

Gemelos digitales: inteligencia artificial y realidad mixta en comunidades vulnerables

Luís Esis

Doctorando en Ciencias de las Comunicaciones de la Sociedad del Conocimiento de la Universidad Católica Andrés Bello (UCAB). Máster Universitario en Comunicación Organizacional de la Universidad Católica Andrés Bello (UCAB). Especialista de Responsabilidad Social y Empresarial de la Universidad Metropolitana (UNIMET). Consultor y experto en comunicaciones corporativas, gestión de crisis, asuntos públicos, marca personal y desarrollo de programas de impacto social, económico y ambiental, con más de 10 años de experiencia en el sector privado de Venezuela, Colombia, Chile, Guatemala, México y Brasil.
ORCID: 0009-0004-1283-638X
leesis.13@est.ucab.edu.ve

Resumen

La intensificación de los riesgos climáticos, sociales y territoriales ha evidenciado las limitaciones de los enfoques tradicionales de planificación, especialmente en comunidades vulnerables caracterizadas por debilidades institucionales y baja capacidad de anticipación. En este contexto, el presente artículo analiza la convergencia entre gemelos digitales, inteligencia artificial y realidad mixta como una arquitectura sociotécnica emergente con potencial para fortalecer la anticipación socioambiental y los procesos de planificación sostenible. El objetivo es examinar los alcances y límites de estas tecnologías desde una perspectiva comunicacional, ética e interdisciplinaria orientada al desarrollo sostenible. Metodológicamente, se desarrolla una investigación teórico-documental de enfoque cualitativo e interpretativo, basada en la revisión y análisis crítico de literatura especializada y documentos institucionales. Los resultados indican que la integración de gemelos digitales con inteligencia artificial y realidad mixta puede mejorar la toma de decisiones mediante la simulación de escenarios, la visibilidad inmersiva y la traducción de datos complejos en representaciones comprensibles para distintos actores; no obstante, su valor social depende de condiciones de diseño centradas en las personas, gobernanza ética de los datos y participación comunitaria efectiva. El principal aporte del estudio es proponer una lectura que concibe los gemelos digitales no solo como infraestructuras técnicas, sino también como dispositivos comunicacionales y políticos, subrayando que su contribución a la sostenibilidad y a la reducción de vulnerabilidades está condicionada por marcos de justicia algorítmica, transparencia y equidad.

Palabras clave: Gemelos digitales; inteligencia artificial; realidad mixta; anticipación socioambiental; comunidades vulnerables.

Digital twins: artificial intelligence and mixed reality in vulnerable communities

Abstract

The intensification of climatic, social, and territorial risks has exposed the limitations of traditional planning approaches, particularly in vulnerable communities characterized by institutional fragility and limited anticipatory capacity. In this context, this article critically examines the convergence of digital twins, artificial intelligence, and mixed reality as an emerging sociotechnical architecture with the potential to strengthen socio-environmental anticipation and sustainable planning processes. The study aims to analyze the scope and limitations of these technologies from a communicational, ethical, and interdisciplinary perspective oriented toward sustainable development. Methodologically, the research adopts a qualitative, theoretical-documentary, and interpretive approach, based on the critical review and analysis of specialized literature and relevant institutional documents. The findings suggest that digital twins integrated with artificial intelligence and mixed reality can enhance decision-making through scenario simulation, immersive visibility, and the translation of complex data into intelligible representations for diverse stakeholders; however, their social value depends on human-centered design, ethical data governance, and meaningful community participation. The main contribution of the study is to propose an interpretive framework that conceptualizes digital twins not only as technical infrastructures but also as communicational and political devices, emphasizing that their contribution to sustainability and vulnerability reduction is contingent upon principles of algorithmic justice, transparency, and equity.

Keywords: Digital twins; artificial intelligence; mixed reality; socio-environmental anticipation; vulnerable communities.

