

DIGITAL TWINS FOR URBAN TRAFFIC LIGHTS: AN INDUSTRY 4.0 APPROACH

GEMELOS DIGITALES PARA LA SEMAFORIZACIÓN URBANA: UN ENFOQUE DESDE LA INDUSTRIA 4.0



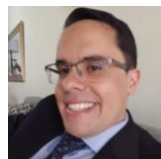
Vargas, Oscar



Rincón,
Miguel



Dueñas,
Rodrigo



Remolina,
Mario



Salas, José

RESUMEN

Este estudio analizó la influencia de semáforos inteligentes en la seguridad vial y el tráfico urbano, basándose en investigaciones previas sobre la integración de los gemelos digitales y tecnologías emergentes. Se aplicó un enfoque cualitativo con diseño documental. Los resultados demostraron que los semáforos modernos mejoran significativamente la seguridad vial y reducen accidentes. No obstante, persisten desafíos como la complejidad computacional y la adaptación del usuario. Por ello, para futuras investigaciones se requieren abordar estas limitaciones y maximizar el potencial de los semáforos inteligentes en entornos urbanos.

Palabras clave: gemelos digitales, semáforos inteligentes, seguridad vial, industria 4.0, tecnologías emergentes.

ABSTRACT

This study analyzed the influence of intelligent traffic lights on road safety and urban traffic, based on previous research on the integration of digital twins and emerging technologies. A qualitative approach with documentary design was applied. The results showed that modern traffic lights significantly improve road safety and reduce accidents. However, challenges such as computational complexity and user adaptation remain. Therefore, future research needs to address these limitations and maximize the potential of intelligent traffic lights in urban environments.

Key words: digital twins, intelligent traffic lights, road safety, industry 4.0, emerging technologies.

Fecha de recepción: 06/09/2024

Fecha de aprobación: 07/07/2025

Fecha de publicación online: 07/07/2025

DOI: <http://doi.org/10.5281/zenodo.17095709>

¹ Colombia. Tecnólogo en Mecánica Automotriz Estudiante de Ingeniería Mecánica. Correo electrónico: oscard.vargasa@ecci.edu.co orcid: <https://orcid.org/0009-0005-6180-6598>

² Colombia. Tecnólogo en Mecánica Automotriz. Estudiante de Ingeniería Mecánica. correo electrónico: miguel.rinconr@ecci.edu.co Orcid <https://orcid.org/0009-0000-3891-1182>

³ Colombia. Ing. Mecánico. Esp. en Administración de Empresas. Mg. en Ingeniería con énfasis en Mecánica. Director de INNOVATER LTDA, sede Bogotá. Docente catedrático en la Universidad de los Llanos (UNILLANOS). rduenasbueno@unillanos.edu.co <https://orcid.org/0009-0003-0801-1281>

⁴ Colombia. Ing. Mecánico. Mg en Ingeniería. Docente en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y en el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). Investigador en el Grupo GICEMET del SENA y en el Grupo DIMA de la Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: mjremolinal@sena.edu.co Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0806-5856>

⁵ Ing. Mecánico e Industrial. Maestría en Gerencia de Mantenimiento. Doctorado en Ciencias de la Educación. Profesor, Facultad de Ingeniería, Fundación Universitaria Cafam - Universidad ECCI Correo electrónico: jsalash@ecci.edu.co Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6601-2720>

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, tecnologías digitales avanzadas como los sistemas ciberfísicos (SCF), el Internet de las Cosas (IoT), la computación en la nube y de borde, Big Data, el aprendizaje automático (ML), la inteligencia artificial (IA) y los gemelos digitales (DTs) han transformado sectores como la industria 4.0 y 5.0. Estas herramientas integran detección, automatización, control y optimización en tiempo real, contribuyendo a soluciones más sostenibles y limpias (Ranawaka et al., 2024). Particularmente, los DTs combinan los mundos físico y digital, creando modelos virtuales de objetos o sistemas del mundo real, lo que permite un flujo continuo de datos para mejorar la gestión y planificación en ecosistemas urbanos y ciudades inteligentes (Zhao et al., 2024; Mazzetto, 2024).

Actualmente, las ciudades inteligentes se conciben como auténticos ecosistemas tecnológicos y sostenibles, cuyo propósito central radica en afrontar desafíos apremiantes como la congestión del tráfico y la sostenibilidad ambiental. Para ello, la integración estratégica de tecnologías digitales recurre para promover una mejor calidad de vida para sus habitantes (Shulajkovska et al., 2024). Así, estas ciudades se convierten en espacios donde la tecnología y la sostenibilidad se integran para mejorar la calidad de vida de las personas, impulsando un avance significativo hacia un futuro urbano más resiliente y eficiente, especialmente considerando al transporte como eje para el desarrollo sostenible.

