

## **CEMBOX: Gemelos Digitales aplicados a la salud estructural y el mantenimiento de infraestructuras**

José Solís Hernández<sup>1</sup>, Paula López Arévalo<sup>2</sup>,  
Concepción Toribio Díaz<sup>3</sup>

<sup>1</sup> CEMOSA, Málaga, España, jose.solis@cemosa.es

<sup>2</sup> CEMOSA, Málaga, España, paula.lopez@cemosa.es

<sup>3</sup> CEMOSA, Málaga, España, concepcion.toribio@cemosa.es

### **Resumen**

El creciente deterioro de la red europea de infraestructuras requiere de sistemas innovadores para mejorar la eficiencia, calidad y precisión en procesos de inspección, mantenimiento y gestión. CEMBOX, plataforma gemelo digital de infraestructuras, orquesta entornos BIM-GIS para visualizar activos, predecir estados de condición y simular escenarios de cara a la toma de decisiones. La plataforma incluye diversos verticales especializados en activos críticos, y centrados en una arquitectura ICT distribuida basada en microservicios que emplea información histórica y de sensores IoT (p. ej. acelerómetros, clinómetros), técnicas de monitorización de la salud estructural, modelos de Machine Learning, y sistemas de reporte y alarma. CEMBOX presenta aplicaciones en activos reales como el viaducto Huertas de Mateo (LAV Madrid-Valencia), el túnel 40 en la línea ferroviaria Palencia-Coruña, un talud en Briones (línea Castejón-Bilbao) o la esclusa de Champagne en el río Sena, evidenciando su capacidad para priorizar actuaciones, optimizar OPEX y reducir riesgos.

**Palabras Clave:** Gemelo Digital, Mantenimiento, Gestión, Infraestructuras, Plataforma.

### **1 Introducción**

Una gran parte de las infraestructuras de transporte europeas se construyeron entre 1960 y 1970 y se diseñaron para una vida útil de 50 años. Hoy en día, un alto porcentaje de dichos activos han excedido su vida útil de diseño y, por lo tanto, requieren de un mantenimiento y unas actuaciones necesarias para mantener su funcionalidad y adaptarse a los nuevos requisitos técnicos y de servicio. En este contexto y en un mundo cada vez más digitalizado, se requieren tecnologías para la gestión y la conservación de infraestructuras que sean capaces de (a) mejorar la gestión con el objetivo de mejorar el servicio, (b) reducir los costes derivados del alto volumen de actividades de conservación que serán necesarias en los próximos años, y (c) permitir una gestión sostenible de los activos, avanzando hacia la descarbonización y cumpliendo con el Pacto Verde Europeo [1].

Además de las tareas habituales de mantenimiento, el envejecimiento de las infraestructuras existentes requiere importantes esfuerzos de modernización, y la lucha contra el cambio climático pone de manifiesto la necesidad de reducir las emisiones en todos los aspectos relacionados con la gestión de las infraestructuras. En este contexto, su conservación inteligente puede reducir significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas [2].

El principal objetivo de la investigación aquí presentada es el desarrollo de una Plataforma Inteligente de Gestión de Activos, orientada a mejorar, digitalizar y automatizar los procesos de

gestión de infraestructuras de transporte. La plataforma, orientada a Gemelos Digitales (Digital Twin), ha sido concebida como una herramienta que permite un enfoque centralizado para abordar las nuevas necesidades en el ámbito del transporte y la movilidad, abarcando el mantenimiento, la rehabilitación, la digitalización y el desarrollo tecnológico.