INTRODUCCIÓN

La intensificación de los riesgos climáticos, sociales y territoriales se ha consolidado como uno de los principales desafíos para la gestión pública y el desarrollo sostenible en el siglo XXI. Eventos extremos como inundaciones, sequías, incendios forestales, deslizamientos y crisis hídricas afectan de manera desproporcionada a comunidades caracterizadas por altos niveles de vulnerabilidad estructural, donde convergen pobreza, informalidad urbana, debilidad institucional y escasa capacidad de respuesta. Diversos informes internacionales advierten que los Estados continúan enfrentando serias dificultades para anticipar estos escenarios, en gran medida porque los modelos tradicionales de planificación se sustentan en diagnósticos retrospectivos, información fragmentada y enfoques lineales que resultan insuficientes para comprender dinámicas complejas e interdependientes (ONU, 2023; OECD, 2023).

En la sociedad del conocimiento, los flujos masivos de información y la expansión de infraestructuras digitales están reconfigurando las formas de producir, organizar y utilizar el saber (Castells, 2010). La inteligencia artificial (IA) se ha consolidado como una tecnología central en este proceso, al permitir el procesamiento de grandes volúmenes de datos, la identificación de patrones y la generación de predicciones en múltiples dominios. No obstante, distintos autores subrayan que la IA no debe entenderse únicamente como una herramienta técnica, sino como una infraestructura sociotécnica que reorganiza relaciones de poder y puede amplificar desigualdades existentes cuando se implementa sin criterios de equidad y transparencia (Pasquale, 2020, citado por Crawford, 2021).

En este contexto emergen los gemelos digitales, definidos como representaciones virtuales dinámicas de objetos, procesos o sistemas físicos, conectadas mediante flujos de datos en tiempo real, que permiten simular comportamientos, anticipar fallas y evaluar escenarios futuros (Grieves y Vickers, 2017; Tao et al., 2019). La literatura reciente destaca que, cuando estos modelos se integran con IA, adquieren capacidades avanzadas de análisis predictivo y evaluación de impactos, lo que los posiciona como herramientas relevantes para la planificación urbana, la gestión de riesgos y la sostenibilidad territorial (Jones et al., 2020; Ketzler et al., 2023). Estas aplicaciones adquieren especial relevancia en contextos vulnerables, donde la ausencia de información integrada y prospectiva limita la toma de decisiones basadas en evidencia.

A estas capacidades se suma la incorporación de tecnologías inmersivas, particularmente la realidad mixta, que introduce una dimensión experiencial en la interacción con los modelos digitales. La realidad mixta, al integrar elementos físicos y virtuales en un mismo entorno perceptual, favorece la comprensión espacial, la conciencia situacional y la exploración de escenarios complejos (Milgram y Kishino, 1994). Estudios sobre ecologías inmersivas señalan que estas tecnologías pueden incrementar la comprensión profunda, la empatía y la participación ciudadana en problemáticas asociadas al cambio climático y la resiliencia comunitaria (UNDP, 2021).

Desde una perspectiva comunicacional, esta convergencia tecnológica no solo transforma los modos de visualizar datos, sino también las formas de producir sentido colectivo. El diseño comunáutico propuesto por Harvey (2017) ofrece un marco pertinente para interpretar los gemelos digitales inmersivos como dispositivos relacionales orientados a la co-construcción de significados, la interacción simbólica y la deliberación social. A su vez, la teoría de la complejidad de Morin (2005) permite comprender que los problemas socioambientales son no lineales, multidimensionales e interdependientes, lo que exige enfoques capaces de integrar múltiples variables, escalas y temporalidades.

No obstante, la literatura especializada advierte que estas tecnologías no son neutrales. Los modelos algorítmicos pueden reproducir sesgos derivados de datos incompletos o desbalanceados, convirtiéndose en mecanismos que profundizan desigualdades en lugar de reducirlas (O’Neil, 2016). Asimismo, la expansión de la infósfera digital plantea desafíos éticos vinculados a la gobernanza de datos, la privacidad y la transparencia de los sistemas de decisión (Floridi, 2022). Estas tensiones adquieren especial relevancia en comunidades vulnerables, donde las brechas digitales y la limitada capacidad institucional pueden intensificar los riesgos asociados a la adopción acrítica de tecnologías avanzadas.