Los Gemelos Digitales (o DTs) desempeñan un papel fundamental en las ciudades inteligentes al vincularse con redes IoT, mientras que analizan datos en tiempo real y simulan escenarios para optimizar recursos urbanos como tráfico, energía y seguridad urbana (Shulajkovska et al., 2024). La inclusión de soluciones como la "semaforización inteligente" pueden ser la clave para abordar problemáticas urbanas relacionados con la congestión vial y el transporte público, gracias a todo esto, los resultados pueden facilitar la planificación y optimización de rutas, la seguridad vial, reducción de tiempos de espera y consumo energético. Estas iniciativas impulsan la sostenibilidad, la participación ciudadana, la ciberseguridad, el uso de datos abiertos (para la colaboración), y resiliencia en entornos urbanos (Wei et al., 2024).

Con base en lo mencionado se formula la siguiente interrogante: ¿Cómo influye la implementación de semáforos inteligentes, basados en la integración de gemelos digitales y tecnologías emergentes, en la mejora de la seguridad vial y la fluidez del tráfico urbano, según la evidencia de investigaciones previas? El presente estudio analizó la influencia de semáforos inteligentes en la seguridad vial y el tráfico urbano, basándose en investigaciones previas sobre la integración de los gemelos digitales y tecnologías emergentes.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

GEMELOS DIGITALES

Los gemelos digitales (DTs) se definen como "representaciones virtuales" de activos físicos (como objetos, personas, procesos o sistemas) que simulan comportamientos para mejorar la comprensión, enseñanza, aprendizaje y optimización de estos activos. (Hananto et al., 2024). Comenzaron en la industria 4.0 como modelos que reflejan en tiempo real los activos físicos; no obstante, estos se han expandido a sectores como la salud, la aviación y las ciudades inteligentes, integrando los mundos físicos y digital.

Esta expansión ha mejorado la eficiencia de los procesos y optimizado recursos, facilitando la personalización masiva y aumentando la competitividad. Por otro lado, su adopción impulsa la convergencia de tecnologías avanzadas como los Sistemas Ciberfísicos (CPS), IoT, Big Data e Inteligencia Artificial (IA) (Ranawaka et al., 2024; Roumeliotis et al., 2024; Varzeshi et al., 2024; Park y Kang, 2024). Los gemelos digitales "DTs" están demostrando su eficacia en el desarrollo de ciudades inteligentes como tecnología complementaria a la inteligencia artificial.

En función de lo planteado, su uso facilita la interacción y el rendimiento entre los elementos de la red, ayudando a los operadores en la toma de decisiones, especialmente en situaciones de fallas o ciberataques (Kahawala et al., 2024; Mchirgui et al., 2024; Ning et al., 2024; Hananto et al., 2024).

La implementación de este tipo de modelos en los contextos urbanos, según lo indicado por los autores, favorece la optimización de procesos en el ecosistema urbano, desarrollando sistemas adaptativos, seguros y resilientes, lo cual contribuye a planificar ciudades más sostenibles. Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos importantes, como la seguridad de los datos, la trazabilidad y la interoperabilidad, lo que implica que es necesario desarrollar soluciones más robustas que garanticen la eficiencia operativa, reducción de costos y permitan promover la innovación en diversas industrias (Roumeliotis et al., 2024; Park y Kang, 2024).

CONTEXTO URBANO

Desde otra perspectiva conceptual, las ciudades inteligentes aprovechan soluciones tecnológicas innovadoras para mejorar la calidad de vida, optimizando servicios urbanos, reduciendo costos y promoviendo la participación ciudadana. Por consiguiente, estas ciudades recopilan datos en tiempo real sobre tráfico, calidad del aire y consumo energético, gestionan la seguridad del transporte público y

mitigan riesgos de desastres mediante algoritmos de IA que optimizan las operaciones urbanas y fortalecen la resiliencia (Kahawala et al., 2024; Varzeshi et al., 2024; Park y Kang, 2024). Para autores como Liu et al. (2024) herramientas como los gemelos digitales son clave para el desarrollo de infraestructuras urbanas, mejorando la calidad de vida y el crecimiento económico al optimizar la construcción de ciudades, edificios y carreteras, impactando así directamente en la vida cotidiana de los residentes.

Por otro lado, con respecto al transporte público, la implementación de sistemas basados en IA, como el reconocimiento facial y el análisis de comportamiento, permite detectar actividades sospechosas, contribuyendo así con las condiciones de seguridad en el transporte público. A su vez, el análisis de Big Data puede optimizar protocolos de seguridad y respuestas de emergencia, abordando desafíos críticos de transporte y logística, mientras aumenta la eficiencia operativa y la logística urbana (Park y Kang, 2024).

