

# GEMELO DIGITAL PARA LA GESTIÓN DE MOVILIDAD PEATONAL EN INFRAESTRUCTURAS TURÍSTICAS URBANAS: CASO DE USO EN SETAS DE SEVILLA

Samuel Aglio<sup>1</sup>, David Cipres<sup>2</sup>, Eduardo Fraguas<sup>3</sup>, Gema Ortiz<sup>4</sup> y Antonio Ángel Ramírez<sup>5</sup>

1 Instituto Tecnológico de Aragón, Zaragoza, España, [saglio@ita.es](mailto:saglio@ita.es)

2 Instituto Tecnológico de Aragón, Zaragoza, España, [dcipres@ita.es](mailto:dcipres@ita.es)

3 Instituto Tecnológico de Aragón, Zaragoza, España, [efraguas@ita.es](mailto:efraguas@ita.es)

4 SACYR, Madrid, España, [gortizv@sacyr.com](mailto:gortizv@sacyr.com)

5 SACYR, Madrid, España, [aramirez@sacyr.com](mailto:aramirez@sacyr.com)

## Resumen

La gestión de infraestructuras turísticas urbanas de alta afluencia exige herramientas capaces de observar, anticipar y evaluar el comportamiento peatonal en espacios donde confluyen visitantes, usuarios cotidianos, actividades comerciales, eventos y operaciones de mantenimiento. Este artículo presenta un caso de uso aplicado de gemelo digital para Setas de Sevilla, desarrollado en el marco del proyecto SUSTAIN, orientado a la monitorización, predicción y simulación de la movilidad peatonal en una infraestructura turística integrada en el espacio público. El sistema combina datos de cámaras, ticketing, telefonía móvil anonimizada, meteorología y registros operativos, integrados en una arquitectura modular. Los resultados obtenidos demuestran la idoneidad del gemelo digital como herramienta para conformar una visión operativa integrada del espacio, anticipar picos de demanda y simular escenarios de alta afluencia o de climatología adversa, proporcionando soporte a la toma de decisiones en materia de accesos, gestión de colas, señalización, control de aforos y accesibilidad. El caso de estudio evidencia que el valor añadido del gemelo digital no radica exclusivamente en la visualización del estado actual de la infraestructura, sino en su capacidad para transformar datos heterogéneos en información accionable orientada a la gestión operativa, la seguridad y la mejora de la experiencia del visitante.

**Palabras Clave:** gemelo digital; movilidad peatonal; turismo inteligente; simulación.

## 1 Introducción

La gestión de infraestructuras turísticas urbanas constituye un reto creciente para las ciudades, especialmente en espacios de alta afluencia donde se superponen usos turísticos, culturales, comerciales y ciudadanos. En estos entornos, la calidad de la experiencia no depende únicamente del atractivo arquitectónico o patrimonial, sino también de la capacidad de gestionar accesos, flujos peatonales, zonas de estancia, seguridad, confort y respuesta ante episodios de saturación. La problemática es especialmente relevante en infraestructuras integradas en el espacio público, donde la movilidad turística se combina con la movilidad cotidiana y con dinámicas urbanas variables.

Los gemelos digitales ofrecen una oportunidad para avanzar desde modelos de gestión basados en la observación puntual hacia sistemas capaces de integrar datos heterogéneos, representar el comportamiento de una infraestructura en tiempo real, simular escenarios y apoyar la toma de decisiones. En el proyecto SUSTAIN, los gemelos digitales se conciben como herramientas orientadas a la planificación, evaluación y mejora de supermanzanas urbanas sostenibles mediante monitorización, simulación, inteligencia artificial y análisis de impacto social y ambiental. En este trabajo se entiende por supermanzana urbana una unidad de análisis e intervención que agrupa varios espacios urbanos próximos para estudiar de forma integrada la movilidad, el uso del espacio público, la accesibilidad, el confort y la sostenibilidad. La digitalización urbana no se plantea como un fin en sí mismo, sino como

un medio para comprender y mejorar el funcionamiento de los espacios urbanos desde una perspectiva ambiental, social y funcional.

El presente artículo se centra en el caso de movilidad peatonal aplicado a Setas de Sevilla, infraestructura turística formada por el conjunto Metropol Parasol y la Plaza de la Encarnación. El caso permite analizar cómo un gemelo digital puede contribuir a la gestión inteligente de un espacio singular, caracterizado por la presencia simultánea de visitantes, residentes, usuarios del espacio público y flujos peatonales condicionados por demanda, eventos, meteorología y operación diaria. La finalidad principal del sistema es proporcionar una representación actualizada del espacio para optimizar la experiencia de los visitantes, anticipar necesidades operativas y mejorar la planificación a medio y largo plazo.