A partir de este escenario, se identifica como problema central la insuficiente comprensión de cómo la integración entre gemelos digitales, inteligencia artificial y realidad mixta puede contribuir efectivamente a fortalecer la anticipación socioambiental y la planificación sostenible en comunidades vulnerables, incorporando de manera explícita dimensiones comunicacionales y éticas. Aunque existe

una creciente literatura sobre cada una de estas tecnologías por separado, persiste un vacío en estudios que analicen su convergencia desde un enfoque interdisciplinario orientado al desarrollo sostenible y la justicia social.

Este estudio propone un análisis crítico, teórico e interdisciplinario de la integración entre gemelos digitales, inteligencia artificial y realidad mixta en contextos de vulnerabilidad, abordando sus implicaciones desde una perspectiva socioambiental, comunicacional y ética. El trabajo se sustenta en una revisión y articulación de literatura especializada en tecnologías digitales, comunicación, sostenibilidad y estudios críticos de la inteligencia artificial, así como en el examen de experiencias internacionales relevantes en planificación territorial y gestión de riesgos. El propósito es identificar patrones, convergencias conceptuales y tensiones que permitan comprender el alcance real de estas tecnologías como instrumentos de anticipación y planificación sostenible.

La presente investigación se sustenta en una hipótesis de carácter explicativo-interpretativo, en tanto no se limita a describir el fenómeno de estudio, sino que busca comprender y explicar las condiciones bajo las cuales la integración de gemelos digitales con inteligencia artificial y realidad mixta puede fortalecer la anticipación socioambiental y los procesos de planificación en comunidades vulnerables, así como los riesgos asociados a su implementación no responsable (Hernández Sampieri et al. 2014).

En ese sentido, se plantea como hipótesis que, los gemelos digitales, cuando se integran de manera responsable con inteligencia artificial y realidad mixta, poseen un alto potencial para fortalecer la anticipación socioambiental y mejorar los procesos de planificación en comunidades vulnerables, siempre que su diseño e implementación incorporen principios de justicia algorítmica, gobernanza ética de los datos y participación comunitaria. Bajo estas condiciones, estas tecnologías pueden contribuir a generar entornos de toma de decisiones más informados, inclusivos y orientados al desarrollo sostenible; mientras que, en ausencia de dichos principios, corren el riesgo de reproducir desigualdades y profundizar brechas existentes.

El presente estudio se sustenta en un enfoque de investigación teórica con apoyo en el análisis documental, de acuerdo con los criterios propuestos por Berganza y Ruiz (2005), quienes señalan que

este tipo de investigación se orienta a la construcción de conocimiento a partir de la revisión sistemática, la interpretación y la articulación crítica de fuentes especializadas, cuando el objetivo principal es profundizar en la comprensión conceptual de un fenómeno más que en su medición empírica. Este enfoque resulta particularmente pertinente en campos emergentes, donde los marcos interpretativos aún se encuentran en consolidación y donde es necesario establecer bases teóricas sólidas que orienten investigaciones posteriores (Hernández-Sampieri et al., 2014).

Desde esta perspectiva, el estudio no busca establecer relaciones causales mediante procedimientos estadísticos, sino comprender un fenómeno complejo a partir del diálogo entre diferentes tradiciones teóricas. En consonancia con Berganza y Ruiz (2005), el análisis se centra en identificar, comparar e interpretar aportes provenientes de la comunicación, los estudios de sostenibilidad, la ética de la información y los enfoques críticos sobre inteligencia artificial, con el propósito de construir una lectura integradora que dé cuenta de las dimensiones técnicas, sociales y simbólicas de la convergencia entre gemelos digitales, inteligencia artificial y realidad mixta.