Las investigaciones citadas, confirman que la incorporación de herramientas de inteligencia artificial y de análisis de datos, favorece la eficiencia operativa de uno de los pilares más importantes en el esquema de transporte de las ciudades y además permite crear soluciones más adaptables a las diferentes circunstancias del entorno, haciendo los espacios urbanos más seguros.

La Industria 5.0 se enfoca en la integración de las personas y el medio ambiente, con lo cual, aunado a los DTs, a pesar de que la implementación aún es limitada, contribuyen a transformar áreas metropolitanas y a integrar industrias de bajas emisiones. Sin importar esta limitación, muchos países han adoptado estas tecnologías para mejorar la vida diaria en ciudades, cambiando la forma en que interactúan y funcionan (Rojek et al., 2024).

MATERIALES Y METODO

En el presente artículo, se abordó el estudio del uso de semáforos inteligentes en el contexto de entornos urbanos. Para ello, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de diversas investigaciones previas, que abarcan desde el uso de gemelos digitales y el transporte inteligente, hasta el desarrollo de luces y semáforos inteligentes.

La investigación desarrollada fue de enfoque cualitativo con diseño documental y para la búsqueda de las fuentes se utilizaron bases de datos indexadas, aplicando criterios de inclusión como pertinencia temática, actualidad y respaldo académico, priorizando publicaciones entre los años 2019-2024.

Por otro lado, como criterios de exclusión, se descartaron aquellos artículos repetidos, sin validación técnica o empírica; adicionalmente, se excluyeron publicaciones anteriores a 2019, con excepción de aquellas obras con valor histórico o metodológico como Park et al. (2014).

Para organizar y entender mejor el contenido extraído de la verificación documental, se utilizó una matriz de contenido, la cual se diseñó con el fin de facilitar la categorización de la información en dimensiones clave como: aplicación de DTs en ciudades, implicaciones en la semaforización urbana, beneficios, posibles limitaciones y casos de estudio de implementación de este tipo de sistemas. Según Bardin (2002), el análisis de contenido consiste en un conjunto de técnicas sistemáticas y objetivas que permiten transformar datos cualitativos en resultados interpretables para la investigación.

En este estudio, la matriz permitió sistematizar e interpretar los resultados relacionados con gemelos digitales, semaforización urbana y tecnologías emergentes, esta técnica ha sido utilizada para la clasificación temática para hacer análisis comparativos y determinar tendencias como lo hacen autores como Liu et al., 2024; Mazzetto, 2024; Hananto et al., 2024; Matei & Cocosatu, 2024.

Para el procesamiento de datos, se agrupó la información registrada en la matriz en categorías definidas, lo que permitió identificar beneficios, desafíos, patrones de implementación y casos relevantes. Posteriormente, se aplicó una triangulación categorial contratando resultados de distintas fuentes y contextos, siguiendo principios de rigor cualitativo para obtener los resultados.

RESULTADOS

A partir de la revisión documental, se sistematizó la información mediante una matriz de análisis de contenido, lo que permitió identificar patrones, aplicaciones y desafíos de los gemelos digitales en el contexto urbano. Estos hallazgos se estructuraron mediante el uso de una matriz de análisis de contenido, lo que facilitó la sistematización temática.

En este marco, se elaboró un cuadro resumen que permite visualizar con mayor facilidad la información encontrada en la revisión documental. La Cuadro 1 destaca los aportes más relevantes de la literatura consultada, en diferentes áreas temáticas.

