

Recorrido y numeración de los trenes. Interoperabilidad mediante análisis espacial tridimensional e INSPIRE

Path and train numbering. Interoperability using spatial analysis and INSPIRE

José Gómez Castaño ^{1,2}

¹ Especialista SIG en el Grupo de Astronomía Extragaláctica e Instrumentación Astronómica, Departamento de Astrofísica y CC de la Atmósfera. UCM jgomez03@pdi.ucm.es

² Dirección de Gestión de Red ADIF jgomezc@adif.es

Resumen

En este trabajo se presenta una metodología que permite asociar las diferentes numeraciones a un recorrido o parte del mismo, y conocer las relaciones entre ellos, de forma que sean interoperables. El resultado es la posibilidad de conocer la numeración asociada a un tren y para cada tramo de su recorrido, los puntos comunes o diferentes designaciones que tiene para las diferentes organizaciones.

Para ello, se pone en práctica un análisis tridimensional de la posición del tren, integrando la información de su recorrido y su horario en la misma geometría espacio-temporal. Se estudian los diferentes formatos de datos para intercambiar la información y los servicios OGC disponibles para ello.

Debido al creciente número de Empresas Ferroviarias y Administradores de la Infraestructura que intervienen en las operaciones ferroviarias en Europa, la forma de designar a los trenes presenta diferencias de una organización a otra y de un Estado a otro. De esta manera, se pueden encontrar diferentes designaciones para un mismo tren dependiendo del uso que se le da a la misma, lo que hace necesario encontrar una metodología común que permita conocer la equivalencia entre ellos.

Un elemento básico del tren es su recorrido. Este se compone del conjunto de puntos que va recorriendo de forma secuencial, desde su origen hasta su destino. Un mismo recorrido puede tener diferentes designaciones, e incluso cada tramo de su recorrido puede ser conocido de diferente manera por cada organización. Existe normativa que indica como llevar a cabo la denominación de los trenes a nivel Nacional y Europeo, pero no un procedimiento estandarizado de conversión entre las diferentes denominaciones.

El uso de la vertiente geoespacial a los datos en la operación ferroviaria es un nuevo campo abierto recientemente. Estos permiten optimizar los procesos de toma de decisión y hacerlos más ágiles frente a las soluciones tradicionales, complementando a los datos alfanuméricos, e incorporando nuevas capacidades de análisis y mejorando los procesos ya existentes.

INSPIRE y su ANEXO I de aplicación a redes de transporte, ofrece un marco de referencia para los fenómenos geográficos, de forma que sea posible definirlos de forma común en toda la Unión Europea, junto a la iniciativa RINF.

Palabras clave: Ferrocarril, GIS, INSPIRE, Interoperabilidad.

Abstract

In this paper an algorithm to solve train path and numbering interoperability is proposed. The most powerful tool to achieve this is a three-dimensional analysis of the train position, integrating information about its route and schedule in the same spacetime geometry. Also a study of the different data formats for exchanging information and OGC services available to do it, was carry out.

Due to the increasing number of Railway Undertakings and Infrastructure Managers involved in railway operations in Europe, how to designate the trains are different from one organization to another and from one state to another. Thus, one can find different designations for the same train depending on the use that is of the same, to find a common methodology to meet the equivalence between them is necessary.

A staple of the train is its route or path. This consists of the set of points where the train moves through sequentially, from its origin to its destination. The same route can be designed differently, and even each route section of their journey can be known differently by each organization and several trains can be merged to be identified by another organization.

The use of geospatial data over rail operation is a new recently open target. These allow to optimize decision making processes and make them more flexible compared to traditional solutions, complementing alphanumeric data, and incorporating new analysis capabilities and improving existing processes.

INSPIRE ANNEX I and its application to transportation networks, provides a framework for geographic features, so that it is possible to define a common way across the European Union, along with the RINF initiative.

The spatial databases are specialized in this type of data and are proving increasingly harder, as a powerful tool for the use of these data in the railway operation. In this work a methodology to associate different numbering a path or part thereof, and knowing the relationships between them, and an interoperable result is presented. The result allows to know the numbers associated with a train for each segment of its route within each organization that manages it and their relations with others.

Keywords: Railway, GIS, INSPIRE, Interoperability, SFSQL, Spatial Analysis.

1. Introducción

Tras la liberalización del transporte ferroviario en Europa, han aparecido gran cantidad de Empresas Ferroviarias y Administradores de la Infraestructura, cada uno de ellos con unos procedimientos de trabajo propios. La generalización del tráfico transfronterizo y la necesidad de integración en los diferentes sistemas de gestión de cada organización, hace necesario tener procesos que permitan la interoperabilidad entre Estados y Organizaciones.

La numeración de los trenes es una información básica y ha sido abordada por el TAF/TAP-TSI Working Group 10 TAF/TAP-TSI (2011a). Esta se utiliza para identificar cada tren y asociarle los atributos necesarios en cada organización. Disponer de una identificación única para todas las organizaciones que intervienen en la gestión del tren, o al menos un sistema de conversión fiable entre ellos, es indispensable.

El esquema de numeración en uso en Europa se describe en las fichas UIC 419-1 y 419-2, y la comunicación entre Administradores de la Infraestructura y Empresas Ferroviarias se describe en los interfaces del TAF/TAP-TSI (2011b). En España la numeración de los trenes, a efectos de gestión de tráfico, está descrito en el Manual número 21

En España se regulan más de 1,852,000 trenes al año, a lo largo de 15333 Km de red ferroviaria (ADIF 2013) Existen 24 Empresas Ferroviarias y 3 Administradores de la Infraestructura, cada uno con sus procedimientos nacionales. Además se tiene la conexión internacional con Portugal y Francia. Como referencia para este trabajo, se ha aplicado la resolución al ámbito Español, pero es exportable a los Estados de toda la Unión. A nivel Europeo los 14 Administradores de la Infraestructura más importantes pertenecientes a 11 países, se agrupan en la European Rail Infrastructure Managers (EIM 2014).

Aún con esta normativa se plantea que cada organización utiliza una numeración diferente para la identificación de las circulaciones. Esta, además, puede o no corresponderse con el recorrido completo del tren, o tener varias numeraciones dependiendo de la organización. Incluso dentro del mismo Estado, un tren es conocido de forma diferente por los procesos comerciales que por los de gestión de tráfico. Uno para circulación y otro diferente para la gestión comercial.

Tradicionalmente se utilizan bases de datos con tipos de datos alfanuméricos para relacionar estas designaciones, y además del número, se dispone del recorrido del tren respecto a cada numeración. El uso de bases de datos espaciales está optimizado para el tratamiento de datos de tipo geográfico y se pueden utilizar para mejorar su tratamiento. Dado que la mayoría de gestores de bases de datos relacionales, disponen en la actualidad de extensiones espaciales, su aplicación a la resolución de este tipo de problemas presenta grandes ventajas.

En este trabajo se muestra una metodología que resuelve la relación entre las numeraciones de los trenes y su recorrido, tratado desde el punto de vista espacial y usando la especificación proporcionada por INSPIRE, y otras iniciativas, en el ámbito Europeo. Esto permite la interoperabilidad de los datos de tráfico y características de un tren, tanto a nivel de circulación como comercial. El uso de estándares de servicios propuestos por el Open Geospatial Consortium (OGC), permite la interoperabilidad de las comunicaciones y los formatos de datos, en el ámbito geográfico.

El objetivo final es conseguir la identificación de los trenes en cada parte del recorrido usando cualquier numeración.