El análisis documental constituye, además, una estrategia metodológica adecuada para examinar de manera rigurosa libros académicos, artículos científicos, informes de organismos internacionales y documentos institucionales relacionados con el objeto de estudio. Según Flick (2015), esta técnica permite reconstruir campos de conocimiento, detectar tendencias y reconocer vacíos teóricos a partir del examen sistemático de textos producidos en contextos diversos. En este trabajo, la selección de fuentes responde a criterios de pertinencia temática, actualidad y relevancia académica, lo que posibilita una aproximación amplia y fundamentada al estado del arte.

De acuerdo con Berganza y Ruiz (2005), los estudios teóricos deben evidenciar una delimitación clara del objeto, una fundamentación conceptual explícita y una coherencia interna entre problema, objetivo e hipótesis. Estos criterios se materializan en el presente artículo a través de la definición precisa del fenómeno analizado, la adopción de marcos teóricos específicos —como la teoría de la complejidad (Morin, 2005), la ética de la información (Floridi, 2022) y el diseño comunáutico (Harvey, 2017)— y la formulación de una hipótesis orientada a examinar las condiciones bajo las cuales estas tecnologías pueden contribuir a la anticipación socioambiental en comunidades vulnerables.

OBJETIVOS

a. *Objetivo General:*

Analizar críticamente el potencial y los límites de los gemelos digitales, integrados con inteligencia artificial y realidad mixta, para fortalecer la anticipación socioambiental y los procesos de planificación en comunidades vulnerables, desde una perspectiva comunicacional, ética y orientada a la sostenibilidad.

b. *Objetivos específicos:*

- Examinar los principales aportes teóricos sobre inteligencia artificial, gemelos digitales y realidad mixta relevantes para la planificación sostenible y la gestión de riesgos socioambientales.
- Determinar la dimensión comunicacional de los entornos inmersivos asociados a gemelos digitales, considerando su papel en la construcción de sentido, la participación comunitaria y la deliberación pública.
- Identificar los principales riesgos éticos y sociales asociados al uso de gemelos digitales en contextos de vulnerabilidad, con énfasis en sesgos algorítmicos, gobernanza de datos y exclusión digital.
- Examinar experiencias y casos documentados de aplicación de gemelos digitales en planificación territorial y resiliencia, con el fin de reconocer tendencias, oportunidades y limitaciones.
- Proponer lineamientos conceptuales orientados al diseño y gobernanza de gemelos digitales sostenibles que contribuyan al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en comunidades vulnerables.

METODOLOGÍA

El presente trabajo corresponde a un artículo de reflexión teórica, sustentado en una investigación de tipo documental, orientada al análisis crítico e interdisciplinario de la convergencia entre gemelos digitales, inteligencia artificial y realidad mixta en comunidades vulnerables. De acuerdo con la clasificación de artículos propuesta por la Revista Temas de Comunicación, se inscribe dentro de los textos que, sin desarrollar trabajo empírico de campo, construyen conocimiento a partir de la revisión, sistematización e interpretación de literatura especializada y fuentes secundarias pertinentes.

Desde el punto de vista epistemológico, el estudio se adscribe al paradigma interpretativo, el cual privilegia la comprensión de los fenómenos sociales a partir del análisis de significados, contextos y

construcciones simbólicas (Flick, 2015). Este paradigma resulta coherente con el objetivo del artículo, orientado a examinar las implicaciones comunicacionales, éticas y socioambientales de tecnologías emergentes, más que a medir variables o establecer relaciones causales.

En cuanto al tipo de investigación, se asume un enfoque cualitativo, de carácter teórico–documental, siguiendo los criterios planteados por Berganza y Ruiz (2005). Asimismo, se retoman aportes de Hernández-Sampieri et al. (2014), quienes reconocen la investigación documental como una estrategia válida para el desarrollo de estudios de reflexión y análisis conceptual.