El gemelo digital se alimenta de diferentes fuentes de datos. Integra imágenes de cámaras, datos móviles anonimizados, información de ticketing, contadores de acceso, meteorología y registros de mantenimiento. Las cámaras permiten obtener información de flujo de visitantes: conteos, flujos, entradas y salidas, mapas de acumulación y direcciones predominantes de movimiento. Los datos de telefonía móvil aportan estimaciones agregadas sobre presencia y patrones de estancia en áreas exteriores. Los datos de ticketing y los contadores físicos proporcionan referencias directas de ocupación en zonas controladas. Esta combinación de fuentes facilita una lectura más completa del funcionamiento del conjunto y permite alimentar modelos predictivos y de simulación.

La contribución del trabajo es documentar un caso aplicado de tecnologías de gemelo digital en una infraestructura turística urbana, mostrando su utilidad para integrar fuentes de datos diversas, anticipar comportamientos, evaluar escenarios y generar información accionable para los gestores. El artículo se organiza en ocho secciones: introducción, estado del arte, objetivos, caso de estudio, arquitectura, metodología, resultados y discusión, y conclusiones con líneas futuras.

La Figura 1 muestra una vista general de Setas de Sevilla, infraestructura turística y espacio público urbano sobre el que se desarrolla el caso de uso analizado.



Figura 1. Vista general de Setas de Sevilla

## 2 Estado del arte

La aplicación de gemelos digitales al ámbito urbano se ha consolidado como una línea de investigación vinculada a la evolución de las smart cities y a la necesidad de gestionar sistemas urbanos complejos. Un gemelo digital urbano puede entenderse como una representación digital dinámica de activos, procesos o espacios urbanos, alimentada por datos procedentes de sensores, sistemas de información, modelos espaciales y fuentes externas. Su valor no reside únicamente en la visualización, sino en la

integración de datos, la simulación y el apoyo a la decisión. Las revisiones recientes destacan su papel en planificación, sostenibilidad, movilidad, energía, seguridad pública, medio ambiente e infraestructuras [1].

La literatura científica advierte, asimismo, que el despliegue de gemelos digitales en entornos urbanos conlleva retos de notable complejidad. Entre ellos destacan la interoperabilidad entre sistemas, la integración de datos con diferentes formatos y escalas temporales, la actualización en tiempo real, la calidad del dato, la gobernanza, la privacidad y la aceptación por parte de usuarios y gestores. Lei et al. identifican desafíos técnicos y no técnicos, incluyendo cuestiones sociales, legales y de valor práctico, por lo que recomiendan diseñar estas plataformas desde una perspectiva integral [2]. Esta idea resulta especialmente relevante para infraestructuras turísticas urbanas, donde el uso de datos de movilidad, cámaras o telefonía móvil debe equilibrarse con criterios de anonimización, proporcionalidad y utilidad operativa.

En paralelo, el concepto de destino turístico inteligente ha evolucionado desde una visión centrada en la digitalización de servicios hacia enfoques más amplios orientados a la gestión integrada del destino, la sostenibilidad, la experiencia del visitante y la toma de decisiones basada en datos. Autores como Baggio et al. [3] subrayan que la tecnología debe acompañarse de rediseño organizativo y procesos de gestión para generar valor real en destinos turísticos. Esta visión coincide con el enfoque del presente trabajo, en el que el gemelo digital se plantea como herramienta de apoyo a la gestión de una infraestructura turística integrada en el espacio público.

Dentro del turismo, los gemelos digitales constituyen todavía un campo emergente. Una revisión sistemática reciente identifica que las aplicaciones turísticas se concentran principalmente en patrimonio cultural, museos, monumentos y gestión de destinos, con un peso importante de escalas de sitio y procesos de digitalización patrimonial [4]. Este diagnóstico permite situar el caso de Setas de Sevilla en un espacio de oportunidad: aplicar el gemelo digital no solo para representar un activo turístico, sino para operar, anticipar y simular flujos peatonales en una infraestructura urbana compleja.

La gestión de flujos peatonales es un ámbito clave para este trabajo. En espacios turísticos de alta afluencia, la calidad de la visita no depende solo del número total de usuarios, sino de su distribución espacial, tiempos de espera, formación de colas, puntos de congestión, legibilidad de recorridos y accesibilidad. Por ello, la monitorización mediante visión por computador y técnicas de conteo de multitudes se ha convertido en una herramienta relevante para obtener métricas de ocupación, densidad, mapas de calor y patrones de movimiento. Las revisiones sobre crowd counting destacan su utilidad para seguridad, diseño de espacios públicos, transporte, eventos e infraestructuras con alta concentración de personas [5].

