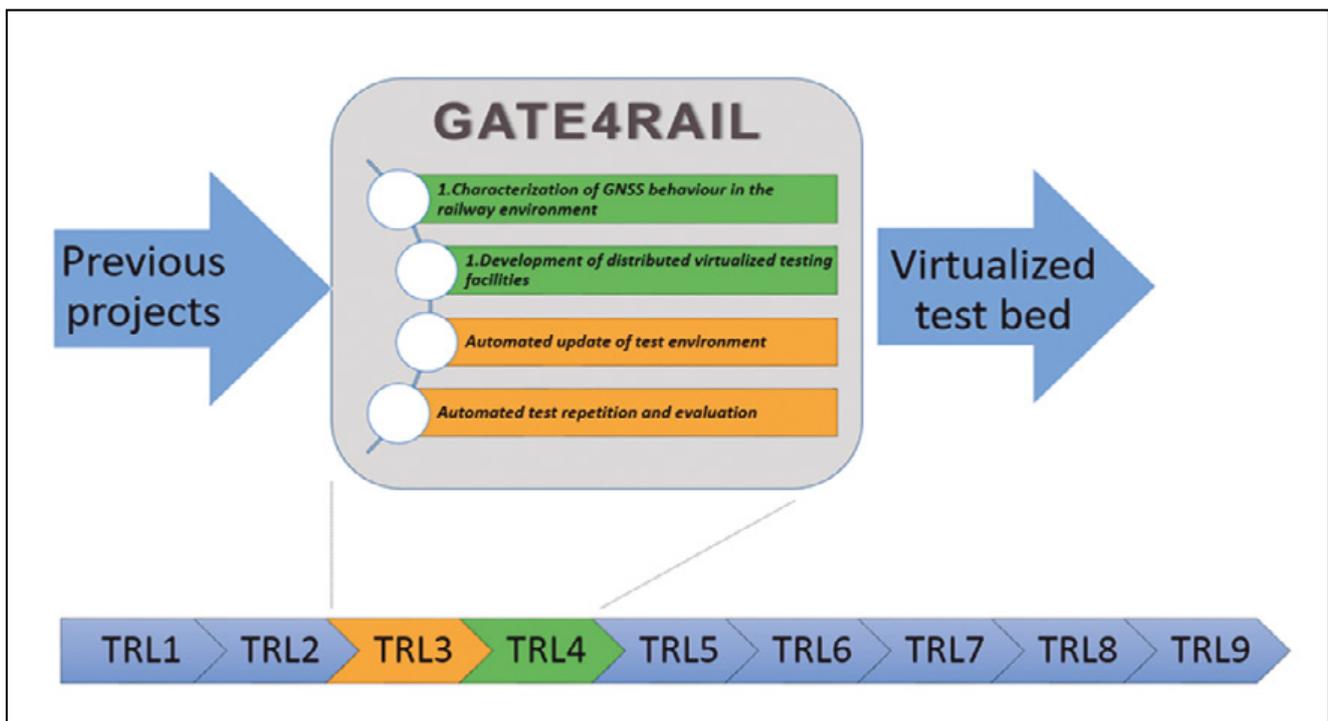


Figura 24. Objetivos del proyecto *GATE4Rail* (Fuente: web del proyecto) [10].

4. CONCLUSIONES

La aplicación de los sistemas de navegación por satélite, y en particular del sistema europeo Galileo a ERTMS, contribuirá a mejorar la seguridad del transporte ferroviario, al facilitar que se puedan desplegar soluciones de ERTMS de bajo coste en líneas regionales o de bajo tráfico con objeto de modernizar los sistemas de señalización existentes, contribuyendo a la implantación paulatina del ERTMS en toda la red ferroviaria europea.

Con la sustitución de gran número de balizas físicas por balizas virtuales, se reducirá la presencia de equipos en vía y, por tanto, las inversiones y los gastos de mantenimiento. Asimismo, se incrementará la disponibilidad y la fiabilidad del sistema pues se reducirán los fallos de dispositivos de vía.

La iniciativa *Shift2Rail* y la GSA siguen apostando por nuevos proyectos de investigación en este campo, uno de los cuales es el futuro proyecto *RailGAP* (*RAILway Ground truth and digital mAP*) perteneciente al programa H2020 de la GSA, que profundizará en el ámbito de la digitalización ferroviaria, y en el que participará el CEDEX.

El CEDEX, a través de su Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria, está comprometido con la aplicación de la tecnología GNSS al ERTMS, mediante su participación en distintos proyectos europeos de investigación como GRAIL, ERSAT-GGC, *GATE4Rail* y el futuro *RailGAP*, y apuesta por preparar los laboratorios de ensayo para probar los futuros equipos y líneas ERTMS que integren el uso del GNSS.

5. AGRADECIMIENTOS

A la GSA, a *Shift2Rail* y a todos los socios participantes en los proyectos ERSAT-GGC y *GATE4Rail*, y en especial a los socios españoles ADIF e INECO.

El proyecto ERSAT-GGC está financiado por la GSA (Grant Agreement 776039).

El proyecto *GATE4Rail* está financiado por *Shift2Rail* (Grant Agreement 826324).

6. REFERENCIAS

- [1] *Work Plan 2020 of the European Coordinator for ERTMS*. <https://www.era.europa.eu>
- [2] *ERA Report on ERTMS long term perspective (2015)*
- [3] *Report on Rail User Needs and Requirements-revision 2.0 (July 2019)*. <https://www.gsa.europa.eu>
- [4] *ERSAT-GGC D2.1 Enhanced Functional ERTMS Architecture*
- [5] *ERSAT-GGC D4.5 Process Execution Report*
- [6] Web proyecto ERSAT-GGC: <http://www.ersat-ggc.eu>
- [7] *GATE4RAIL D2.1 Railway Scenarios and Requirements*
- [8] *GATE4RAIL D2.2 Railway and GNSS Test Cases*
- [9] *GATE4RAIL D4.1 Geo-distributed Simulation and Verification Infrastructure Modules and Interfaces functional and Operational Requirements*
- [10] Web proyecto *GATE4Rail*: <http://gate4rail.eu/>