En este documento se presenta dicha plataforma: CEMBOX, cuyo concepto y principales funcionalidades y estructura general son descritas en la Sección 2. Los detalles relativos a su arquitectura interna se desarrollan en la Sección 3. Finalmente, la Sección 4 recoge los distintos Casos de Uso asociados a CEMBOX, organizados cronológicamente según los proyectos en los que fueron desarrollados, ya que la evolución de CEMBOX ha estado estrechamente ligada a la ejecución de diversos proyectos de investigación. A lo largo de este proceso, la plataforma ha evolucionado desde un diseño inicial sencillo, con desarrollos y capacidades limitadas, hacia una arquitectura cada vez más avanzada, modular y funcional. Esta evolución no solo ha supuesto la incorporación de nuevos casos de uso, sino también un importante desarrollo orientado a mejorar las capacidades tecnológicas, la integración de datos, la automatización de procesos y el soporte a la toma de decisiones. El resultado de esta evolución es la versión final de la plataforma que se presenta y analiza en este artículo, correspondiente a la versión más reciente realizado en el marco del proyecto MOVEO.

## 2 Estructura y funcionalidades

CEMBOX es una plataforma orientada a gemelos digitales cuyo objetivo es digitalizar y automatizar los procesos de gestión de infraestructuras, aportando funcionalidades de apoyo a la toma de decisión.

El acceso a la plataforma puede hacerse desde los navegadores habituales (FireFox, Chrome...), iniciando sesión con un usuario con los permisos adecuados. Diversos niveles de permiso permiten acceso a diferentes activos dentro de la plataforma.

La Figura 1 muestra la disposición base de CEMBOX en su última versión. En ella puede verse el visor BIM-GIS a la izquierda, navegable e interactivo. A la derecha el usuario puede acceder a la información detallada de los diversos menús del sistema. En el selector de la derecha se puede seleccionar el menú a visualizar, y en la barra superior se seleccionan detalles de diseño, idioma de la plataforma, guía de la plataforma y opciones de inicio de sesión.



Figura 1. Disposición base de CEMBOX. Ejemplo de interfaz.

En las siguientes subsecciones se describen las funcionalidades principales que conforman CEMBOX, orientadas a los distintos casos de uso analizados. Los diferentes menús, herramientas y funcionalidades presentados han sido diseñados para proporcionar a los gestores de infraestructuras información centralizada y de valor, facilitando una gestión más eficiente, optimizada y avanzada de los activos analizados, así como apoyo a los procesos de toma de decisiones.

## 2.1 Modelo BIM-GIS

Uno de los elementos fundamentales para la interacción con el Gemelo Digital es el modelo BIM-GIS. Los activos analizados han sido modelados siguiendo estándares BIM compatibles con IFC, no solo para la generación de modelos tridimensionales, sino también para la gestión estructurada de la información interna asociada al modelo. De este modo, el modelo integra toda la información relevante que un gestor de infraestructuras requiere para llevar a cabo tareas de análisis, monitorización y apoyo a la toma de decisiones. El modelo está a su vez introducido dentro de un entorno GIS que enriquece la visualización con contexto visual y geolocalización.

El visor del gemelo digital permite navegar por las diversas capas del modelo, obtener la información de sus elementos e interactuar con ellos para obtener la información enriquecida en los distintos menús de la plataforma.

## 2.2 Inspección tradicional y con tecnologías avanzadas

La plataforma permite el acceso y la gestión de la información asociada a las inspecciones realizadas. Dependiendo del caso de uso, esto puede incluir datos obtenidos mediante metodologías tradicionales, como inspecciones visuales, que pueden ser incorporados manualmente por los usuarios a través de texto, imágenes, vídeos, informes u otros tipos de documentación. Toda esta información se integra en una base de datos centralizada, trazable y estructurada, organizada según los elementos del modelo y las fechas de adquisición, facilitando así su consulta, análisis y seguimiento a lo largo del tiempo.

Por otro lado, la plataforma permite la gestión efectiva de metodologías de inspección llevadas a cabo con tecnologías avanzadas, tales como drones o vehículos automatizados de inspección. En estos casos la plataforma es el entorno perfecto para hacer la conexión y la

visualización a los outputs de inspección tales como fotografías o vídeos geolocalizados o modelos de nubes de puntos (point cloud).