Cuadro 1: Resumen de Resultados. Gemelos Digitales y Semaforización Urbana

Categoría de Análisis	Hallazgos Relevantes	Referencias
Transformación urbana mediante DT	Los gemelos digitales (DT) convierten la planificación urbana en un proceso dinámico y multidimensional que involucra actores clave como la semaforización. Incrementan la eficiencia en el análisis de datos, almacenamiento y participación pública, favoreciendo la gestión urbana inteligente.	Liu et al. (2024)
Ciudad inteligente y semaforización	Las ciudades inteligentes se caracterizan por integrar tecnologías avanzadas, decisiones basadas en datos, sostenibilidad, infraestructura digital, conectividad y empoderamiento ciudadano. Estas características potencian la implementación de sistemas de semaforización adaptativa y conectada.	Matei & Cocosatu (2024); Mchirgui et al. (2024)
Optimización del tráfico	La computación de borde y los algoritmos de aprendizaje profundo mejoran la precisión de los sistemas de detección de tráfico en tiempo real. Los gemelos digitales aplicados en el modelado de movilidad permiten predecir congestiones y optimizar el flujo vehicular.	Ning et al. (2024); Shulajkovska et al. (2024)
Tecnologías emergentes integradas a DT	La integración de DT con IA, IoT y Big Data permite la recopilación y análisis en tiempo real, aumentando la precisión y eficacia en la toma de decisiones para el control del tráfico. Se destacan las capacidades de percepción, inferencia y adaptación del sistema inteligente.	Park & Kang (2024); Weichbroth et al. (2024); Yang et al. (2024)
IA y tecnologías emergentes complementarias	Al combinar IA con computación de borde, conectividad 5G y blockchain, se mejora el procesamiento, seguridad y trazabilidad de datos, facilitando el control descentralizado del tráfico urbano.	Park & Kang (2024); Roumeliotis et al. (2024)
Control adaptativo del tráfico (ATMS)	Los sistemas de gestión adaptativa del tráfico, integrados con sensores, cámaras y GPS, ajustan los semáforos en tiempo real. Esto se complementa con modelado predictivo basado en datos históricos para respuestas flexibles.	Hananto et al. (2024); Shulajkovska et al. (2024)
Casos de implementación práctica	En Corea del Sur, los semáforos LED empotrados han reducido significativamente los accidentes peatonales al mejorar la visibilidad de día y noche. En Ámsterdam y Hong Kong, se promueven estrategias similares dentro de políticas de movilidad inteligente.	Kang & Kim (2023); Shulajkovska et al. (2024); Paiva et al. (2021)
Modelos de simulación y algoritmos inteligentes	Modelos computacionales permiten evaluar la capacidad vial y prever escenarios. El algoritmo híbrido PSO-GWO ha demostrado ser eficaz en la optimización de semáforos, al igual que otros modelos que han reducido emisiones y mejorado el flujo de tráfico.	Shamlitsky et al. (2024); Qasim et al. (2024); Kumarasamy et al. (2024)
Beneficios	Mejora de la seguridad vial, reducción de accidentes, aumento en la eficiencia del tráfico, disminución de emisiones y adaptación de los sistemas a contextos urbanos complejos mediante la IA.	Kang & Kim (2023); Kumarasamy et al. (2024)
Desafíos y limitaciones	Posible confusión de los conductores frente a tecnologías no convencionales como semáforos empotrados; además, se enfrentan retos técnicos como la complejidad computacional y la integración de datos urbanos diversos. Se requiere adaptación contextual para garantizar la efectividad de los sistemas.	Kang & Kim (2023); Varzeshi et al. (2024)

Fuente: Elaboración propia a partir de autores (2024)

Como se puede observar en Cuadro 1, los gemelos digitales pueden ser una herramienta instrumental en la gestión del tráfico, permiten además cumplir una función articuladora dentro de los complejos ecosistemas que son las ciudades, haciéndola más inteligente y articulada. Su implementación en el ámbito de la semaforización refleja una evolución de visiones más tradicionales de control de tráfico hacia sistemas más adaptables al contexto urbano.

Autores como Liu et al. (2024) afirman que los DT conviertan la planificación urbana en un proceso dinámico. Por otro lado, Matei y Cocosatu (2024), desarrollan cómo las ciudades inteligentes toman sus decisiones basándose en los datos, la infraestructura conectada y la participación ciudadana. Estos elementos generan un ambiente favorecedor para la implementación de este tipo de semáforos inteligentes. Por otro lado, el uso de los gemelos digitales en la planificación urbana inteligente y su funcionalidad se ve ampliada por la integración con tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, el internet de las cosas (IoT) y el análisis de Big Data. Estos elementos permiten la recopilación y procesamiento de datos en tiempo real, haciendo que los sistemas de semaforización sean adaptables al entorno.

De acuerdo con Weichbroth et al. (2024), la inteligencia artificial capacita a un gemelo digital con capacidades de percepción, inferencia y adaptación, esto permite anticipar patrones de movilidad y ejecutar respuestas operativas precisas. Asimismo, abarca la comprensión del lenguaje, el reconocimiento de imágenes, la toma de decisiones, la resolución de problemas, entre otros (Yang et al., 2024). Complementariamente, el análisis de Big Data y la aplicación de su enfoque de las “siete V” (volumen, velocidad, variedad, veracidad, variabilidad, visualización y valor), proporciona un marco integral para gestionar conjuntos de datos de alta complejidad. Según autores como Weichbroth et al. (2024), esta arquitectura permite almacenar, e interpretar datos de forma confiable y en tiempo real. Esto ayuda a los sistemas basados en gemelos digitales a que puedan ajustarse y adaptarse a diferentes variables operativas de manera eficiente.