2. Descripción de la problemática

El problema que se quiere resolver es la posibilidad de nombrar a un mismo tren con diferentes identificaciones, y encontrar una forma de encontrar la relación entre ellas. La identificación puede referirse

a todo el recorrido del tren o tener diferentes para distintos trayectos de su recorrido. Esto se produce cuando se fusionan ramas de dos trenes en uno solo para compartir parte del recorrido, o cuando se separan en un punto determinado. Conocer esta equivalencia permite la interoperabilidad entre diferentes organizaciones y facilitar las operaciones a lo largo del recorrido del tren.

Actualmente se utilizan bases de datos relacionales con atributos alfanumericos para identificar el tren, las estaciones de paso y las horas de paso por ellas. Con esta informacion se calculan los puntos comunes entre los trenes.

3. Elementos implicados

A continuación se describen los elementos implicados en la solución del problema. A ellos hay que añadir requisitos impuestos por el propio entorno ferroviario. La solución debe poder implementarse en los Sistemas de Información actuales con el mínimo impacto posible y tener el mínimo coste posible

3.1. Recorrido de los trenes

El otro elemento en juego es el recorrido propio del tren. Este se compone del paso del tren por cada una de las estaciones. Cada tren tiene definido las estaciones por las que pasa y a qué hora lo hacen. El Administrador de la Infraestructura asigna este horario dependiendo de la capacidad de la infraestructura. Las Empresas Ferroviarias, lo siguen con sus trenes y publican sus horarios para que los conozca el resto de organizaciones o personas.

El proceso de cálculo de la ruta del tren se hace teniendo en cuenta el tipo de tren, el tipo de tracción, la orografía del recorrido, curvas, número de vías del trazado, número de paradas, existencia o no de viajeros, y los posibles cruces con otros trenes. Se pueden encontrar varios estudios detallados sobre este cálculo en Hansen, I. (2010). Estas planificaciones pueden mejorarse como se ha expuesto en Salido, M.A. et al (2008) o utilizando métodos estocásticos, analizados en Lüti (2005)

El resultado de esta planificación es una lista con el momento de entrada, salida o paso de un tren por cada estación o punto de interés de la red ferroviaria. Esta información no está georreferenciada y solo es útil a efectos de horario del tren para los maquinistas o personal que necesite conocer dónde estará el tren en cada momento.

Aunque la asignación de la capacidad de la infraestructura la hace el Administrador de la Infraestructura, las Empresas Ferroviarias y otras Empresas, la utilizan para sus propios trenes. Los trenes pueden fusionarse, separarse en ramas o ser nombrados por cada una de ellas.

3.2. Inspire

Dentro del Anexo I de INSPIRE (D2.8.I.7 2009 2009) podemos encontrar los siguientes fenómenos relacionados con el ferrocarril:

- Fenómenos de localizaciones - RailwayNode
- Fenómenos de tramos - RailwayLink
- Fenómenos de líneas - RailwayLine

Sus esquemas se definen en RailwayTransportNetwork.xsd

Las series temáticas de INSPIRE, como el ANEXO I están basadas en el Generic Conceptual Model que recoge las recomendaciones de la serie ISO 19100 sobre estándares de información geográfica. Además del modelo conceptual, proporciona mecanismos para la comunicación de los datos, a través del Generic Network Model. Estos incluyen:

- Mecanismos de interconexión de redes
- Referenciación de objetos para asegurar la reutilización de los objetos

Los recorridos de las circulaciones han sido, hasta ahora, tratados como meros atributos alfanuméricos, enumerando los puntos de paso en ciertos instantes. Aprovechando la nomenclatura INSPIRE, en este trabajo se define el TrainRailwayLine, como el fenómeno correspondiente al recorrido del tren. Estos se han transformado en objetos geoespaciales ya que se trata, en definitiva, de polilíneas compuestas por cada una de las geometrías que enlazan los diferentes nodos del recorrido. El recorrido se traduce en una polilínea desde el origen al destino. Este tratamiento no solo permite definir el recorrido de los trenes en el trayecto, sino que lo hace dentro de las estaciones si se han creado las geometrías dentro de las mismas definiendo las vías internas de la estación.

Además de trenes con planificación previa, existen trenes especiales. El recorrido de estos se hace siempre en función de otros planificados, adoptando lo que se conoce como marchas de asimilación. De esta forma se puede obtener el TrainRailwayLink de un tren especial usando el recorrido marcado para el de su tren asimilado.

Los tramos, por otra parte, se definen como segmentos entre dos puntos de una línea. Los puntos origen y destino de los mismos se referencian como puntos kilométricos sobre la misma. Para crear geometrías a partir de ellos, es necesario primero llevar a cabo una georreferenciación de estos. En un apartado más abajo se detalla el proceso, pero baste decir que cualquier proceso de segmentación dinámica, puede devolver la coordenada geográfica del origen y fin.

Una vez almacenados estas geometrías, es posible llevar a cabo sobre ellas cualquier consulta o tratamiento espacial, tanto dentro de la base de datos como con herramientas GIS. El más importante es conocer qué tramos afectados por alguna circunstancia, atravesará un tren.

En este caso tenemos que estudiar diferentes casos que se producen cuando parte o todo el recorrido de un tren, se comparte. Tenemos las siguientes posibilidades. Siendo RNo1 y RNo2 los RailwayNode origen para dos sistemas diferentes y RNd1 y RNd2 los RailwayNode destino, podemos encontrar los siguientes casos, descritos en la Fig 1

- a)** Los dos trenes comparten todo el recorrido
- b)** Los dos trenes tienen el mismo origen pero diferente destino
- c)** Los trenes tienen el mismo destino pero diferente origen
- d)** Los dos trenes tienen diferente origen y destino y solo comparten parte del recorrido

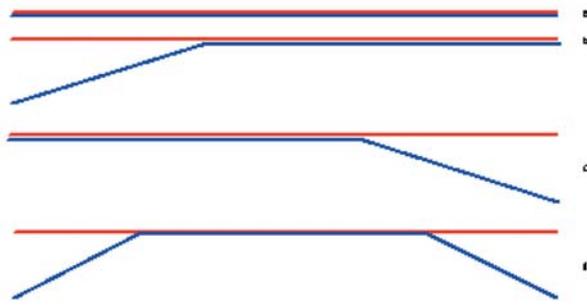


Fig 1 Posibles intersecciones de RailwayNodes

Se pueden tener otras configuraciones que combinen estos 4 casos, que conformen el recorrido completo de los trenes.

3.3. Georreferenciación de los elementos

Las estaciones por las que pasa cada tren están identificadas solo por un número o atributo alfanumérico. Para una misma organización, o dentro del mismo Estado existe un sistema de nomenclatura para las estaciones que identifica con un código alfanumérico. En Europa en la Directiva INSPIRE se define un RailwayNode como “A point spatial object which represents a significant point along the railway network or defines an intersection of railway tracks used to describe its connectivity”. En Europa, la iniciativa RINF (2011) está recopilando toda la información sobre infraestructuras, incluidas las posiciones geográficas. En esta se definen los Operational Points y los Station Code. Existe una correspondencia entre la codificación INSPIRE y RINF, que se describe en el Anexo H de ERA (2010). De esta forma, se unifica el uso de fuentes geográficas en el ferrocarril europeo. En relación con INSPIRE y su ANEXO I, la identificación de cada fenómeno debe cumplir las siguientes condiciones:

- La identificación debe ser única para todas las Infraestructuras Espaciales de Europa
- Debe ser trazable en esta Infraestructura
- Debe estar documentado el ciclo de vida de cada objeto

Se ha optado en este trabajo por esta normativa porque ofrece una fuente común y abierta de datos actualizada y mantenida por organismos que velan por su calidad.