### 2.3 Monitorización

La plataforma permite el acceso a información en tiempo real proveniente de sensores IoT instalados en los activos de estudio. La información se capta y guarda en la base de datos y puede visualizarse permitiendo analizar los resultados y estudiar tendencias, anomalías y comparaciones entre parámetros de una manera amigable para el usuario. Algunos ejemplos de monitorizaciones podrían ser datos provenientes de estaciones meteorológicas o acelerómetros.

### 2.4 Análisis avanzados

La información almacenada en el gemelo digital se utiliza para realizar análisis y predicciones sobre los activos de estudio. Metodologías de elementos finitos, modelos de inteligencia artificial, y otras simulaciones son desarrolladas en función del activo de estudio y la información disponible para desarrollar análisis sobre salud estructural, alarmas de comportamiento anómalo o predicciones de estado entre otras.

### 2.5 Plan de mantenimiento

La integración de la información procedente de los modelos BIM-GIS, las inspecciones, la monitorización en tiempo real y los análisis avanzados permite a CEMBOX desarrollar funcionalidades orientadas a la planificación y gestión del mantenimiento de los activos. La plataforma facilita la definición de estrategias de mantenimiento, apoyando la priorización de intervenciones en función del estado de la infraestructura, los riesgos detectados y la evolución prevista de los diferentes indicadores. De este modo, CEMBOX proporciona a los gestores una herramienta centralizada para optimizar recursos, reducir costes operativos y mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las actividades de conservación y mantenimiento.

## 3 CEMBOX arquitectura

La arquitectura interna de CEMBOX aparece esquematizada en la Figura 2. Esta se desarrolla sobre un ecosistema tecnológico moderno y escalable, compuesto por los siguientes elementos principales:

- **Kubernetes.** Plataforma de orquestación de contenedores que permite desplegar, escalar y gestionar aplicaciones de forma automática en entornos distribuidos, garantizando alta disponibilidad y resiliencia.
- **Apache Kafka.** Sistema distribuido de mensajería y streaming de eventos, diseñado para el procesamiento de grandes volúmenes de datos en tiempo real y para la ingesta eficiente de información procedente de múltiples fuentes.
- **Esri/ArcGIS Online.** ArcGIS Online es la plataforma cloud de Esri orientada a la gestión, visualización y compartición de información geoespacial. Permite crear mapas interactivos, dashboards y aplicaciones web GIS, facilitando la integración de datos espaciales en entornos colaborativos y de apoyo a la toma de decisiones en tiempo real.

- **BIM / IFC.** BIM (Building Information Modeling) es una metodología para la gestión integral de la información digital de edificios a lo largo de su ciclo de vida. IFC (Industry Foundation Classes) es el formato abierto y estándar que permite el intercambio de modelos BIM entre diferentes plataformas y aplicaciones.
- **React.** Biblioteca de JavaScript orientada a la construcción de interfaces de usuario basadas en componentes, ampliamente utilizada en aplicaciones web modernas por su eficiencia y modularidad.
- **MongoDB.** Base de datos NoSQL orientada a documentos, flexible y altamente escalable, especialmente adecuada para aplicaciones que gestionan grandes volúmenes de datos heterogéneos y no estructurados.
- **Microsoft Entra ID.** Servicio de gestión de identidad y acceso (IAM) en la nube de Microsoft (anteriormente Azure Active Directory), utilizado para la autenticación, autorización y control de usuarios.
- **Keycloak.** Plataforma open source de gestión de identidades que proporciona autenticación, autorización y capacidades de Single Sign-On (SSO) para aplicaciones distribuidas.
- **Python.** Lenguaje de programación de alto nivel y propósito general, ampliamente utilizado en el desarrollo de servicios backend, automatización, análisis de datos, inteligencia artificial y modelado.

Siguiendo el esquema de la Figura 2, la orquestación de toda la arquitectura se realiza mediante Kubernetes, que gestiona el despliegue y la operación de los distintos servicios. La ciberseguridad del sistema se garantiza tanto a través de los mecanismos propios de cada componente tecnológico como mediante la integración de Microsoft Entra ID y Keycloak para la gestión de identidades, autenticación y control de accesos.