En una línea similar, Park y Kang (2024) desarrollan que la integración de la IA con las tecnologías emergentes como la computación de borde, la conectividad 5G y blockchain optimiza la seguridad de los datos, trazabilidad y la descentralización del control tráfico. Complementariamente, Blockchain es una solución prometedora a estos desafíos de seguridad al eliminar la necesidad de una autoridad centralizada. Además, esta mejora la transparencia y la trazabilidad en la gestión de la cadena de suministro (Roumeliotis et al., 2024). La bibliografía revisada encuentra que en el plano operativo se han documentado mejoras en aspectos como la eficiencia y la seguridad. Los sistemas ATMS (Advanced Traffic Management Systems), sustentados en sensores, cámaras y datos de GPS, ajustan la semaforización en tiempo real, tal y como lo exponen autores como Hananto et al. (2024) y Shulajkovska et al. (2024). Autores como Qasim et al. (2024) y Kumarasamy et al. (2024), indican que los modelos de predicción, como el PSO- GWO, han demostrado reducciones en los tiempos de espera, aumentando el flujo vehicular y reducción de emisiones.

Los hallazgos expuestos en los bloques anteriores desarrollan una base conceptual y técnica sobre los gemelos digitales (DT) en la semaforización urbana, esto a partir de la revisión bibliográfica. Adicionalmente, se revisaron algunos casos que permiten entender cómo estas tecnologías se han aplicado en otros contextos y experiencias internacionales. Esto permite evaluar la viabilidad y adaptabilidad de estos sistemas en contextos reales.

Como parte del análisis documental, se identificaron distintas experiencias internacionales que permiten evidenciar cómo los gemelos digitales se han implementado en el contexto urbano en diferentes escenarios de madurez tecnológica. En ciudades como Singapur, Helsinki y Dubái, estas tecnologías permiten modelar el entorno urbano en 3D, integrar datos en tiempo real y aplicar inteligencia artificial para optimizar procesos como la movilidad, el uso del suelo y la prestación de servicios públicos. El cuadro 2 resume algunos de los proyectos más representativos que ilustran estos hallazgos.

Cuadro 2. Resumen de las aplicaciones de Gemelos Digitales Urbanos en proyectos globales de diseño y planificación urbana.

Ciudad/ Proyecto	Ubicación	Objetivo	Características Clave	Resultados
Virtual Singapore	Singapur	Crear un modelo 3D dinámico de la ciudad y una plataforma colaborativa de datos para apoyar la planificación urbana y la toma de decisiones.	Modelado 3D, integración de datos en tiempo real, análisis para planificación urbana y simulación ambiental.	Mejora en la planificación urbana, toma de decisiones, servicios públicos y formulación de políticas.
City Zenith's Smart World OS	Varias ubicaciones	Proporcionar una plataforma digital para proyectos de construcción, ciudad e infraestructura para optimizar el rendimiento y reducir emisiones.	Integración IoT, analítica predictiva, simulación de escenarios.	Ahorro energético, eficiencia operativa y reducción de la huella de carbono en múltiples proyectos.
Helsinki 3D+	Helsinki, Finlandia	Apoyar la planificación urbana y promover el uso de datos abiertos mediante un modelo 3D integral de la ciudad.	Plataforma de datos abiertos, visualización 3D, integración con herramientas de planificación.	Mayor participación ciudadana, mejora en procesos de planificación y desarrollo de nuevos servicios digitales.
Plan IT Valley	Paredes, Portugal	Crear desde cero una ciudad inteligente incorporando gemelos digitales para sostenibilidad y planificación urbana.	Sistema operativo urbano, análisis de datos en tiempo real, modelos de sostenibilidad.	(Proyecto ambicioso; los resultados específicos dependen del estado actual y ejecución del proyecto).
Dubai's Digital Twin Initiative	Dubái, EAU	Transformar Dubái en una ciudad inteligente usando tecnología de gemelos digitales para mejorar planificación e infraestructura urbana.	Modelos 3D, IA e integración IoT para gobernanza en tiempo real y planificación urbana.	Mejor gestión de la ciudad, planificación de infraestructura e intervención ante emergencias.
The National Digital Twin	Reino Unido	Promover un enfoque unificado para gemelos digitales en entornos construidos, facilitando integración de datos y mejora en la gestión de activos.	Desarrollo de gemelos digitales urbanos (UDTs), enfoque en interoperabilidad y estándares de intercambio de datos.	Desarrollo urbano informado, sostenible y resiliente mediante mejor toma de decisiones y planificación.