Una vez localizados cada punto del recorrido del tren, se puede hacer la correspondencia entre ellos y las horas de entrada, salida o paso por cada uno, obteniendo una lista georreferenciada de su recorrido.

Para esto es necesario un sistema adicional que proporcione su georreferenciación. Para que la información de horario sea útil a efectos geográficos es necesario georreferenciar el paso del tren por cada punto. Para ello se necesita conocer las posiciones de cada estación. En Europa la cada Estado dispone de su Organismo encargado de la localización geográfica de sus infraestructuras. Como se ha dicho, mediante INSPIRE o RINF que marcan el un marco de referencia en que debe hacerse.

En España, por ejemplo, el Instituto Geográfico Nacional se encarga de recopilar esta información en diferentes bases de datos. La correspondiente a transporte ferroviario se encuentra en la Base Topográfica Nacional 1:25.000, a partir de la que se genera el Mapa Topográfico Nacional 1:25.000. Esta es una escala más que suficiente para el propósito de este trabajo, y los datos son proporcionados de acuerdo al esquema de transportes de INSPIRE.

En caso necesario, la información más actualizada sobre las posiciones de las instalaciones ferroviarias las pueden proporcionar los propios Administradores de la Infraestructura. En España es IDEAdif quien recopila toda la información geográfica relacionada con líneas ferroviarias. Existe también la ley LISIGE que impone el uso de la Directiva INSPIRE para todos los datos geográficos, incluidos los ferroviarios, lo que obliga a las Empresas Ferroviarias y Administradores de la Infraestructura españoles a normalizar y unificar las fuentes de datos en este sentido.

4. Arquitectura del sistema

El algoritmo propuesto se implementa en un sistema que integra las siguientes partes:

- Servidor de bases de datos espacial PostGIS
- Sistema de planificación de tráfico
- Sistema de gestión de tráfico
- Sistema de georreferenciación o geocoding
- Aplicación de análisis

El recorrido previsto de los trenes llega desde los sistemas de planificación de tráfico, de las de los sistemas de tiempo real de gestión, de las bases de datos de gestión o de cualquier otro entorno en el que se necesite integrar la información. Para encauzar esta información se utilizan diferentes sistemas, desde mensajería basada en Servicios Web y conexiones JMS, hasta el intercambio de ficheros entre las organizaciones involucradas.

La parte más importante en la que se apoya esta solución son las bases de datos espaciales. Los gestores de bases de datos tradicionales han ido incorporando paulatinamente extensiones que permiten almacenar en elementos geográficos como puntos, líneas, polígonos y hasta imágenes raster. Este modelo se describe mediante el diagrama UML de la Fig 2 aplicando OGC 1999. Una lista de los gestores de bases de datos que implementan extensiones espaciales se puede consultar en OGC (OGC DB List 2014).

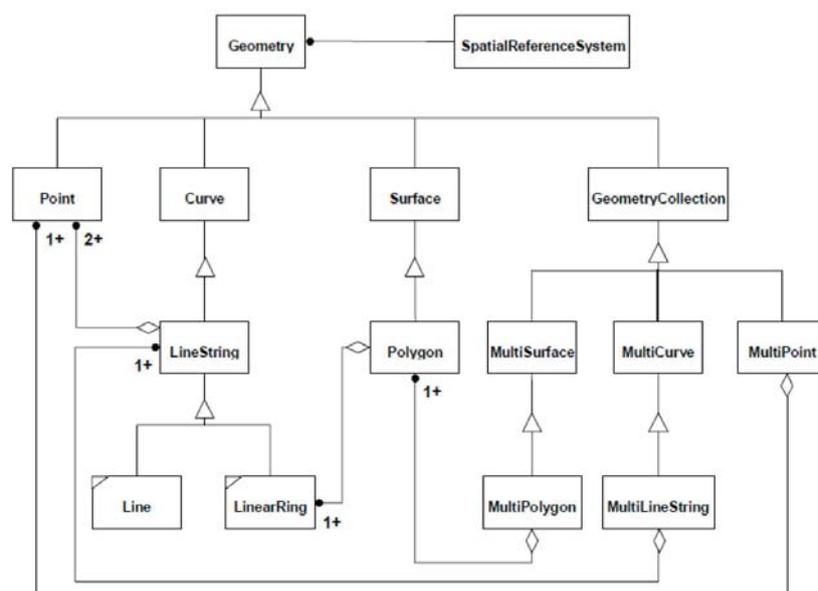


Fig 2. Modelo Simple Features Specification For SQL Revision 1.1

Este software no solo proporciona un almacén de datos, sino que ofrece una serie de funciones para el análisis de los datos espaciales. Como se explicará en el apartado siguiente, estas permiten tratar estos datos de forma geométrica calculando intersecciones, longitudes, solapamientos, transformaciones de coordenadas etc

En este trabajo se ha estudiado también el procedimiento de actualización de los datos utilizados. El recorrido de los trenes se obtiene de los sistemas de planificación y gestión de tráfico, y los proporciona el Administrador de la Infraestructura, como se ha dicho. Su actualización está sujeta a los acuerdos entre las empresas implicadas, y pueden hacerse utilizando sistemas que van desde el envío de ficheros por correo electrónico, intercambio mediante servicios FTP, Servicios Web o mensajería JMS.

Para la actualización de datos geográficos, INSPIRE describe los servicios necesarios. El servicio WFS (Web Feature Service) es el más adecuado (OGC 2010). Este servicio permite la publicación mediante un interfaz de servicios web los fenómenos. En Gómez Castaño 2010, se ha descrito detalladamente el conjunto de servicios a implementar en una IDE Ferroviaria, para la publicación y consumo de esta información. La mayoría de Agencias geográficas Europeas disponen de estos servicios. En concreto el Instituto Geográfico Nacional dispone de una lista (IGN 2014) de las URL con estos servicios. Un ejemplo de petición WFS se muestra abajo

```
http://example.com/wfs?service=WFSSIMPLE&version=1.0.0&REQUEST=GetFeature
&BBOX=-71.00,42.00,-72.00,43.00&
MINDATE=2006-09-12&MAXDATE=2006-09-22&OUTPUTFORMAT=text/xml
```

Esta petición es fácil de implementar en cualquier lenguaje y devuelve la lista de los fenómenos dentro del Bounding Box requerido en formato GML (OGC 2012). GML es un estandar ISO 19136:2007, es una gramática derivada de XML para la representación de fenómenos geográficos, ampliamente utilizado para el intercambio de este tipo de datos a través de internet.

```
<Stations xmlns = "http://www.railwayscompany.org"
  xmlns:gml = "http://www.opengis.net/gml"
  xmlns:xsi = "http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:schemaLocation = "http://www.railwayscompany.org stations.xsd ">
  <items>
    <Item>
      <name> Las Matas </ name>
      <position>
        <gml: Point srsDimension="2" rsName="http://www.opengis.net/def/crs/EPSSG/0/25830">
          <gml: pos> 424073.7072 4489453.1563 </gml: pos>
        </gml: Point>
      </position>
    </Item>
  </items>
</Stations>
```

Ejemplo de posición GML

De esta forma se puede actualizar esta información con la aparición de nuevos puntos de paso de los trenes. Para la gestión de estas peticiones se ha utilizado el software QGIS en la versión 2,4. Para este trabajo se ha desarrollado un script en Python que permite buscar los fenómenos descritos para la capa de transportes de la Infraestructura de Datos Espaciales de España, y los actualiza en la base de datos PostGIS.