La simulación peatonal complementa la monitorización al permitir evaluar escenarios futuros o hipotéticos sin intervenir directamente sobre el espacio físico. Los modelos basados en agentes son especialmente adecuados porque representan individuos con reglas de movimiento, preferencias, velocidades, interacciones y respuestas ante congestión. Revisiones recientes destacan su utilidad para planificación urbana y análisis de comportamiento peatonal en entornos construidos [6], así como para escenarios de evacuación, donde persisten retos de calibración, validación y realismo conductual [7].

La combinación de monitorización, predicción y simulación constituye una de las aportaciones más relevantes de los gemelos digitales aplicados a la gestión de espacios turísticos. La monitorización permite conocer el estado actual; la predicción anticipa la demanda; y la simulación evalúa cómo se comportaría la infraestructura ante alta afluencia, eventos, cambios de acceso, evacuación o meteorología adversa. A partir de esta revisión se identifica una oportunidad clara para integrar cámaras, ticketing, telefonía móvil anonimizada, meteorología, mantenimiento, modelos predictivos y simulación de escenarios en una solución operativa orientada a aforo, accesibilidad, congestión, seguridad, confort y experiencia del visitante.

### 3 Objetivos

El objetivo general del artículo es presentar un caso de uso aplicado de gemelo digital para la gestión de la infraestructura turística de Setas de Sevilla, analizando cómo la integración de datos heterogéneos,

modelos de inteligencia artificial, simulación de escenarios y herramientas de visualización puede apoyar una gestión más proactiva, informada y orientada al usuario.

Este objetivo se concreta en varios objetivos específicos: contextualizar el caso dentro del proyecto SUSTAIN y del enfoque de supermanzana urbana sostenible; describir las necesidades de gestión de una infraestructura turística de alta intensidad peatonal; presentar la arquitectura funcional del gemelo digital; analizar la integración de cámaras, datos móviles anonimizados, ticketing, meteorología y mantenimiento; evaluar el papel de la inteligencia artificial y los modelos predictivos; examinar la capacidad del sistema para simular escenarios y apoyar decisiones; identificar beneficios sociales y operativos; y valorar la replicabilidad del enfoque en otras infraestructuras turísticas urbanas.

Estos objetivos permiten abordar el gemelo digital no como una solución tecnológica aislada, sino como una herramienta vinculada a necesidades reales de gestión: aforo, colas, accesibilidad, confort, seguridad, mantenimiento y respuesta ante situaciones de alta demanda. Desde esta perspectiva, el caso de uso se interpreta como una experiencia aplicada de transformación de datos en decisiones operativas útiles.

#### **4 Caso de estudio: Setas de Sevilla**

Setas de Sevilla constituye una infraestructura turística integrada en el espacio público, formada por el conjunto Metropól Parasol y la Plaza de la Encarnación. En el marco de SUSTAIN, este ámbito se analiza como un sistema peatonal de elevada intensidad y amplia variabilidad temporal, debido a la coexistencia de usos cotidianos, turísticos, comerciales y de eventos. La movilidad estudiada no se limita a los desplazamientos de llegada al entorno, sino que incluye accesos, distribución de flujos en plaza, núcleos verticales, zonas de espera, pasarelas, recorridos internos y acceso al mirador.

Desde el punto de vista funcional, el caso resulta especialmente adecuado para evaluar un gemelo digital turístico porque combina una estructura arquitectónica singular, un espacio público abierto y áreas de acceso controlado. Esta condición genera distintos niveles de observabilidad y gestión. En la Plaza de la Encarnación no existe un control formal de acceso, por lo que resultan relevantes las cámaras y los datos móviles agregados. En cambio, en espacios interiores o controlados, el ticketing y los contadores físicos permiten estimar ocupación con mayor precisión. La combinación de ambos tipos de espacio obliga a utilizar una estrategia de datos multifuente.

La problemática de gestión se relaciona con la variabilidad de la demanda, la concentración de personas en puntos críticos y la convivencia de perfiles diversos. Entre los retos principales se encuentran la formación de colas, los puntos de conflicto, la gestión de accesos, los procesos de ticketing, la optimización de recorridos internos y la mejora de la accesibilidad para personas con movilidad reducida. El ticketing constituye un reto operativo porque no solo registra entradas, sino que condiciona el ritmo real de acceso: los tiempos de compra, validación y espera pueden generar colas y afectar a la distribución de visitantes en taquillas, accesos, mirador y recorridos internos. La infraestructura debe absorber picos de demanda sin comprometer seguridad, legibilidad espacial ni confort.

El alcance espacial y funcional del análisis comprende áreas de tránsito, estancia, acceso y concentración. Las dimensiones consideradas se articulan en cinco ejes: aforo y ocupación por zonas; flujos peatonales y direcciones predominantes; congestión e identificación de puntos críticos; accesibilidad y experiencia de usuario; y operación y mantenimiento. El objetivo del estudio no se circunscribe a la mera cuantificación de los accesos al espacio, sino que persigue caracterizar los patrones de movimiento, las zonas de concentración y los tiempos de permanencia, con el fin de fundamentar decisiones orientadas a la mejora de la experiencia del visitante y de la seguridad.