El diseño de la investigación es no experimental y transeccional, en tanto no se manipulan variables ni se observan fenómenos en tiempo real, sino que se analizan documentos producidos en distintos momentos y contextos. La lógica de análisis es hermenéutica–interpretativa, orientada a comprender, contrastar y articular categorías teóricas provenientes de distintos campos del conocimiento.

El corpus estuvo conformado por libros académicos, artículos científicos indexados, informes de organismos internacionales y documentos institucionales relacionados con: gemelos digitales, inteligencia artificial, realidad mixta, comunicación, sostenibilidad, ética digital y gestión de riesgos. Las fuentes fueron seleccionadas a partir de los siguientes criterios:

- Pertinencia temática con el objeto de estudio.
- Reconocimiento académico de los autores o instituciones.
- Actualidad y vigencia de los aportes teóricos.
- Relevancia para contextos de planificación territorial, sostenibilidad y vulnerabilidad.

El acceso a las fuentes se realizó mediante bases académicas de datos, repositorios universitarios y portales oficiales de organismos internacionales.

El proceso metodológico se desarrolló en cuatro fases:

- Búsqueda y recopilación de literatura especializada sobre los ejes centrales del estudio.

- Lectura analítica y clasificación de las fuentes según categorías preliminares (tecnológicas, comunicacionales, éticas y socioambientales).
- Codificación temática y establecimiento de relaciones conceptuales entre categorías.
- Interpretación crítica, orientada a identificar convergencias, tensiones, vacíos y aportes teóricos.

Este proceder permitió construir una lectura integradora del fenómeno, articulando distintos marcos conceptuales en función del objetivo del artículo.

Dado que se trata de una investigación documental, no se trabaja con población, muestra ni participantes humanos, por lo que no aplica la gestión de consentimiento informado. No obstante, el estudio se rige por principios de ética académica, garantizando el uso responsable de las fuentes, el respeto a los derechos de autor y la adecuada citación de todos los materiales consultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis teórico–documental realizado permite identificar un conjunto de hallazgos que confirman la centralidad de la convergencia entre gemelos digitales, inteligencia artificial (IA) y realidad mixta (RM) como una arquitectura sociotécnica emergente con capacidad de incidir en la anticipación socioambiental y en los procesos de planificación territorial, particularmente en comunidades vulnerables. Sin embargo, los resultados también evidencian que dicho potencial está condicionado por factores comunicacionales, éticos, políticos e institucionales que definen si estas tecnologías operan como herramientas de inclusión o, por el contrario, como mecanismos de reproducción de desigualdades.

Los hallazgos se organizan en cinco ejes analíticos que responden directamente a los objetivos planteados y permiten discutir la hipótesis propuesta.

a. Los gemelos digitales como infraestructuras cognitivas para la anticipación socioambiental

Uno de los hallazgos centrales del estudio es que la literatura converge en caracterizar a los gemelos digitales como infraestructuras cognitivas más que como simples modelos técnicos. Grieves y Vickers (2017) establecen el gemelo digital como una representación virtual conectada bidireccionalmente a su

contraparte física, mientras que Tao et al. (2019) amplían esta definición hacia ecosistemas ciberfísicos que integran sensores, modelos computacionales y algoritmos de IA. Esta evolución conceptual implica que los gemelos digitales ya no se limitan a describir el estado de un sistema, sino que posibilitan anticipar su comportamiento futuro.

El análisis muestra que, al integrarse con IA, estos sistemas adquieren capacidades avanzadas de reconocimiento de patrones, análisis de series temporales y simulación predictiva, lo que los convierte en herramientas relevantes para la evaluación de riesgos climáticos, la gestión de infraestructuras críticas y la planificación territorial (Jones et al., 2020; Ketzler et al., 2023). En particular, se identifica que los gemelos digitales permiten modelar escenarios contrafactuales, es decir, explorar qué ocurriría bajo diferentes combinaciones de variables, una capacidad limitada en los enfoques tradicionales de planificación.