5. Solución Aportada

En este trabajo se aporta una solución basada en el análisis espacial del recorrido del tren. Parte ha sido estudiado anteriormente en (Gómez Castaño, J. 2013) Como se ha explicado más arriba, uniendo los RailwayNodes que atraviesa el tren se construye una geometría que representa en un solo fenómeno geográfico todo su recorrido. De esta forma se define la geometría TrainRailwayLink como un conjunto de RailwayLinks (D2.8.I.7 2009) que recorre el tren. En este fenómeno queda descrito no solo el conjunto de los RailwayNode, también al espacio situado entre ellos. Este tratamiento es útil cuando queremos estudiar elementos que afectan a cualquier parte del su recorrido, pero en este caso solo nos interesan algunos de esos puntos, las estaciones por las que pasa. Uniendo estas estaciones componemos un grafo.

El tratamiento de la ruta de ferrocarril como un grafo en sí mismo ha sido tratado con anterioridad en (Roanes 2008, 2009). El estudio ha sido desde el punto de vista algebraico, usando la teoría de grafos con el objetivo de estudios históricos.

En este trabajo se hace una composición de las dos visiones. Por una parte se construye el recorrido de los trenes como un grafo, en el que los nodos están definidos por las posiciones geográficas de los RailwayNodes que recorre. Las aristas en este caso, pasan a ser rectas entre los nodos, despreciándose la geometría de los RailwayLinks.

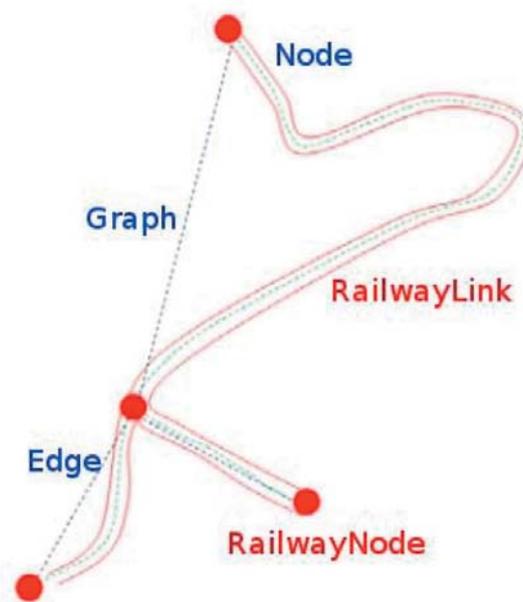


Fig 3. Relación entre grafos y fenómenos INSPIRE

El recorrido que nos interesa es el común para dos trenes y entre dos RailwayNodes, si el tren es el mismo, el RailwayLink correspondiente es el mismo siempre Fig XX. Por lo tanto su geometría completa no es necesaria para el estudio. Solo los RailwayNode, que son los extremos del RailwayLink, tienen interés. Desde el punto de vista topológico, un camino recto para enlazar dos RailwayNodes es la mejor

solución. El usar líneas rectas permite reducir el número de puntos a tener en cuenta en la geometría final, reduciéndose también la necesidad de almacenamiento en la base de datos y el tiempo de computación

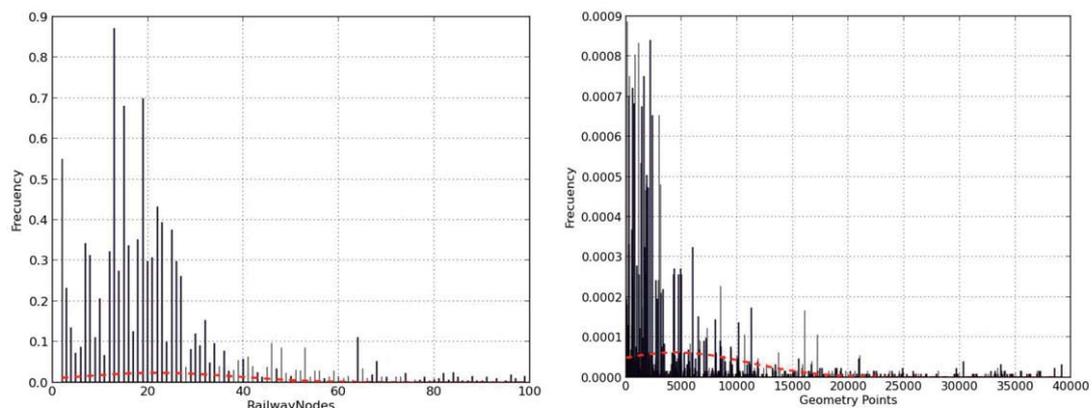


Fig 4. Histogramas de distribución de a) RailwayNodes y b) puntos de la geometría que componene los fenómenos RailwayLinks

En la Fig 4 se ha comparado el número de puntos necesarios para construir el recorrido del tren usando RailwayNodes (a) o puntos de la geometría del Linestring correspondiente (b). En cualquier caso la densidad de puntos del LinsString depende de la calidad de la geometría capturada. En el primer caso se necesita almacenar menos de 40 puntos en la mayoría de los casos, en contraposición a los casi 5000 si tuviéramos en cuenta toda la geometría. Mediante esta simplificación se consigue aumentar por un factor de 100 la capacidad de almacenamiento y de proceso.

Los histogramas se han calculado teniendo en cuenta todos los recorridos de los trenes estudiados, las estaciones de parada y paso y la geometría publicada

Teniendo definidos los grafos de todos los trenes a estudiar, los recorridos comunes, y por tanto que corresponden al mismo tren físico, quedará definido por el grafo intersección resultante. El problema se reduce ahora en conocer cuales son los grafos que comparten alguna de sus aristas. Se han tenido en cuenta varios métodos. La teoría de grafos, el uso de bases de datos de grafos y el análisis espacial

La primera es usando la teoría de grafos. La condición de intersección utilizada se describe Nandy 2012. Considerando la distribución R^d de objetos, la intersección geométrica de los grafos $G(V,E)$ es un nuevo grafo de forma que

- Cada nodo en V corresponde a un objeto distinto
- Cada par de nodos hay un eje $v_i, v_j \in V$ hay un eje $v_{ij} \in E$

Otra solución es utilizar una base de datos de grafos (VicKnair et al 2010) aunque en este trabajo no se ha puesto en práctica. Estas bases de datos ofrecen un alto rendimiento, y utilizan un lenguaje de consultas sin sentencias SQL

Aunque se dispone de muchos algoritmos que pueden implementar estas soluciones, no están soportados en las bases de datos actualmente en explotación en los sistemas de información ferroviaria. Se requiere por lo tanto una adaptación de estas o instalaciones expresamente diseñadas . Por lo tanto, se ha buscado que la solución pueda ser aplicada a otros ámbitos del recorrido de los trenes, incluyendo las geometrías intermedias, y estas no se ven reflejadas por un segmento, sino por una polilínea.

Por estos motivos, en este trabajo se ha optado por una solución basada en el análisis espacial de los fenómenos geográficos implicados. Como se ha explicado en el apartado anterior, cada RailwayNode queda definido por su código de identificación y sus coordenadas, uniéndose los consecutivos. Para construir el grafo de cada tren, es necesario tener en cuenta no solo el recorrido, también su horario. Si no tenemos esto en cuenta, la intersección contendrá todos los trenes y no solo los que comparten recorrido y horario, como se explicará ahora.