El gemelo digital se plantea como una representación virtual dinámica de la infraestructura, basada en datos reales capturados mediante sensores, cámaras, ticketing y fuentes móviles anonimizadas. Sus principales beneficiarios son los gestores de la infraestructura, responsables de operación, mantenimiento y optimización del espacio; los visitantes y usuarios del espacio público, que se benefician de una gestión más eficiente de aforo, seguridad y confort; y las administraciones o sistemas

de gestión urbana, que pueden utilizar la información para coordinar acciones de movilidad y sostenibilidad.

El caso contempla condiciones ordinarias y situaciones especiales. En condiciones ordinarias, el objetivo es caracterizar patrones habituales y detectar oportunidades de mejora. En situaciones especiales, como eventos, alta afluencia o climatología adversa, el objetivo es anticipar sobrecargas y evaluar medidas preventivas. Esta dualidad entre operación diaria y escenarios críticos justifica el uso combinado de monitorización, predicción y simulación.

## 5 Arquitectura del gemelo digital

La arquitectura del gemelo digital de Setas de Sevilla se concibe como una plataforma modular para la integración, procesamiento, análisis, simulación y visualización de datos relativos a la movilidad peatonal y a la operación de la infraestructura. Su finalidad no es solo representar el estado actual del espacio, sino convertir datos heterogéneos en información útil para la gestión operativa, la predicción de demanda, la generación de alertas y la evaluación de escenarios.

La arquitectura responde a una lógica de gestión inteligente: captura datos, los depura y armoniza, los almacena, los procesa con modelos analíticos y predictivos, y los expone en interfaces orientadas a la toma de decisiones.

La Figura 2 muestra una visualización 3D de Setas de Sevilla implementada en AnyLogic, utilizada como soporte para la representación espacial del sistema y la simulación del comportamiento peatonal en el caso de uso.



Figura 2. Visualización 3D de Setas de Sevilla en AnyLogic

Las fuentes integradas incluyen cámaras distribuidas por la infraestructura, datos móviles anonimizados, registros de ticketing, meteorología, mantenimiento y modelos espaciales 2D/3D. Las cámaras capturan flujos, conteos, mapas de calor y direcciones de movimiento; los datos móviles permiten estimar presencia y patrones de estancia en áreas abiertas; el ticketing aporta series históricas y previsiones de visitas; la meteorología contextualiza variaciones de demanda; y el mantenimiento permite relacionar incidencias con condiciones de explotación.

Tabla 1. Fuentes de datos integradas en el gemelo digital

Fuente de datos	Información aportada	Uso dentro del gemelo digital
Cámaras	Conteos, flujos peatonales, mapas de calor y direcciones de movimiento	Monitorización espacial, detección de congestión y análisis de rutas
Ticketing	Entradas, histórico de visitas y patrones horarios	Predicción de demanda y validación del aforo en zonas controladas
Datos móviles anonimizados	Presencia agregada, procedencia y patrones de estancia	Estimación de ocupación en zonas abiertas y caracterización de visitantes
Meteorología	Temperatura, lluvia y condiciones externas	Variable exógena para la predicción y el análisis de escenarios
Mantenimiento	Incidencias, estado operativo y registros técnicos	Relación entre operación, seguridad y respuesta ante incidencias
Modelo espacial 2D/3D	Zonificación, recorridos y geometría del espacio	Soporte para visualización y simulación de escenarios

La primera capa corresponde a la captura e ingesta de datos. En ella se recogen señales de cámaras, sensores, ticketing, telefonía móvil anonimizada, meteorología y mantenimiento. Los datos se almacenan en una base de datos que permite centralizar información dinámica e histórica. Esta capa debe garantizar trazabilidad, calidad y acceso controlado, ya que el sistema trabaja con datos de distinta resolución temporal, granularidad espacial y finalidad operativa.

La capa analítica transforma los datos capturados en información operativa. En ella se ubican los algoritmos de visión por computador, los modelos predictivos, los cálculos de indicadores y los procedimientos de simulación. En movilidad peatonal, la inteligencia artificial permite detectar y seguir personas de forma anónima mediante un detector tipo YOLO y un seguimiento temporal posterior, a partir de los cuales se extraen trayectorias, mapas de calor y puntos de congestión. Esta información alimenta visualizaciones, alertas y simulaciones, diferenciando el gemelo digital de un simple panel de monitorización.