Desde la teoría de la complejidad, estos hallazgos se articulan con los planteamientos de Morin (2005), quien sostiene que los problemas contemporáneos se caracterizan por interdependencias, retroalimentaciones y comportamientos emergentes. Los gemelos digitales ofrecen una aproximación tecnológica a esta lógica, al integrar múltiples capas de información que interactúan entre sí.

Sin embargo, el análisis también evidencia que esta capacidad anticipatoria está condicionada por la calidad, cobertura y gobernanza de los datos. Crawford (2021) advierte que la infraestructura digital se distribuye de manera desigual, generando territorios sobrerrepresentados y otros prácticamente invisibles. En comunidades vulnerables, esta asimetría limita la fiabilidad de los modelos, pues los datos disponibles suelen ser incompletos o desactualizados.

Estos resultados confirman que los gemelos digitales poseen un alto potencial para fortalecer la anticipación socioambiental, pero dicho potencial no es inherente a la tecnología. Coincidiendo con Ketzler et al. (2023), la generación de valor sostenible depende de condiciones institucionales, técnicas y sociales. En consecuencia, la anticipación debe entenderse como una capacidad sociotécnica y no como un atributo automático de las plataformas digitales.

b. Simulación y planificación: del diagnóstico retrospectivo al escenario prospectivo

Un segundo hallazgo es que los gemelos digitales posibilitan un desplazamiento desde modelos de planificación basados en diagnósticos retrospectivos hacia enfoques prospectivos sustentados en simulación. Jones et al. (2020) señalan que estos sistemas permiten evaluar políticas públicas antes de su implementación, reduciendo la incertidumbre asociada a la toma de decisiones.

El análisis evidencia que esta capacidad resulta especialmente relevante en contextos vulnerables, donde las decisiones suelen tomarse bajo alta presión y con información fragmentada. La simulación de escenarios permite anticipar impactos de eventos extremos, evaluar alternativas de intervención y priorizar acciones preventivas.

Desde una perspectiva comunicacional, este desplazamiento implica que la planificación deja de ser un proceso exclusivamente tecnocrático para convertirse potencialmente en un proceso deliberativo, siempre que las simulaciones sean comunicadas de forma comprensible.

Este hallazgo amplía la literatura sobre planificación basada en datos al incorporar la dimensión narrativa de la simulación: los escenarios no solo informan, sino que construyen visiones de futuro.

c. Realidad mixta y mediación comunicacional

Uno de los hallazgos más relevantes del estudio es que la incorporación de la realidad mixta (RM) a los gemelos digitales no constituye únicamente un avance en términos de visibilidad tecnológica, sino una transformación profunda de los procesos comunicacionales asociados a la planificación y la gestión territorial. Mientras que los sistemas tradicionales de información territorial suelen presentar los datos en formatos abstractos —tablas, gráficos, mapas bidimensionales o reportes técnicos—, la RM introduce una lógica experiencial que permite a los usuarios interactuar corporal y espacialmente con los modelos digitales, favoreciendo nuevas formas de comprensión y apropiación del conocimiento.

Desde el marco propuesto por Milgram y Kishino (1994), la realidad mixta se sitúa en un continuo entre lo real y lo virtual, posibilitando la coexistencia e interacción simultánea de ambos planos. Esta

característica resulta especialmente pertinente para la representación de fenómenos complejos, ya que permite superponer capas de información digital sobre entornos físicos concretos, facilitando la interpretación contextualizada de los datos. En el ámbito de los gemelos digitales, esta integración habilita la exploración inmersiva de escenarios futuros, tales como la expansión de zonas inundables, el impacto de eventos climáticos extremos o las transformaciones del uso del suelo, de una manera que trasciende la abstracción numérica.