La condición final para que un tramo sea compartido por dos trenes es que sus geometrías estén contenidas una en la otra. Como hemos construido una LineString con todo el recorrido (TrainRailwayLink) junto al horario, llamamos LineString1 y LineString2 a cada uno de los trenes. Se debe cumplir la condición

$$LineString_1, LineString_2 \Rightarrow \exists LineString_3 \mid LineString_3 = LineString_1 \cap LineString_2 \quad EQ.1$$

El conjunto de puntos pertenecientes a LineString3 serán los nodos comunes por los que pasan los dos trenes

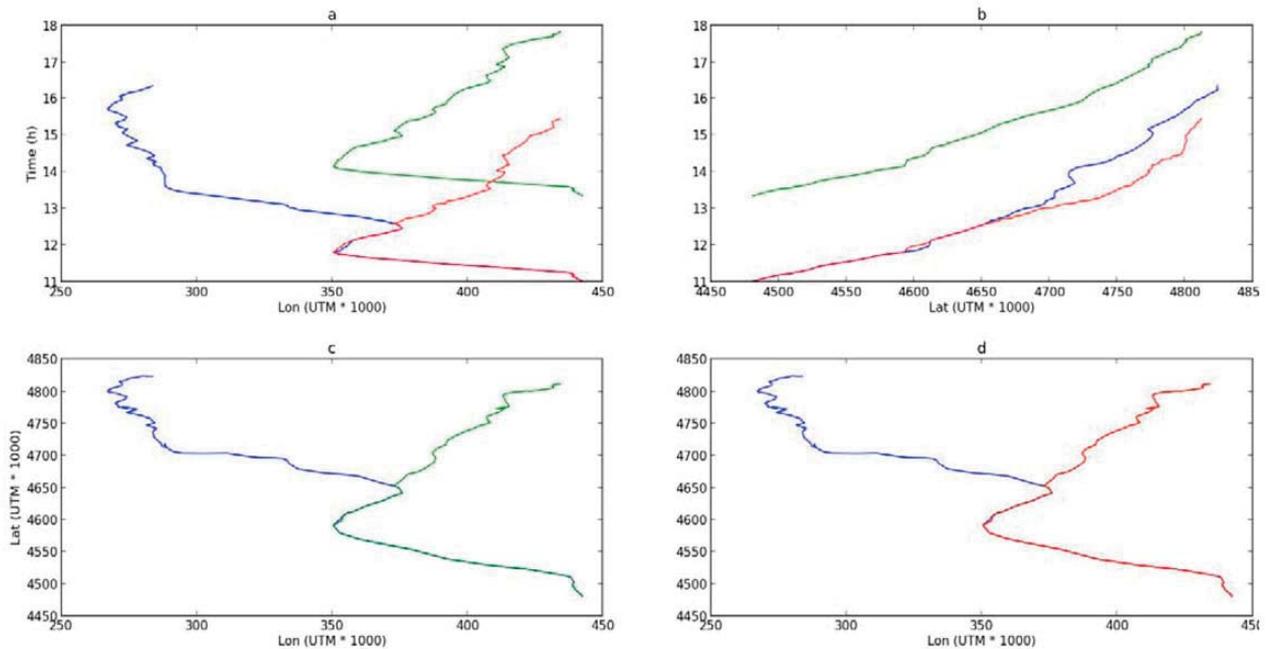


Fig 5. Representación 2D de los TrainRailwayLink

El resultado se observa mejor al hacer una proyección 2D en la Fig 5. Se han calculado los RailwayLnk, de acuerdo a lo explicado, para 3 trenes. a) y b) representan el recorrido de los tres trenes en longitud y latitud a lo largo del tiempo. c) y d) muestran el recorrido teniendo en cuenta solo el recorrido geográfico en longitud y latitud.

Si tenemos en cuenta solo el recorrido de cada tren, (c y d), resultaría que los trenes comparten parte del recorrido. Esto es debido a que cada uno tiene un horario diferente y no lo hemos tenido en cuenta. Cuando añadimos el estudio del horario y lo representamos respecto a su posición (a y b), solo los trenes 000A y 000C tienen un tramo común. Por lo tanto es obligatorio tener este factor en cuenta a la hora de crear los TrainRailwayLink. Se necesita una componente adicional además de la componente geográfica.

Para solucionar esto se ha utilizado la coordenada Z de cada RailwayNode para almacenar el momento de entrada, salida o paso en el mismo, excepto para el primero que se toma la hora de salida. En todos los casos en horas a lo largo del día y se toman 5 decimales de precisión. De esta forma cada RailwayNode se define para cada tren con las siguientes coordenadas:

- X Longitud
- Y Latitud
- Z Hora de entrada, salida o paso

De esta manera, cada punto de paso queda definido de la forma POINT(longitude latitude time) por ejemplo POINT(442231.0278 4480617.1122 11.01666)

La geometría resultante de unir los nodos del grafo, representa una geometría tridimensional, Fig 6. Como puede verse, el recorrido del tren cambia en longitud, latitud y hora, representándolo tridimensionalmente desde el origen al destino. El TrainRailwayLink es ahora un fenómeno sobre el que se puede calcular su intersección con el resto de forma unívoca, teniendo el horario del mismo en cuenta.

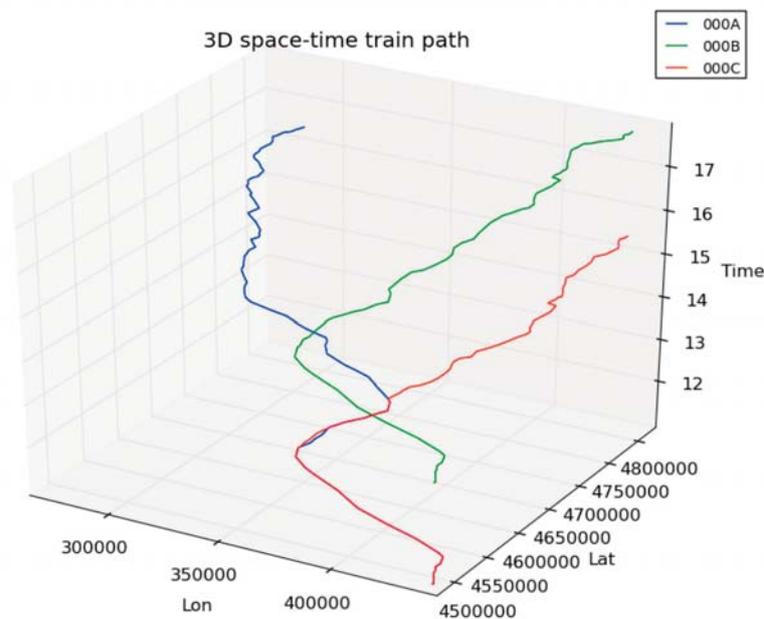


Fig 6. Representación 3D espaciotemporal del recorrido de los trenes

El resultado final es un nuevo fenómeno intersección de acuerdo a la ecuación de condición (eq 1). Este fenómeno estará compuesto por los puntos comunes entre los TrainRailwayLink comunes. Los atributos derivados de ella serán una lista con los números de tren y sus respectivas organizaciones, que se obtiene mediante una consulta SFSQL a la base de datos donde se almacenan. Además se obtiene la lista de los RailwayNodes comunes por los que pasa el tren. Esto último es importante porque el resultado contiene la identificación de los RailwayNodes comunes, para poder tratarlos en cualquier otro procedimiento

Una ventaja de esta solución es que no es necesario conocer la topología de la red para utilizarla. Publicar los cambios en la topología por parte de los Administradores de la Infraestructura y su mantenimiento por parte del resto de empresas, es un proceso complejo y laborioso, que requiere una infraestructura de

comunicaciones dedicada. Tampoco es necesario mantener un versionado de los RailwayNodes. La información de cada uno es válida para esta solución durante el tiempo que está en vigor, porque el TrainRailwayLink autocontiene la geometría y horario de todo el tren en vigor.

Para el cálculo de la marcha del tren, si es necesario conocer las características de la vía, sus radios de curvatura, pendientes etc, pero solo para la publicación de la marcha del tren. Una vez calculado, solo nos interesa los puntos de paso y no la relación de estos con el resto de la red.