La capa de simulación permite ejecutar escenarios what-if mediante modelos 2D/3D, fusión de datos en tiempo real y modelado multiagente. En el caso de Setas de Sevilla, AnyLogic permite representar la dinámica peatonal del recinto, analizar colas, evaluar puntos de conflicto y comparar alternativas operativas. La capa de visualización expone dashboards de ocupación, mapas de calor, patrones de origen/residencia, predicciones de ticketing, histórico de alertas, resultados de simulación y registros de mantenimiento.

Finalmente, el sistema incorpora requisitos de seguridad, privacidad e interoperabilidad. El uso de cámaras y datos móviles exige anonimización, cumplimiento del Reglamento General de Protección de Datos (RGPD) desde el diseño, autenticación, cifrado y control de acceso. El RGPD es el marco normativo europeo que regula el tratamiento de datos personales y exige principios como minimización, proporcionalidad, limitación de finalidad y protección de la privacidad. Desde la perspectiva de interoperabilidad, el gemelo se concibe dentro de una arquitectura de supermanzana digital que puede requerir modelos estructurados y estándares como CityGML, IFC o JSON-LD. La arquitectura se interpreta como una cadena de valor del dato: captura, validación, almacenamiento, analítica, visualización y traducción en acciones operativas.

## 6 Metodología

La metodología responde al carácter aplicado del caso de uso. El objetivo no es desarrollar un modelo teórico aislado, sino describir cómo un gemelo digital puede apoyar la gestión operativa y estratégica de una infraestructura turística compleja. La metodología se organiza como una secuencia de fases orientadas a transformar datos del espacio físico en información útil: delimitación funcional, captura de datos, integración y armonización, procesamiento mediante inteligencia artificial, predicción de demanda, simulación de escenarios, definición de indicadores y validación.

La Figura 3 resume el flujo metodológico general adoptado en el caso de uso, desde la integración de fuentes de datos hasta la obtención de indicadores clave de rendimiento para la gestión de la infraestructura.

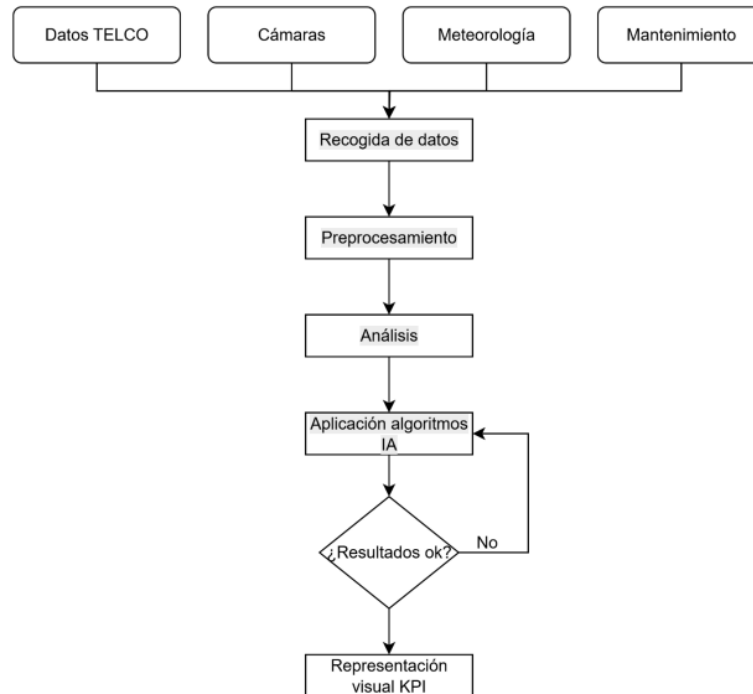


Figura 3. Flujo metodológico general del caso de uso

La delimitación funcional considera Setas de Sevilla como una infraestructura turística de gestión dinámica. El análisis incluye accesos, plaza, zonas comerciales, núcleos verticales, áreas de espera, recorridos internos, pasarelas y mirador. Esta delimitación permite estudiar interacciones entre tránsito y estancia, así como puntos donde aparecen acumulaciones, interferencias entre flujos o dificultades de accesibilidad. Las necesidades de gestión se traducen en requisitos operativos: control de aforo, organización de colas, mejora de accesibilidad, detección de puntos críticos, anticipación de demanda y generación de alertas.

La captura de datos adopta un enfoque multifuente. Las cámaras observan flujos, conteos, direcciones predominantes y zonas de acumulación. Los datos móviles anonimizados aportan información agregada sobre presencia y patrones de estancia en áreas exteriores. El ticketing permite construir series históricas de demanda y validar accesos en zonas controladas. Los contadores físicos complementan la ocupación, la meteorología contextualiza variaciones y los registros de mantenimiento introducen información sobre incidencias o condiciones de explotación. El tratamiento se plantea siempre de forma agregada y anónima, orientado a patrones colectivos y no a identificación individual.