La información estática del activo (datos históricos, fichas de inspección, etc.) se guarda en la base de datos a través de APIs. La información dinámica, como la información proveniente de los sensores se guarda en la base de datos a través de Kafka. La base de datos está desarrollada utilizando mongoDB, permitiendo el acceso a los datos de todos los tipos de análisis, ya sea internamente si se ejecutan desde la plataforma o externamente a través de APIs si se ejecutan externamente.

El modelo BIM se contextualiza espacialmente a través de ArcGIS Online, permitiendo su visualización georreferenciada en un entorno GIS. La integración de esta visualización, así como del resto de interfaces de usuario, se realiza en el front-end de la plataforma, desarrollado

en React, con el cual los usuarios finales pueden interactuar libremente.

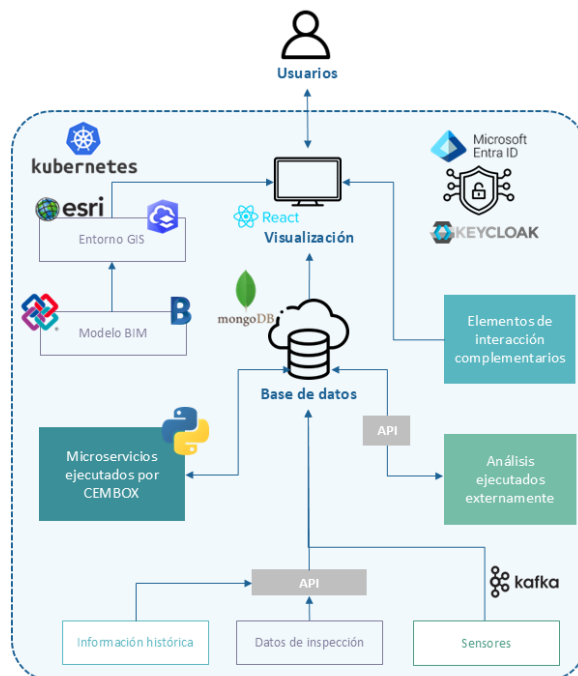


Figura 2. Esquema arquitectura CEMBOX.

#### 4 Evolución y proyectos

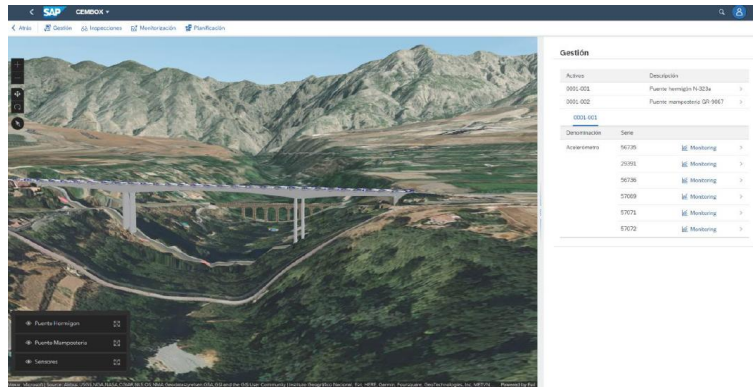
La evolución de CEMBOX ha estado marcada por la participación en diferentes proyectos de investigación, en los que cada iniciativa ha supuesto un salto tecnológico relevante para la plataforma. A través de estos proyectos, CEMBOX ha incorporado nuevas capacidades de análisis, integración y visualización de datos, así como mejoras en modularidad, automatización y soporte a la toma de decisiones, ampliando progresivamente tanto su alcance funcional como su madurez tecnológica.

En esta sección se recopilan los principales proyectos que han contribuido a dicha evolución, describiendo los casos de uso abordados y las funcionalidades desarrolladas en cada uno de ellos en relación con CEMBOX. Este recorrido permite contextualizar el estado actual de la plataforma, siendo el proyecto MOVEO el marco en el que se desarrolla y analiza la versión más reciente presentada en este artículo.