6. Ejemplo de solución

Se propone un supuesto en el que tenemos 3525 trenes, de los que se ha tomado su recorrido por toda la red ferroviaria española. Se ha obtenido el momento y nombre de la estación de paso a partir de los datos publicados por RENFE en su página web de horarios. Se ha simulado una segunda organización, para lo que se ha partido del horario de los trenes de RENFE y se ha calculado un subconjunto, modificando el número de cada uno de ellos y su recorrido. Se ha desarrollado un script que genera los nuevos trenes de esta organización de acuerdo a:

- Cambiar número de tren
- Identificar los códigos de estación con su identificación posterior geográfica
- Georreferenciar el recorrido
- Almacenar los fenómenos

Disponemos también de la información geográfica de los RailwayNode proporcionada por el IGN e IDEAdif. Esta se proporciona en formato Shapefile y se ha almacenado previamente en la base de datos espacial. Se han tenido en cuenta 3068 localizaciones almacenadas en la base de datos de topónimos de estaciones, en el formato EPSG25830:

“LAS MATAS”;”POINT(424073.7072 4489453.1563)”

Al descargar los recorridos de los trenes se ha encontrado el problema de que las estaciones se encuentran identificadas con su nombre y estos no se corresponden con los recogidos en la base de topónimos. Esto se debe a que los nombres no están normalizados. Por ejemplo tenemos Madrid CH para referirse a Madrid-Chamartín.

Se ha implementado un proceso para encontrar una correspondencia entre su nombre y su identificación, Para esto se ha utilizado el algoritmo expuesto en Gómez Castaño, J. 2014, basado en indexación semántica, buscando la correspondencia de cada nombre de estación con los topónimos que aparecen en la base de datos de RailwayNode. Después de encontradas las coincidencias, todavía quedan estaciones sin identificar, y se ha llevado a cabo una labor manual para su localización.

Partimos del recorrido de un tren para una organización y generamos la secuencia de los puntos de paso. Usando el esquema descrito en el Anexo I de la Directiva INSPIRE, el recorrido se convierte en una secuencia de RailwayNodes, un RailwayLink. Como se ha indicado arriba, la coordenada Z almacena la hora de entrada, salida o paso por la estación El resultado es una Linestring que almacenamos en una tabla TrainRailwayLink definida por los siguientes campos

Gid	Identificador único
numTrain	Número del tren
organization	Organización a la que pertenece el número de tren
geom	Geometría del grafo como Linestring

El campo geom almacena los linestring en el formato LINESTRING(lon1 lat1 time1, lon2 lat2 time2,....., LONn LATn TIMEn)

Un ejemplo de para la generación de cada nodo se utiliza una SFSQL como la siguiente

```
select B."gid",A."codEst", A."horaLlegada", ST_AsText(B."geom")  
from public."pasos" as A  
inner join public."dependencias_v13" as B on B."cod_depend" = A."codEst"  
where A."numTren" = '04133'
```

El resultado es que para cada número de tren tenemos un recorrido compuesto por un grafo en el que sus aristas son rectas y sus nodos las posiciones geográficas de las estaciones que recorre junto a su horario

En este trabajo se ha optado por utilizar la información almacenada en la base de datos e interrogada mediante SFSQL [SFSQL OGC] Fig 7.

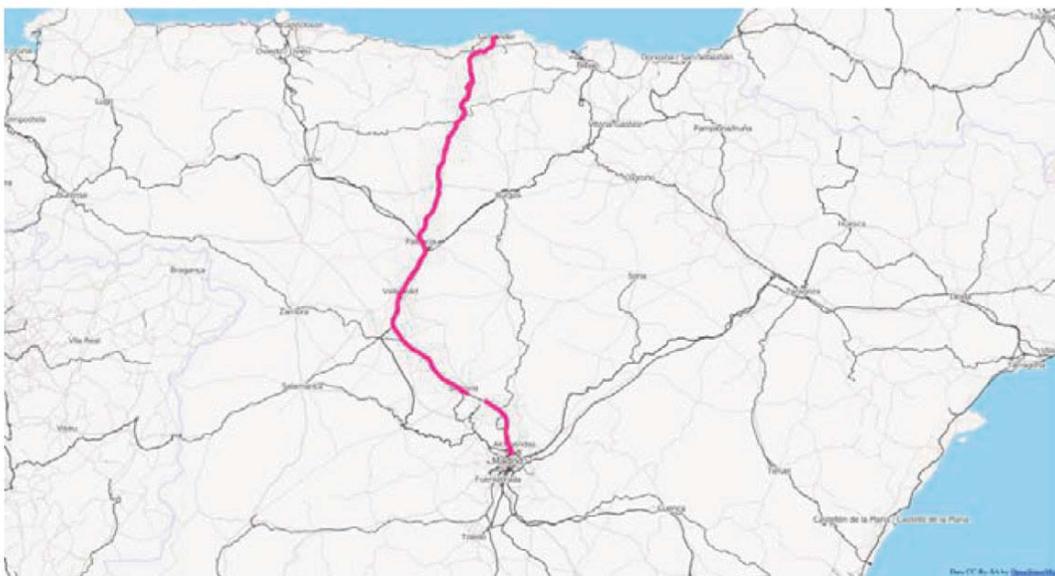


Fig 7. Fenómeno TrainRailwayLink como resultado de la consulta SFSQL

Una vez georreferenciado el recorrido espacio-temporal y almacenado en la base de datos espacial, queda unívocamente relacionado el número, su recorrido y la organización que lo referencia.

El resultado de los números de tren y organización a la que pertenecen, que comparten todo o parte de su recorrido será devuelto por el conjunto de grafos que intersectan su recorrido. Utilizando una consulta SFSQL a la base de datos espacial será fácil conocerlos. Esta consulta implementa la condición representada por la Ecuación EQ1

```
select B."numTren", B."organization" from public."trainRailwayLink" as B  
where ST_Intersects(b."geom",  
    (Select A.geom from public."trainRailwayLink" as A  
    where A."numTren" = 'XXXX')  
)
```

Una vez conocidas las identificaciones asociadas, podemos conocer los tramos comunes entre ellas mediante

```
select ST_Intersection(b."geom",  
    (Select A.geom from public."trainRailwayLink" as A  
    where A."numTren" = '04133')  
    ) as intersection  
from public."trainRailwayLink" as B  
where B."numTren" = 'XXXX'
```