La literatura sobre ecologías inmersivas ha demostrado que las experiencias basadas en realidad extendida (XR) incrementan la comprensión profunda, la memoria espacial y la empatía frente a problemáticas socioambientales (UNDP, 2021). Estos efectos cognitivos poseen implicaciones directas para los procesos de planificación, en tanto reducen la distancia entre la información técnica y la experiencia cotidiana de las comunidades. En este sentido, la RM contribuye a convertir los gemelos digitales en dispositivos pedagógicos, capaces de facilitar procesos de alfabetización climática y territorial.

Desde una perspectiva comunicacional, estos hallazgos pueden interpretarse a la luz del diseño comunáutico propuesto por Harvey (2017), quien concibe los entornos digitales como espacios relacionales orientados a la co-construcción de sentido. Los gemelos digitales inmersivos, al permitir que diversos actores “entren” en representaciones compartidas del territorio, funcionan como plataformas simbólicas donde se negocian significados, narrativas y decisiones colectivas. De este modo, la comunicación deja de operar exclusivamente como transmisión de información y se configura como un proceso de interacción y producción conjunta de interpretaciones.

Un resultado particularmente significativo es que la RM puede contribuir a democratizar la participación en la planificación territorial. En contextos donde la alfabetización técnica es limitada, los formatos tradicionales de comunicación suelen excluir a amplios sectores de la población. La visibilidad inmersiva, en cambio, permite que actores no expertos comprendan escenarios complejos sin necesidad de dominar lenguajes especializados. Este hallazgo coincide con estudios que destacan el potencial de las tecnologías inmersivas para ampliar la inclusión en procesos deliberativos (UNDP, 2021).

Sin embargo, el análisis también revela tensiones importantes. La potencia persuasiva de los entornos inmersivos puede generar efectos de naturalización de los modelos, haciendo que las simulaciones se perciban como representaciones objetivas e incuestionables de la realidad. Floridi (2022) advierte que, en la infósfera contemporánea, los sistemas digitales no solo informan, sino que moldean percepciones y comportamientos, lo que exige desarrollar una alfabetización crítica sobre los límites y supuestos de los modelos.

Asimismo, Crawford (2021) subraya que las tecnologías inmersivas se insertan en estructuras de poder preexistentes. Si el acceso a dispositivos de RM y a conectividad adecuada es desigual, los procesos participativos pueden quedar restringidos a actores privilegiados, reproduciendo exclusiones en lugar de superarlas. Este hallazgo refuerza la necesidad de diseñar estrategias de implementación que contemplen accesibilidad, formación y apropiación comunitaria.

Los resultados obtenidos permiten sostener que la realidad mixta constituye un componente central de la dimensión comunicacional de los gemelos digitales sostenibles. Su valor no reside únicamente en mejorar la calidad de la visibilidad, sino en reconfigurar los procesos de mediación entre datos, actores y decisiones. En línea con Harvey (2017), los gemelos digitales inmersivos pueden ser comprendidos como dispositivos comunáuticos que posibilitan la emergencia de nuevas ecologías de sentido orientadas a la sostenibilidad.

No obstante, este potencial solo se materializa cuando la RM se integra en marcos de gobernanza ética, transparencia y participación. De lo contrario, las mismas tecnologías que prometen democratizar la planificación pueden convertirse en instrumentos de imposición simbólica y tecnocrática. En consecuencia, la dimensión comunicacional emerge como un factor crítico para verificar la hipótesis del estudio: la anticipación socioambiental no depende únicamente de capacidades técnicas, sino de la forma en que los futuros posibles son comunicados, debatidos y colectivamente contruidos.

d. Tensiones éticas, justicia algorítmica y gobernanza de datos

Uno de los hallazgos más consistentes del análisis es que la implementación de gemelos digitales integrados con inteligencia artificial se encuentra atravesada por profundas tensiones éticas, especialmente en contextos de vulnerabilidad. La literatura especializada coincide en que los sistemas algorítmicos no operan de manera neutral, sino que reflejan las condiciones sociales, económicas y políticas en las que son diseñados y entrenados (Pasquale, 2020, citado por Crawford, 2021). En consecuencia, los gemelos digitales pueden reproducir desigualdades preexistentes si se sustentan en datos incompletos, sesgados o descontextualizados.