La integración de datos implica ordenar, depurar, sincronizar y estructurar información con distintas frecuencias, formatos y granularidades. Esta fase convierte datos dispersos en un sistema de información operativo. Permite relacionar validaciones de ticketing con mapas de calor, vincular incidencias con cambios de recorrido o comparar presencia en plaza con ocupación en zonas controladas. A partir de los datos integrados se generan indicadores como aforo por zona, intensidad de flujo, tiempo de espera, densidad peatonal, rutas frecuentes y episodios de congestión.

El procesamiento mediante visión por computador se organiza en detección de personas, seguimiento temporal y extracción de métricas. Para la detección se emplea un algoritmo tipo YOLO, mientras que

el seguimiento asocia detecciones sucesivas para reconstruir trayectorias de forma anónima; a partir de ello se generan conteos, densidades, mapas de calor, tiempos de permanencia, direcciones predominantes y rutas frecuentes. La robustez del procesamiento debe considerar iluminación, sombras, reflejos, meteorología, oclusiones, perspectiva de cámara y cambios de densidad.

La predicción de demanda utiliza series temporales y variables contextuales para estimar afluencias futuras. El ticketing es la fuente central para construir patrones por franja horaria, día de la semana, temporada o eventos. Para ello se seleccionó una muestra correspondiente a un histórico aproximado de dos años, cruzada con información meteorológica y variables de calendario, con el fin de alimentar el módulo predictivo desarrollado en Python. La predicción se interpreta como entrada para la gestión: si el sistema anticipa alta afluencia, pueden activarse medidas preventivas como refuerzo de personal, reorganización de colas, señalización dinámica o adaptación de accesos.

La simulación de escenarios se apoya en un modelo basado en agentes implementado en AnyLogic. Permite analizar el comportamiento de la infraestructura bajo condiciones ordinarias y especiales, como alta demanda, eventos, evacuación o climatología adversa. El escenario base actúa como referencia para comparar cambios, mientras que los escenarios especiales permiten evaluar formación de colas, puntos de conflicto, gestión de accesos y procesos de ticketing. Esta fase permite pasar de la observación al análisis prospectivo.

La evaluación se basa en indicadores agrupados en seis dimensiones: aforo y ocupación, tiempo, congestión, flujo, accesibilidad/comfort y operación. Estos indicadores no solo valoran la precisión técnica del modelo, sino también su utilidad para resolver problemas reales de gestión. La validación compara salidas del gemelo digital con datos observados, ajustando parámetros de demanda, velocidad, elección de rutas, capacidad efectiva, umbrales de evitación, respuesta ante saturación y áreas de espera. Tras cada calibración, el modelo debe validarse en escenarios diferentes para comprobar su generalización.

## 7 Resultados y discusión

Los resultados se organizan en torno a la contribución del gemelo digital a la gestión de Setas de Sevilla. El principal resultado no es únicamente la creación de un prototipo digital, sino la construcción de un sistema capaz de transformar datos heterogéneos en información accionable. El gemelo proporciona una base para comprender la dinámica peatonal, anticipar demanda, identificar zonas de congestión, evaluar medidas de mejora y apoyar decisiones en tiempo real o en planificación.

Un primer resultado técnico es la integración de fuentes de información en una arquitectura común. El sistema combina cámaras, datos móviles anonimizados, ticketing, meteorología y mantenimiento. Esta integración permite representar presencia de personas, entradas y salidas, distribución espacial, procedencia agregada, ocupación en zonas controladas, influencia de variables externas e incidencias operativas. Frente a enfoques basados en aforos puntuales, el gemelo permite una lectura continua del espacio.

El pipeline de inteligencia artificial transforma vídeo y datos agregados en métricas de movilidad. A partir de detecciones y trayectorias, el sistema produce conteos por zona, flujos entre áreas, densidades, mapas de calor, tiempos de permanencia, rutas habituales y episodios de congestión. Estas métricas pueden utilizarse en tiempo real para monitorización y de forma histórica para comparar franjas horarias, días, eventos o temporadas. La combinación con datos TELCO refuerza la estimación de afluencia y permite caracterizar presencia en zonas abiertas.

En predicción de demanda, se evaluó un modelo ARIMAX con variables exógenas frente a un modelo de referencia o baseline ingenuo estacional semanal. Este baseline consiste en usar como predicción el comportamiento observado en la misma franja horaria de semanas anteriores, por lo que representa una referencia sencilla frente a la que comprobar si el modelo avanzado aporta valor. El entrenamiento se realizó sobre un histórico de ticketing de aproximadamente dos años, cruzado con variables meteorológicas y de calendario. También se evaluó la transformación  $\log(1+y)$ , que equivale a aplicar  $\log(1+y)$  a la serie de visitantes para suavizar picos de demanda y estabilizar la variabilidad. La métrica empleada fue el NRMSE, o error cuadrático medio normalizado, que expresa el error de

predicción en términos relativos y permite comparar modelos; cuanto menor es su valor, mejor es el ajuste. El mejor modelo incorpora temperatura media durante horario de apertura, horas de lluvia en horario de apertura e indicador de fin de semana, alcanzando un NRMSE aproximado del 8,7 % y una mejora cercana al 22 % frente al baseline. Estos valores indican un resultado favorable, ya que el modelo reduce de forma apreciable el error respecto a una predicción estacional simple y se mantiene por debajo del 10 % de error normalizado.