Como resultado se obtiene la geometría de la intersección

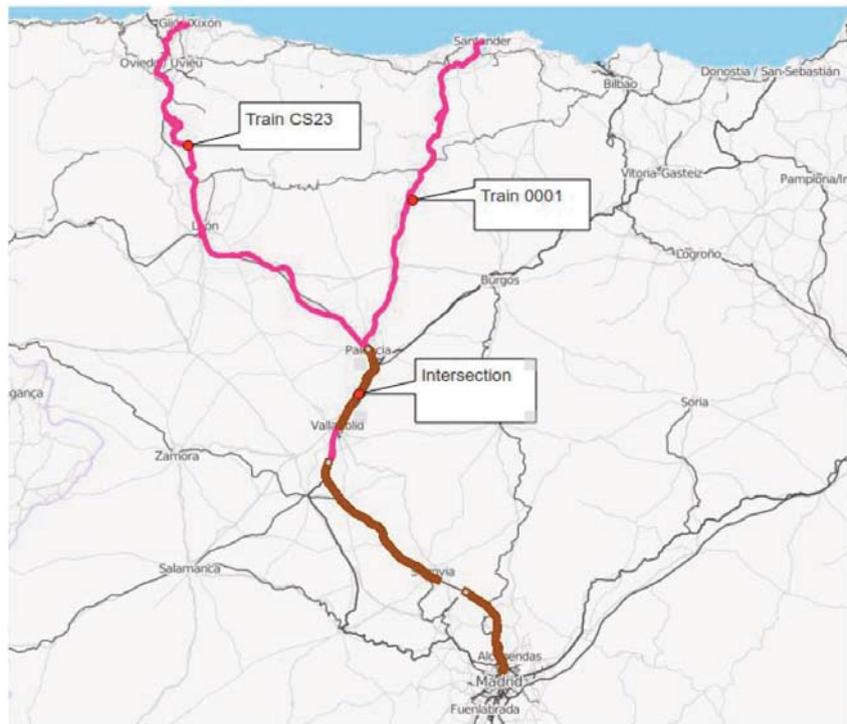


Fig 8. Grafo de los trenes y de su intersección

En la FigXX se muestra el resultado, en rosa, cada uno de los recorridos de los trenes 000A y 000C, y en marrón, el tramo con recorrido común pero numeración compartida. Una vez conocida la geometría del grafo de intersección, se puede obtener el conjunto de RailwayNodes que componen los nodos del mismo. Para cada uno de ellos, el número de tren será compuesto, dependiendo de la Organización a la que se refiera la consulta

```
select * from public."dependencias_v13" as C  
where ST_Intersects(  
    (select  
        ST_Intersection(b."geom",  
            (Select A.geom from public."trainRailwayLink" as A  
            where A."numTren" = '04133')  
        )
```

```
as the_geom  
from public."trainRailwayLink" as B  
where B."numTren" = '04111'  
,ST_SetSRID(C."geom",25830))
```

7. Herramientas utilizadas y rendimiento

Para llevar a cabo el análisis se ha utilizado una base de datos PostGIS 2.0 y lenguaje Python para la programación. También es posible el uso de otros lenguajes que pueden interactuar con el gestor de base de datos. Como ejemplo, se dispone de la librería JTS que hace posible el análisis espacial en Java Fig 9. La integración con cualquier infraestructura de Sistemas de Información Ferroviaria es inmediata.

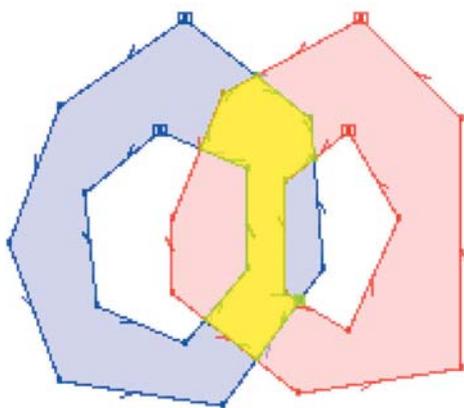


Fig 9. Intersección de geometrías utilizando la librería JTS

Los datos de recorrido de los trenes se han obtenido desde la web de RENFE y las posiciones de las estaciones de IDEAdif y el Instituto Geográfico Nacional.

El equipo utilizado es un portátil HP Probook 4540 con 4 GB de RAM, y procesador Intel i5. El tiempo medio de creación de un objeto espacial de tipo TrainRailwayLine, a partir de sus datos de circulación, es de 22 milisegundos +/- 3. Esto permite su uso para cálculos en tiempo real y no necesitar a otros de tipo Batch. El tiempo medio de consulta de un tren contra los 3557 TrainRailwayLine de la tabla es de 0,375 segundos +/- 0,015. Si la consulta se hace sobre la geometría completa de cada fenómeno, el tiempo se multiplica por un factor de 100.

Para analizar el resultados de las consultas de forma gráfica, se ha utilizado el software QGIS (QGIS 2014) en su versión 2,4 Se ha utilizado para representar los diferentes fenómenos. Además permite la creación de cartografía ad-hoc con la que se han generado los gráficos de este trabajo. Este es un software de código abierto que dispone de herramientas para el análisis espacial, gestión de la base de datos, y generación de cartografía en diferentes formatos.

Para la georreferenciación de las estaciones de paso con la información de los RailwayNode, se ha utilizado el lenguaje Python para su desarrollo

8. Posibilidades de intercambio de información

Tener en un mismo objeto espaciotemporal toda la información del recorrido del tren permite su intercambio de una forma diferente. En la actualidad existe el esquema definido por taf-tsi para el intercambio de información internacional en formato alfanumérico, utilizando un esquema Xml. Se refiere a los horarios y estaciones de paso.

El grafo básico generado en forma de linestring se puede expresar en diferentes formatos para permitir su intercambio. Es posible extender el esquema taf-tsi para incluir la información geográfica utilizando atributos GML.

Esto permite tener en el mismo mensaje toda la información del recorrido del tren sin tener que georreferenciar los puntos de paso mas que por el origen.

Para trenes internacionales la georreferenciación presenta el problema de conocer las posiciones geográficas de los puntos de otros países. Si no se dispone de acceso a los servicios geográficos de los estados, se pueden utilizar los nuevos servicios que pone a disposición de los estados el sistema RINF. Aunque se encuentra en desarrollo en el momento de escribir este trabajo, ofrecerá a principios en 2015 un medio de consulta de estas posiciones. La Decisión actualmente en vigor está disponible en Decisión 2011/633/UE

Desgraciadamente, esta publicación no se hará a través de estándares OGC y deberá usarse un formato de datos y servicios exclusivo de RINF, aunque INSPIRE si prevee una extensión de los esquemas de transporte para incluir geometrías de más bajo nivel

Otro formato mas sencillo es GeoJSON (GeoJSON 2014), que esta pensado para la comunicacion de fenomenos espaciales, y esta basado en el estandar JSON. Sus ventajas son que los mensajes tienen un tamaño mas reducido, comparado con GML, que poseen un esquema de parseo json schema (JSON Schema 2014), y es un formato de salida nativo de las consultas SFSQL en la propia base de datos, mediante la funcion ST_AsGeoJSON(geom) en PostGIS, por ejemplo.

```

{
  "type": "Feature",
  "geometry": {
    "type": "Point",
    "coordinates": [424073.7072, 4489453.1563]
  },
  "properties": {
    "station": "LAS MATAS"
  }
}

{
  "type": "Feature",
  "geometry": {
    "type": "LineString",
    "coordinates": [ [100.0, 0.0, 12], [101.0, 1.0,
12,5] ]
  },
  "properties": {
    "train": "000A"
  }
}

```

Ejemplo de datos JSON Point y LineString

Un derivado de este formato es TopoJSON, que reduce aun mas el tamaño de las estructuras de datos y aumenta la eficiencia en su uso (Sierra Javier, Antonio 2013)

Al utilizar este tipo de formatos es posible incluir esta información en el catálogo de una IDE ferroviaria. Así los Administradores de la Infraestructura publiquen servicios Web Processing Service (OGC 2007). Este servicio permite encapsular la lógica de un procesamiento geográfico en un servicio transparente para la aplicación que lo solicite, y devuelve el fenómeno resultado en formato GML. El esquema de petición sería el siguiente. Una empresa ferroviaria invoca el servicio con un mensaje que contiene la geometría básica del TrainRailwayLink correspondiente a su compañía. El proceso calcula la geometría correspondiente a la intersección con sus trenes y devuelve este fenómeno.

Como simple medio de publicación, es posible hacerlo a través de servicios WFS en los que se ofrecen las geometrías de los TrainRailwayLink como un fenómeno más en una capa propia de la IDE.