Fuente: Adaptado de “A Review of Urban Digital Twins Integration, Challenges, and Future Directions in Smart City Development”, p.8337, por Mazzetto, S., 2024, *Sustainability*, 16(19).

En resumen, los casos revisados confirman que la semaforización urbana, debe ser considerada como un ecosistema interconectado y gobernado por datos, en el contexto de ciudades más eficientes, inclusivas y resilientes, la semaforización es un elemento estratégico. En esta línea, la revisión bibliográfica muestra experiencias concretas del uso de tecnologías emergentes y gemelos digitales, donde se promueve el desarrollo inteligente utilizando tecnologías avanzadas y gemelos digitales para la optimización del tráfico, sistemas de transporte inteligentes, planificación urbana y la movilidad eléctrica. (Shulajkovska et al., 2024). Adicionalmente, autores como Park & Kang, (2024) y Kang & Kim, (2023), los semáforos controlados por IA tienen un efecto en la mejora de la seguridad vial, reduciendo accidentes y aumentando la visibilidad de los peatones.

En ciudades como Hong Kong, usan un sistema de semáforos LED empotrados en el suelo, que parpadean junto con las señales de tráfico para mejorar la visibilidad. Este sistema actúa como una línea de parada psicológica para los peatones y una clara línea de límite para los conductores, alentando la conducción más lenta y reduciendo los accidentes, especialmente aquellos causados por la distracción de los peatones al usar teléfonos inteligentes mientras cruzan (Kang y Kim, 2023). Por lo tanto, estos sistemas permiten una gestión más eficiente y segura del tráfico, especialmente en zonas de alto riesgo. Tras su implementación, la tasa de accidentes ha disminuido significativamente. En un estudio que comparó las estadísticas antes y después de la instalación en el mismo lugar, se observó una reducción del 41.2% en los heridos, un 38.6% en los accidentes y un 55.1% en las muertes (Kang y Kim, 2023).

Figura 1. Semáforos LED empotrados en el suelo y el efecto de su instalación



Fuente: Adaptado de "Effects of LED Safety Induction Block on Crosswalk Accident", pp.4634–4643, por Park, D.Y., Yoo, K.K. y Choi, W.S., 2014, *J. Korea Acad.-Ind. Coop. Soc.*, (15).

Sin embargo, es importante resaltar que diversos autores también señalan algunos posibles desafíos que se pueden presentar, por ejemplo, la implementación de IA en el control de semáforos enfrenta desafíos técnicos como: la complejidad computacional y la integración de datos en ciudades inteligentes (Kang & Kim, 2023; Varzeshi et al., 2024). Desde una perspectiva similar, Kumarasamy et al. (2024), señalan que las diferencias en las condiciones locales requieren más investigación para comprender mejor el rendimiento de estos métodos en diferentes contextos.

En conjunto, los hallazgos sistematizados en este apartado permiten entender como los gemelos digitales están transformando el transporte y la gobernanza urbana al integrar Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), lo que promete revolucionar la planificación urbana y abordar problemas críticos de gestión del tráfico en las ciudades (Hananto et al., 2024).

DISCUSION

Los hallazgos encontrados en el presente estudio permiten afirmar que los gemelos digitales, poseen mucho potencial cuando se integran con tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, el internet de las cosas y el análisis de Big Data.

Los resultados permiten evidenciar que en otras ciudades del mundo ya se han dado pasos en la implementación de sistemas inteligentes de semafORIZACIÓN, apoyados por gemelos digitales; según la información encontrada de estos proyectos esta implementación ha contribuido a optimizar el flujo vehicular, reducir los índices de accidentabilidad y siniestros viales y adaptarse en tiempo real a las condiciones de las ciudades y su entorno. Ciudades como Hong Kong, Dubái, Ámsterdam y Seúl confirman la utilidad de los DTs como herramientas para simular escenarios, detectar anomalías y fortalecer los sistemas de gestión adaptativa del tráfico (ATMS), tal como lo sugiere la literatura revisada (Hananto et al., 2024; Shulajkovska et al., 2024; Kumarasamy et al., 2024).

Asimismo, para enfrentar los retos del contexto urbano y la sostenibilidad se requiere la implementación de desarrollos tecnológicos innovadores. Por ejemplo, los sistemas predictivos basados en aprendizaje automático permiten anticipar, gestionar o mitigar las congestiones viales, mientras que la gestión eficiente de los semáforos puede permitir las condiciones de movilidad, priorizar el transporte público y ser un factor contribuyente en la reducción de emisiones. De igual manera, el análisis de patrones de movilidad puede favorecer a otros usuarios de la pirámide de movilidad, como peatones, ciclistas y personas con movilidad reducida, posibilitando el ajuste de tiempos de cruce, señalización adaptativa y distribución del espacio. Esto es un paso claro a una planificación urbana equitativa, inclusiva,

alienada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los principios de transporte orientado al desarrollo.