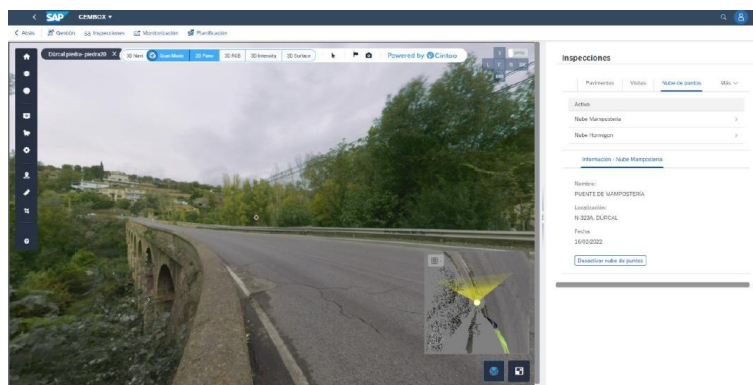
##### 4.1 TECH4INFRA

TECH4INFRA [3], proyecto colaborativo financiado por la agencia IDEA de la Junta de Andalucía. El proyecto TECH4INFRA está centrado en el diseño y desarrollo de una Plataforma Inteligente de Gestión de Infraestructuras que permita monitorizar e inspeccionar infraestructuras civiles de una manera eficiente, precisa y segura, haciendo uso de nuevas tecnologías (drones y sensores IoT) que permiten optimizar los recursos necesarios para la obtención de datos fiables y precisos de las infraestructuras.

El activo de estudio integrado en la plataforma fue el puente de Dúrcal, Granada, parte de la carretera N-323a, como se muestra en la Figura 3. En este proyecto la plataforma integró sistemas de inspección UAS y monitorización utilizando sensores IoT.



(a)



(b)

Figura 3. Ejemplos de integración del puente de Dúrcal en CEMBOX. La figura (a) muestra los puentes y un selector de sensores, mientras que la (b) la navegación por el entorno de nube de puntos.

#### 4.2 OMICRON

OMICRON [4], proyecto financiado por la Comisión Europea en el marco del programa H2020. El objetivo del proyecto OMICRON fue impulsar la industrialización y automatización de las tecnologías aplicadas a la construcción, inspección y mantenimiento de carreteras. Para ello, integró un amplio conjunto de soluciones, desde la inspección hasta la ejecución de actuaciones, con el objetivo de mejorar los niveles de seguridad, incrementar la disponibilidad, fiabilidad y capacidad de la red viaria, así como reducir las interrupciones al tráfico y los costes asociados a las actividades de construcción y mantenimiento.

En este caso, el desarrollo de la plataforma basada en gemelo digital fue llevado a cabo por otra empresa del consorcio. No obstante, como entidad coordinadora y supervisora del desarrollo,

CEMOSA aprovechó el conocimiento y la experiencia adquiridos durante el proyecto para enriquecer CEMBOX, integrando de forma independiente tanto los activos de estudio como los desarrollos tecnológicos propios realizados por CEMOSA en el marco del proyecto.

Los activos integrados en la plataforma se corresponden con la A-1 en Italia que conecta Florencia y Bolonia. La integración puede dividirse en dos activos:

- Información de estado de pavimento, integrando en las distintas secciones de la carretera los valores históricos del estado del pavimento y la evaluación de su condición, así como la predicción del estado del pavimento (Figura 4).
- Información del puente Settefonti monitorizado. Se integró la información de la monitorización y los análisis realizados sobre salud estructural a través de metodologías OMA para identificación de daño (Figura 5).

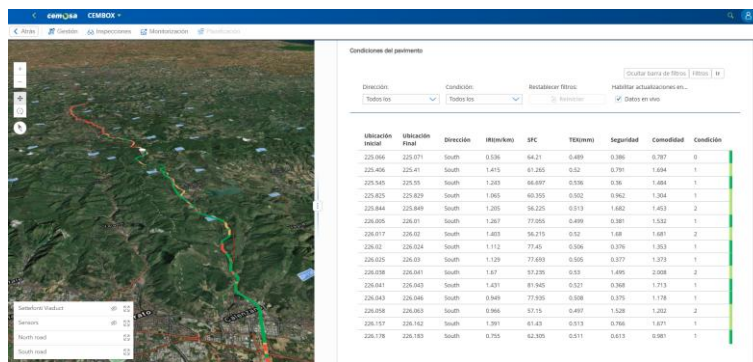


Figura 4. Interfaz condiciones de pavimento. ProyectoOMICRON.