9. Conclusión

Se ha presentado una metodología para convertir el recorrido de los trenes en elementos geoespaciales, añadiendo la componente temporal a la posición geográfica. Para la georreferenciación del trazado se ha utilizado un algoritmo de indexación semántica basado en el reconocimiento de patrones en el nombre de las estaciones. Esto crea un fenómeno tridimensional que se trata en los análisis espaciales.

Para ahorrar espacio de almacenamiento y tiempo de proceso se ha reducido el tamaño de las geometrías a analizar. Se ha estudiado la forma de generarlas usando una simplificación del fenómeno completo, usando un grafo solo con los RailwayNodes, y prescindido de la geometría intermedia formada por un LineString. Es una simplificación de toda la geometría del fenómeno recorrido del tren, pero con la suficiente precisión.

Como resultado del análisis de intersección se obtiene la lista de trenes, organizaciones, y recorrido que comparten, utilizando como base la Directiva INSPIRE para la definición de los atributos geográficos. Para la resolución, no es necesario conocer la topología de la red ferroviaria.

La creación de los TrainRailwayLine ofrece nuevas posibilidades en las que la componente geoespacial viene a complementar los procesos actualmente en vigor en el resto de aplicaciones de planificación y gestión de tráfico. La componente temporal dentro de la geometría permite el tratamiento de cada tren teniendo en cuenta todo el horario, desde el origen al destino. Teniendo en el mismo fenómeno el recorrido y su horario, es posible llevar a cabo análisis complejos y facilitar el intercambio de información.

Se han estudiado diferentes formas para calcular la intersección de los TrainRailwayLinks, usando el análisis de grafos, bases de datos de grafos y por último el análisis espacial mediante consultas SFSQL.

Se ha estudiado la mejor forma para incorporar esta solución a un entorno ya existente dentro de un Sistema de Información Ferroviaria. Para ello se han utilizado extensiones espaciales propias de los gestores de bases de datos más utilizados en cualquier organización. También se han estudiado los diferentes mecanismos para intercambiar la información entre las organizaciones, utilizando estándares OGC contemplados en INSPIRE.

Se ha mostrado el sistema en un ejemplo práctico sobre la red ferroviaria Española. Aunque la solución se ha aplicado al caso de la red ferroviaria Española, es extrapolable a cualquier red de ferrocarriles. Con ellos se mejora la interoperabilidad de la información ferroviaria entre todos los actores que intervienen en las operaciones. El esquema descrito se apoya en INSPIRE, pero cualquier definición común de fenómenos geográficos puede utilizarse como base para la georreferenciación de los puntos de paso de los trenes, lo que se encuentra disponible en cualquier Estado. Esto hace posible que sea aplicable a cualquier red de ferrocarriles donde coexistan diferentes Empresas Ferroviarias y Administradores de la Infraestructura.

Como objetivo futuro se plantea la posibilidad de incluir servicios de procesamiento (WPS), incluidos en las IDE de cada AI, que permitan a las empresas a exponer este tipo de funcionalidades encapsulando la complejidad de los cálculos implicados.

10. Agradecimientos

Mi agradecimiento a IDEAdif y al Centro Nacional de Información Geográfica por proporcionar los datos de localización de estaciones necesarios para elaborar este trabajo.

11. Referencias

- [1] 2011/633/UE: Decisión de Ejecución de la Comisión, de 15 de septiembre de 2011 , sobre las especificaciones comunes del registro de la infraestructura ferroviaria [notificada con el número C(2011) 6383] Texto pertinente a efectos del EEE
- [2] ADIF, 2013 Declaración de Red
- [3] D2.8.I.7 2009 INSPIRE Data Specification on Transport Networks
- [4] EIM 2014, <http://www.eimrail.org/>
- [5] ERA 2010, IU-Recommendation on specification of RINF-Final Report
- [6] GeoJSON 2014 <http://geojson.org/geojson-spec.html>
- [7] Gómez Castaño, J. 2010 “Desarrollo de una Infraestructura de Datos Espaciales Ferroviaria basada en Software Libre” IV Jornadas de SIG libre, Universidad de Girona, marzo 2010
- [8] Gómez Castaño, J 2013. “Tratamiento geoespacial del recorrido de trenes y de tramos ferroviarios: Mejoras en la interacción con la infraestructura” Jornadas Ibéricas de Infraestructuras de Datos Espaciales, Toledo, Noviembre 2013
- [9] Gómez Castaño, J. 2014 “Georreferenciación de documentación ferroviaria mediante indexación semántica y su publicación, usando software libre”, VIII Jornadas SIG Libre, Universidad de Girona, marzo, 2014
- [10] Hansen, I 2010, Timetable planning and Information Quality, WIT Press
- [11] IGN 2014 http://www.idee.es/web/guest/directorio-de-servicios?p_p_id=DIRSRVIDEE_WAR_DIRSRVIDEEportlet_INSTANCE_q4BW&p_p_lifecycle=1&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_DIRSRVIDEE_WAR_DIRSRVIDEEportlet_INSTANCE_q4BW_descSrv=DESCARGA
- [12] INSPIRE, 2007, <http://inspire.jrc.ec.europa.eu/>
- [13] JSON Schema 2014, <http://json-schema.org/>
- [14] JTS Libray <http://www.vividsolutions.com/jts/JTSHome.htm>
- [15] LISIGE, 2011, <http://www.boe.es/boe/dias/2010/07/06/pdfs/BOE-A-2010-10707.pdf>

- [16] Lüthi, M., D. Hürlimann and A. Nash (2005) Understanding the Timetable Planning Process as a Closed Control Loop, proceedings of the *1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*, Delft, June 2005.
- [17] Nandy 2012 “Frontiers in Algorithmics and Algorithmic Aspects in Information and Management” Volume 7285, 2012, pp 327-338
- [18] OGC 1999 OpenGIS Simple Features Specification For SQL Revision 1.1
- [19] OGC DB List <http://www.opengeospatial.org/resource/products/byspec/?specid=149>
- [20] OGC 2007, OpenGIS® Web Processing Service
- [21] OGC 2010, OpenGIS Web Feature Service 2.0 Interface Standard
- [22] OGC 2012, Geography Markup Language (GML) — Extended schemas and encoding rules
- [23] RailwayTransportNetwork.xsd
<http://inspire.ec.europa.eu/schemas/tn-ra/3.0/RailwayTransportNetwork.xsd>
- [24] QGIS 2014
- [25] RINF 2011, Recommendation on Specification of the Register of Infrastructure and Procedure demonstrating the level of compliance with the basic parameters of Technical Specifications for Interoperability for existing lines. European Railways Agency
- [26] Roanes Lozano, Eugenio et al “Unas reflexiones sobre el reconocimiento de rutas en mapas ferroviarios y teoría de grafos”, Boletín de la Soc. Puig Adam, num 78, Febrero 2008
- [27] Roanes Lozano, Eugenio et al . “Estudio matemático de la evolución de la topología de la red Española de ancho ibérico 1956-2006”, Vía libre Técnica, 2009
- [28] Salido, M.A. et al 2008 “Robustness in Railway Transportation Scheduling” Intelligent Control and Automation, 2008. WCICA 2008. 7th World Congress on
- [29] Sierra Javier, Antonio 2013 “GeoJSON y TopoJSON: comparación entre los formatos de intercambio de Información Geográfica alternativos a GML” Jornadas Ibéricas de Infraestructuras de Datos Espaciales, Toledo, Noviembre 2013
- [30] TAF-TSI 2011 a, TAF/TSI Objects Identifiers Handbook
- [31] TAF-TSI 2011 b Commission Regulation (EU) No 454/2011.
- [32] Vicknair 2010 “A comparison of a graph database and a relational database: a data provenance perspective“ Proceedings of the 48th Annual Southeast Regional Conference