Por otra parte, a partir de la revisión biográfica se identifican desafíos técnicos y sociales. Autores como Kang y Kim (2023) advierten que algunas soluciones, como los semáforos LED empotrados, pueden generar confusión en algunos conductores. Adicionalmente, para que las ciudades puedan implementar este tipo de sistemas requieren una infraestructura digital robusta, que propicie la interoperabilidad y una gobernanza de datos segura que además garantice la privacidad. A esto se le suma las necesidades de marco normativo especializado, requerimientos de capacidades institucionales y técnicas en la institucionalidad encargada de la movilidad. La brecha entre la necesidad de soluciones innovadoras y las capacidades operativas instaladas de la institucionalidad constituye a uno de los factores más críticos a considerar en implementaciones futuras.

CONCLUSIÓN

En conclusión, a partir del análisis realizado, se puede determinar que los gemelos digitales representan una herramienta que ofrece un potencial significativo para mejorar la gestión urbana y el transporte, mediante la modernización de los sistemas de semafORIZACIÓN. La integración de tecnologías avanzadas como la IA, IoT y Big Data, los gemelos digitales proporciona soluciones dinámicas y adaptativas que transforman la infraestructura urbana en un entorno más eficiente y seguro.

Sin embargo, la implementación de estas tecnologías enfrenta desafíos importantes como: la complejidad computacional y la necesidad de integrar datos de diversas fuentes en un sistema cohesivo. Por eso, finalmente, se destaca la importancia de una educación y adaptación gradual a estas nuevas soluciones tecnológicas que, a pesar de estos retos, la creciente adopción de gemelos digitales en la gestión de tráfico y otras áreas urbanas promete transformar las ciudades, haciéndolas más sostenibles, inclusivas y resilientes.

FINANCIAMIENTO

Esta investigación no fue financiada.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de intereses financieros ni personales que puedan influir inapropiadamente en el desarrollo de este artículo.

REFERENCIAS

- Arsecularatne, B., Rodrigo, N., & Chang, R. (2024). Digital Twins for Reducing Energy Consumption in Buildings: A Review. *Sustainability*, 16(21), 9275. <https://doi.org/10.3390/su16219275>
- Bardin, L. (2002). *Análisis de contenido*. (3.^a ed.). Madrid: Ediciones Akal.
- Hananto, A. L., Tirta, A., Herawan, S. G., Idris, M., Soudagar, M. E. M., Djamari, D. W., y Veza, I. (2024). Digital Twin and 3D Digital Twin: Concepts, Applications, and Challenges in Industry 4.0 for Digital Twin. *Computers*, 13(4), 100. <https://doi.org/10.3390/computers13040100>
- Kahawala, S., Madhusanka, N., De Silva, D., Osipov, E., Mills, N., Manic, M., & Jennings, A. (2024). Hypervector Approximation of Complex Manifolds for Artificial Intelligence Digital Twins in Smart Cities. *Smart Cities*, 7(6), 3371-3387. <https://doi.org/10.3390/smartcities7060131>
- Kang, B. G., & Kim, B. S. (2023). A Study on Cognitive Error Validation for LED In-Ground Traffic Lights Using a Digital Twin and Virtual Environment. *Mathematics*, 11(17), 3780. <https://doi.org/10.3390/math11173780>
- Kumarasamy, V. K., Saroj, A. J., Liang, Y., Wu, D., Hunter, M. P., Guin, A., & Sartipi, M. (2024). Integration of Decentralized Graph-Based Multi-Agent Reinforcement Learning with Digital Twin for Traffic Signal Optimization. *Symmetry*, 16(4), 448. <https://doi.org/10.3390/sym16040448>
- Liu, W., Lv, Y., Wang, Q., Sun, B., & Han, D. (2024). A Systematic Review of the Digital Twin Technology in Buildings, Landscape and Urban Environment from 2018 to 2024. *Buildings*, 14(11), 3475. <https://doi.org/10.3390/buildings14113475>
- Matei, A., & Cocosatu, M. (2024). Artificial Internet of Things, Sensor-Based Digital Twin Urban Computing Vision Algorithms, and Blockchain Cloud Networks in Sustainable Smart City Administration. *Sustainability*, 16(16), 6749. <https://doi.org/10.3390/su16166749>
- 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>
- Mchirgui, N., Quadar, N., Kraiem, H., & Lakhssassi, A. (2024). The Applications and Challenges of Digital Twin Technology in Smart Grids: A Comprehensive Review. *Applied Sciences*, 14(23), 10933. <https://doi.org/10.3390/app142310933>
- Ning, G., Luo, H., Yin, W., & Zhang, Y. (2024). Exploration of the Application and Practice of Digital Twin Technology in Teaching Driven by Smart City Construction. *Sustainability*, 16(23), 10312. <https://doi.org/10.3390/su162310312>
- Paiva, S., Ahad, M. A., Tripathi, G., Feroz, N., & Casalino, G. (2021). Enabling Technologies for Urban Smart Mobility: Recent Trends, Opportunities and Challenges. *Sensors*, 21(6), 2143. <https://doi.org/10.3390/s21062143>