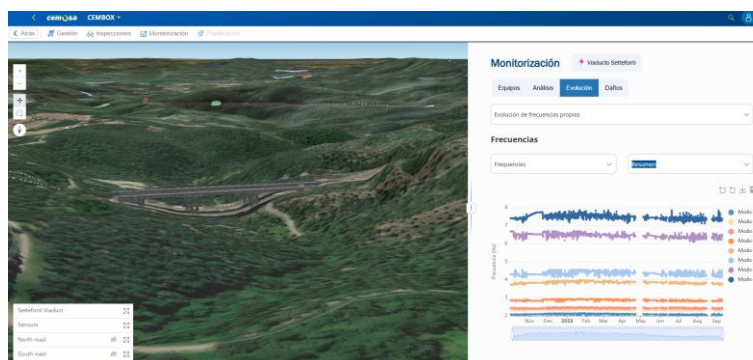


Figura 5. Interfaz condiciones de salud estructural Settefonti bridge. ProyectoOMICRON.

### 4.3 IAM4RAIL

IAM4RAIL [5] es un proyecto centrado en el desarrollo de siete demostradores integrados para activos ferroviarios considerados estratégicos para la investigación y la innovación en el sector ferroviario. El proyecto aborda la integración de información sobre el estado de los activos, obtenida mediante sistemas avanzados de monitorización, con herramientas de apoyo a la toma

de decisiones y sistemas de gestión del tráfico ferroviario. En este proyecto los activos de estudio para la integración en CEMBOX son:

- Taludes de la vía ferroviaria de Vilar de Silva – Túnel 40. Este activo envía volúmenes altos de datos provenientes de sensores IoT y mediciones estáticas: estación meteorológica, fisurómetro, inclinómetro, nivelación, piezómetro y clinómetros. Se realizan análisis sobre evolución, pluviometría, predicciones y desplazamientos de la vía y se desarrollan una serie de alarmas de detección de posibles peligros. Un ejemplo de una de las interfaces de la integración puede verse en la Figura 6.
- Taludes de Briones. Este activo está monitorizado con 14 clinómetros y una estación meteorológica que envía altas cantidades de datos a la plataforma para su almacenamiento, gestión y análisis, además de análisis de evolución, pluviometría, predicciones y desplazamientos de la vía y se desarrollan una serie de alarmas de detección de posibles peligros. Un ejemplo de una de las interfaces de la integración puede verse en la Figura 7.
- Puente de Huertas de Mateo es un puente en vía de alta velocidad monitorizado con clinómetros, sensores de temperatura, estación meteorológica LVDTs en apoyos POT y acelerómetros. En este caso, además de la integración de los datos en tiempo real, se realizan análisis de salud estructural analizando parámetros dinámicos del puente, calculando tasas de amortiguamiento, rotaciones, confort estructural, distancias de deslizamiento acumulado y avanzando en la detección y localización de daños y elaboración de alarmas. Un ejemplo de una de las interfaces de la integración puede verse en la Figura 8.

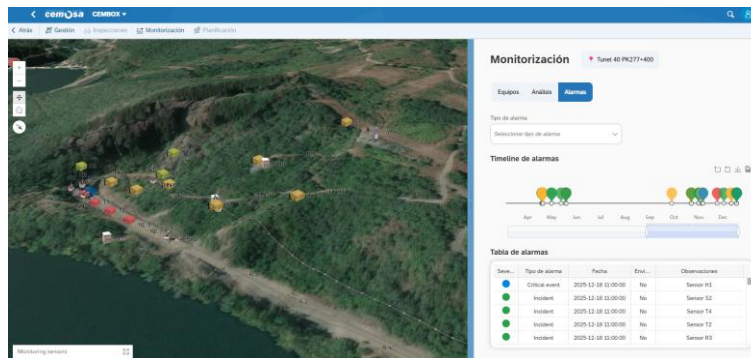


Figura 6. Interfaz de alarmas en talud Vilar de Silva. Proyecto IAM4RAIL.