La simulación de escenarios aporta una segunda capacidad central. El escenario base se construye a partir del 30 de marzo de 2025, seleccionado como día habitual, con 2.971 visitantes identificados a partir del ticketing histórico y contrastados con datos TELCO. La distribución horaria se obtiene a partir de cámaras en plaza e infraestructura, mientras que los tiempos de estancia se parametrizan mediante distribución triangular con apoyo del personal operativo y datos observados. Este enfoque permite que el modelo no dependa solo de supuestos genéricos, sino de datos propios de la infraestructura.

Además del escenario base, se simulan escenarios especiales: calor extremo, asociado al 12 de agosto de 2025, y alta afluencia, asociado al 15 de noviembre de 2025. La comparación permite analizar cómo cambian indicadores cuando se introducen condiciones no habituales. Las salidas incluyen resultados globales, histogramas de espera media y mapas de calor en taquillas. Desde la gestión turística, estos resultados permiten identificar presión operativa, zonas con riesgo de acumulación y medidas para mantener niveles aceptables de seguridad, accesibilidad y confort.

La Figura 4 muestra los resultados visuales obtenidos para el escenario base.



Figura 4. Resultados visuales de simulación del escenario base

La validación y calibración muestran que el modelo de simulación puede ajustarse frente a datos reales. En este proceso se calibran parámetros como la demanda por franja horaria, los tiempos de estancia, la velocidad de desplazamiento, la elección de rutas, los tiempos de servicio en taquillas y la capacidad efectiva de determinadas zonas. Las diferencias mostradas en la Tabla 2 representan la distancia entre los valores simulados y los valores observados en la infraestructura. En el escenario de alta afluencia del 15/11/2025, la media por hora de visitantes en la estructura coincide con el valor real de 163 visitantes/hora. Tras la calibración, la diferencia en tiempo medio de estancia dentro de la estructura se reduce de 3,58 a 1,29 minutos; la diferencia en visitantes en taquillas pasa de 8 a 3; el tiempo medio de espera en cola reduce su diferencia de 2,3 a 0,6 minutos; y la diferencia de visitantes en el mirador pasa de 10 a 2. Por tanto, los valores simulados después de la calibración se aproximan más a los valores reales, lo que refuerza la utilidad del modelo como herramienta contrastable y no solo como representación visual.

Tabla 2. Resultados de calibración del modelo en escenario de alta afluencia

Indicador	Diferencia antes de calibrar	Diferencia después de calibrar
Tiempo medio de estancia en la estructura	3,58 min	1,29 min
Visitantes en taquillas	8 visitantes	3 visitantes
Tiempo medio de espera en cola	2,3 min	0,6 min
Visitantes en mirador	10 visitantes	2 visitantes

Desde el punto de vista operativo, el gemelo digital aporta cinco beneficios principales. Primero, mejora la observabilidad del espacio mediante una visión integrada de aforos, ocupaciones, colas, flujos, mapas de calor, procedencias, predicciones e incidencias. Segundo, permite anticipar picos de demanda y preparar recursos. Tercero, facilita evaluar alternativas como rutas unidireccionales, reorganización de colas, separación de flujos o modos de operación para eventos. Cuarto, ayuda a priorizar actuaciones en puntos con fricción o acumulación. Quinto, incorpora mantenimiento e incidencias dentro de la lógica de seguridad, reforzando prevención y respuesta.

Los resultados también apuntan a beneficios sociales. En accesibilidad universal, el sistema permite identificar barreras, discontinuidades, zonas de espera problemáticas e interferencias entre flujos. En seguridad, ayuda a reducir acumulaciones y mejorar la organización de colas, lo que incide tanto en seguridad real como percibida. En confort, permite equilibrar tránsito y permanencia mediante análisis de mapas de calor y tiempos de estancia. En eficiencia del recorrido, identifica rutas frecuentes, puntos de indecisión y tramos con pérdida de fluidez, facilitando mejoras de señalización y orientación de visitantes.