Park, D.Y.; Yoo, K.K.; Choi, W.S. (2014). Effects of LED Safety Induction Block on Crosswalk Accident. *J. Korea Acad.-Ind. Coop. Soc.* 15, 4634–4643. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Effects+of+LED+Safety+Induction+Block+on+Crosswalk+Accident&author=Park,+D.Y.&author=Yoo,+K.K.&author=Choi,+W.S.&publication_year=2014&journal=J.+Korea+Acad.-Ind.+Coop.+Soc.&volume=15&pages=4634%E2%80%934643

Park, J., y Kang, D. (2024). Artificial Intelligence and Smart Technologies in Safety Management: A Comprehensive Analysis Across Multiple Industries. *Applied Sciences*, 14(24), 11934. <https://doi.org/10.3390/app142411934>

Qasim, K. R., Naser, N. M., & Jabur, A. J. (2024). An IoT-Enhanced Traffic Light Control System with Arduino and IR Sensors for Optimized Traffic Patterns. *Future Internet*, 16(10), 377. <https://doi.org/10.3390/fi16100377>

Ranawaka, A., Alahakoon, D., Sun, Y., & Hewapathirana, K. (2024). Leveraging the Synergy of Digital Twins and Artificial Intelligence for Sustainable Power Grids: A Scoping Review. *Energies*, 17(21), 5342. <https://doi.org/10.3390/en17215342>

Rojek, I., Mikołajewski, D., Dorożyński, J., Dostatni, E., & Mreła, A. (2024). An ML-Based Solution in the Transformation towards a Sustainable Smart City. *Applied Sciences*, 14(18), 8288. <https://doi.org/10.3390/app14188288>

Roumeliotis, C., Dasygenis, M., Lazaridis, V., & Dossis, M. (2024). Blockchain and Digital Twins in Smart Industry 4.0: The Use Case of Supply Chain-A Review of Integration Techniques and Applications. *Designs*, 8(6), 105. <https://doi.org/10.3390/designs8060105>

Shamlitsky, Yaroslav & Aleksey, Ovsyankin & Morozov, Evgeny & Strekaleva, Tatiana. (2024). Using digital twins to manage traffic flows. *E3S Web of Conferences*. <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202447104027>

Shulajkovska, M., Smerkol, M., Noveski, G., & Gams, M. (2024). Enhancing Urban Sustainability: Developing an Open-Source AI Framework for Smart Cities. *Smart Cities*, 7(5), 2670-2701. <https://doi.org/10.3390/smartcities7050104>

Varzeshi, S., Fien, J., & Irajifar, L. (2024). Integrating Technology and Urban Resilience: A Comprehensive Analysis of Smart City Initiatives in Sydney. *Sustainability*, 16(24), 10967. <https://doi.org/10.3390/su162410967>

Wei, Y., Yuan, H., & Li, H. (2024). Exploring the Contribution of Advanced Systems in Smart City Development for the Regeneration of Urban Industrial Heritage. *Buildings*, 14(3), 583. <https://doi.org/10.3390/buildings14030583>

Weichbroth, P., Jandy, K., & Zurada, J. (2024). Toward Sustainable Development: Exploring the Value and Benefits of Digital Twins. *Telecom*, 5(3), 774-791. <https://doi.org/10.3390/telecom5030039>

Yang, Z., Tang, C., Zhang, T., Zhang, Z., & Doan, D. T. (2024). Digital Twins in Construction: Architecture, Applications, Trends and Challenges. *Buildings*, 14(9), 2616. <https://doi.org/10.3390/buildings14092616>

Zhao, Y., Liu, Y., & Mu, E. (2024). A Review of Intelligent Subway Tunnels Based on Digital Twin Technology. *Buildings*, 14(8), 2452. <https://doi.org/10.3390/buildings14082452>