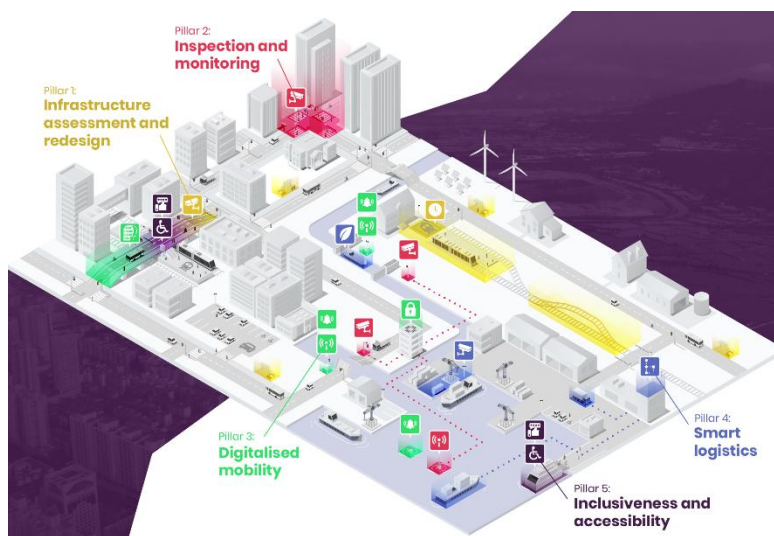
Figura 7. Interfaz de visualización de datos de clinómetro en talud Briones. Proyecto IAM4RAIL.



Figura 8. Interfaz de visualización de detección de daños en puente de Huertas de Mateo. Proyecto IAM4RAIL.

#### 4.4 MOVEO

El objetivo de MOVEO [6] es desarrollar un marco inteligente y escalable que fomente infraestructuras de transporte y servicios de movilidad inclusivos, eficientes y fluidos, utilizando tecnologías digitales para mejorar la interconexión entre infraestructuras y servicios. El proyecto se estructura en cinco pilares principales como muestra la Figura 9. El Pilar 1 se centra en el desarrollo de herramientas para la evaluación y rediseño de sistemas y nodos de transporte orientados a servicios multimodales fluidos, capaces de integrar modos de transporte modernos. El Pilar 2 busca mejorar el conocimiento sobre el estado de las infraestructuras y los flujos de tráfico para permitir respuestas más rápidas, seguras, sostenibles y fiables, facilitando además el mantenimiento predictivo y el desarrollo de sistemas de transporte resilientes. El Pilar 3 permite una gestión eficiente de sistemas de transporte envejecidos y cada vez más complejos mediante herramientas digitales que conectan infraestructuras y modos de transporte. El Pilar 4 desarrolla soluciones inteligentes para la logística y los flujos de pasajeros orientadas a una movilidad fluida e integrada. El Pilar 5 promueve infraestructuras y servicios multimodales inclusivos, cómodos, accesibles y flexibles mediante el estudio de los distintos modos de transporte y la aplicación de soluciones digitales.



*Figura 9. Infografía pilares de MOVEO*

En este proyecto, CEMBOX actúa como elemento integrador común, proporcionando una plataforma unificada para el acceso en tiempo real, la monitorización y la gestión de los distintos demostradores. La plataforma debe ser capaz de adaptarse e integrar la amplia diversidad de casuísticas abordadas, incluyendo diferentes entornos operacionales, tipologías de datos, sensores, análisis y funcionalidades específicas asociadas a cada piloto. Asimismo, debe gestionar de forma eficiente los elevados volúmenes y flujos de información generados, garantizando su correcta organización, procesamiento e integración para facilitar la explotación y la toma de decisiones.