La discusión del caso muestra que las medidas más efectivas combinan estrategias activas y pasivas. Las activas incluyen reconfiguración de flujos, gestión de colas, señalización dinámica, tratamiento de puntos críticos y operación en modo evento. Las pasivas comprenden criterios de aforo por zonas, protocolos para personas con movilidad reducida, regulación de eventos y pautas de operación sostenible. Esta combinación permite actuar en situaciones ordinarias y en picos de demanda, reduciendo improvisación y facilitando una operación más previsible.

Entre los retos abordados destacan la integración de fuentes heterogéneas, la transformación de datos no estructurados en indicadores operativos, la incorporación de predicción con variables contextuales, la simulación de escenarios sin intervenir físicamente en el espacio y la validación frente a datos reales. No obstante, persisten limitaciones asociadas a sincronización de fuentes, calidad de datos, dependencia de sistemas físicos, privacidad e interoperabilidad. Estas limitaciones obligan a mantener procesos de validación continua, trazabilidad y revisión periódica de umbrales y supuestos del modelo.

## 8 Conclusiones y líneas futuras

El artículo presenta un caso de uso aplicado de gemelo digital para la gestión de una infraestructura turística urbana, tomando como referencia Setas de Sevilla en el marco del proyecto SUSTAIN. La principal conclusión es que el valor del gemelo digital no reside únicamente en monitorizar el estado del espacio, sino en integrar fuentes heterogéneas, construir una visión operativa coherente y generar información accionable para la gestión diaria y estratégica.

El caso de estudio corrobora la necesidad de conceptualizar las infraestructuras turísticas urbanas como sistemas peatonales complejos, en los que la experiencia del visitante está condicionada por la interacción entre aforo, accesibilidad, legibilidad espacial, seguridad, confort y capacidad de respuesta ante picos de demanda. Setas de Sevilla constituye un escenario paradigmático al integrar espacio turístico, espacio público, zonas controladas y áreas abiertas, lo que exige una aproximación analítica multifuente y un modelo de gestión adaptativa.

El gemelo digital permite evolucionar desde una gestión reactiva hacia una gestión anticipativa. La integración de datos en tiempo real, predicción, simulación y alertas permite identificar patrones, prever saturaciones, analizar formación de colas y evaluar medidas antes de implantarlas. La arquitectura modular facilita además la incorporación de nuevas fuentes, la evolución del sistema y su adaptación a otros escenarios.

Desde el punto de vista social, los beneficios no se limitan a eficiencia operativa. La información generada puede orientar mejoras de accesibilidad universal, seguridad real y percibida, confort, calidad de estancia y eficiencia del recorrido. La combinación de estrategias activas y pasivas refuerza la capacidad del sistema para actuar en la operación diaria y consolidar mejoras mediante protocolos revisables.

Como líneas futuras, se propone extender el alcance del gemelo digital al entorno urbano inmediato de Setas de Sevilla, incorporando calles adyacentes y dinámicas de llegada y dispersión de visitantes. También se plantea reforzar su uso en gestión de emergencias e incidencias, consolidar una batería mínima de KPIs operativos, establecer ciclos periódicos de validación con el operador y explorar la replicabilidad del enfoque en otras infraestructuras turísticas urbanas con problemas similares de afluencia variable, congestión, accesibilidad y convivencia entre visitantes y usuarios cotidianos.

## Referencias

- [1] Mazzetto, S. (2024). A review of urban digital twins integration, challenges, and future directions in smart city development. *Sustainability*, 16(19), 8337. <https://doi.org/10.3390/su16198337>
- [2] Lei, B., Janssen, P., Stoter, J., & Biljecki, F. (2023). Challenges of urban digital twins: A systematic review and a Delphi expert survey. *Automation in Construction*, 147, 104716. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104716>
- [3] Baggio, R., Micera, R., & Del Chiappa, G. (2020). Smart tourism destinations: A critical reflection. *Journal of Hospitality and Tourism Technology*, 11(3), 407-423. <https://doi.org/10.1108/JHTT-01-2019-0011>
- [4] Almeida, D. S. de, Abreu, F. B. e, & Boavida-Portugal, I. (2025). Digital twins in tourism: A systematic literature review. arXiv:2502.00002.
- [5] Fan, Z., Zhang, H., Zhang, Z., Lu, G., Zhang, Y., & Wang, Y. (2022). A survey of crowd counting and density estimation based on convolutional neural network. *Neurocomputing*, 472, 224-251. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.12.037>
- [6] Lakmali, R. G. N., Kusumastuti, D., & others. (2024). Evaluating the efficacy of agent-based modeling in analyzing pedestrian dynamics within the built environment: A comprehensive systematic literature review. *Buildings*, 14(7), 1945. <https://doi.org/10.3390/buildings14071945>
- [7] Senanayake, G. P. D. P., Kieu, M., Zou, Y., & Dirks, K. (2024). Agent-based simulation for pedestrian evacuation: A systematic literature review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 104705. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104705>