MOVEO cuenta con cinco pilotos principales con características y necesidades operacionales diferenciadas, cuya integración se realiza a través de CEMBOX. El primero de ellos se localiza en Winterthur (Suiza), donde la plataforma integra el hub de transporte multimodal de Grütze. El segundo piloto, situado en el este de Suiza, se centra en la integración de la red de transporte rural y urbana asociada al área metropolitana de Zúrich. El tercer piloto corresponde al Puerto de Rávena (Italia), con un enfoque orientado tanto a la gestión del transporte como a la monitorización y gestión de infraestructuras críticas como puentes. El cuarto piloto se desarrolla en la Cuenca del Sena (Francia), donde la integración en CEMBOX combina funcionalidades relacionadas con la movilidad y la gestión portuaria junto con capacidades de monitorización y gestión de infraestructuras como compuertas. Finalmente, el quinto piloto se sitúa en el Puerto de Klaipėda (Lituania), donde CEMBOX se orienta a la gestión optimizada de las operaciones portuarias y a la monitorización de activos bajo condiciones meteorológicas extremas, especialmente asociadas a nieve y bajas temperaturas.

La validación de la plataforma en estos cinco demostradores europeos permite abarcar una amplia variedad de contextos operacionales, incluyendo entornos urbanos, vías navegables interiores, transporte marítimo y escenarios multimodales.

## 5 Conclusiones

Este trabajo presenta CEMBOX, una plataforma orientada a Gemelos Digitales para la gestión inteligente de infraestructuras de transporte, diseñada para integrar modelos BIM-GIS, inspecciones, sistemas de monitorización IoT y análisis avanzados basados en inteligencia artificial. La plataforma proporciona un entorno centralizado para la visualización, gestión y explotación de información heterogénea, facilitando la toma de decisiones, la planificación del mantenimiento y la optimización de recursos en infraestructuras complejas.

La evolución de CEMBOX a través de distintos proyectos de investigación ha permitido incorporar progresivamente nuevas capacidades tecnológicas y ampliar su alcance funcional. Los casos de uso desarrollados demuestran la capacidad de la plataforma para adaptarse a diferentes tipos de activos y contextos operacionales, culminando en el proyecto MOVEO, donde CEMBOX actúa como plataforma integradora para múltiples demostradores europeos multimodales. Los resultados obtenidos evidencian el potencial de este tipo de soluciones para avanzar hacia infraestructuras más resilientes, sostenibles, digitalizadas y orientadas a la gestión basada en datos.

## 6 Referencias

- [1] Comisión Europea (2019). Pacto Verde Europeo.
- [2] EAPA, EUPAVE and FEHRL (2016). Road Pavement Industries Highlight Huge CO2 Savings Offered by Maintaining and Upgrading Roads.
- [3] TECH4INFRA: Nuevas tecnologías aplicadas a la gestión eficiente y segura de infraestructuras civiles (2020).
- [4] OMICRON: H2020 OMICRON Project (2021). Grant Agreement number 955269. Programa Horizon 2020. <https://omicronproject.eu/>
- [5] FP3 - IAM4RAIL - Project 101101966: HORIZON-Europe's Rail Joint Undertaking. <https://rail-research.europa.eu/rail-projects/fp3-iam4rail/>
- [6] MOVEO: Intelligent Framework for Inclusive and Seamless Transport Infrastructure and Mobility Services (2024). Proyecto HORIZON-CL5-2024-D6-01. Project: 101203049. <https://moveoproject.eu/>
- [7] J. Solís Hernández, N. Jiménez Redondo, C. Toribio Díaz, F. A. García Villena, E. Hernández y M. Troyano. Plataforma Inteligente de Gestión de Carreteras basada en Gemelos Digitales. Revista Carreteras nº243, 2024. <https://www.aecarretera.com/servicios/publicaciones/revista-carreteras/revista243>.