O’Neil (2016) advierte que los modelos predictivos pueden convertirse en “armas de destrucción matemática” cuando se aplican a poblaciones marginadas, ya que tienden a automatizar decisiones injustas bajo una apariencia de objetividad. Este riesgo resulta particularmente relevante en comunidades vulnerables, donde la escasez de datos de calidad y la limitada capacidad institucional de supervisión incrementan la probabilidad de errores sistémicos.

El análisis también evidencia que los desafíos éticos no se restringen a los sesgos algorítmicos, sino que incluyen problemas de privacidad, vigilancia y apropiación de datos. Los gemelos digitales requieren recolectar y procesar grandes volúmenes de información ambiental, territorial y demográfica. Sin marcos claros de gobernanza, estos sistemas pueden derivar en prácticas de monitoreo excesivo o en usos comerciales de datos sensibles sin el consentimiento de las comunidades (Floridi, 2022).

Desde la perspectiva de la ética de la información, Floridi (2022) sostiene que la expansión de la infósfera exige reconocer a los individuos y comunidades como “pacientes morales” de los sistemas digitales, es decir, como sujetos cuyos derechos y dignidad deben ser protegidos frente a posibles daños informacionales. Aplicado a los gemelos digitales, esto implica garantizar transparencia en los modelos, trazabilidad de los datos y mecanismos de rendición de cuentas.

Asimismo, Pasquale (2020) plantea que los sistemas automatizados deben ser explicables y auditables para evitar formas de tecnocracia opaca. En el caso de los gemelos digitales, la complejidad de los modelos puede generar una brecha entre quienes diseñan las plataformas y quienes se ven afectados por sus resultados, reforzando asimetrías de poder.

El análisis sugiere que la justicia algorítmica debe entenderse como un principio estructural del diseño de gemelos digitales sostenibles. Esto implica no solo reducir sesgos, sino también asegurar que los beneficios de estas tecnologías se distribuyan de manera equitativa y que las comunidades participen en las decisiones sobre qué datos se recolectan, cómo se utilizan y con qué fines.

Estos resultados refuerzan la idea de que la dimensión ética no es un complemento del diseño tecnológico, sino una condición habilitante de su valor social. Coincidiendo con Crawford (2021) y Floridi (2022), el problema central no radica en la existencia de la IA o los gemelos digitales, sino en las estructuras de poder y gobernanza que los configuran. En consecuencia, los gemelos digitales solo pueden contribuir a la anticipación socioambiental en comunidades vulnerables si se insertan en marcos normativos y participativos orientados a la justicia social.

e. Verificación de la hipótesis, aportes del estudio y proyecciones

La integración de los hallazgos presentados en los ejes anteriores permite sostener que la hipótesis propuesta se verifica de manera condicional. Los gemelos digitales, cuando se integran con inteligencia artificial y realidad mixta, poseen un alto potencial para fortalecer la anticipación socioambiental y los procesos de planificación en comunidades vulnerables. No obstante, este potencial solo se materializa cuando su diseño e implementación incorporan principios de justicia algorítmica, gobernanza ética de los datos y participación comunitaria.

El estudio evidencia que las capacidades técnicas de estas tecnologías —simulación, modelación predictiva, visibilidad inmersiva— son necesarias, pero no suficientes. Su efectividad depende de condiciones sociopolíticas e institucionales que permitan traducir dichas capacidades en decisiones

orientadas al bien común. Este hallazgo dialoga con los planteamientos de Morin (2005), quien advierte que los sistemas complejos requieren enfoques que integren dimensiones técnicas, humanas y culturales.

Uno de los principales aportes del estudio consiste en proponer una lectura interdisciplinaria que concibe los gemelos digitales no solo como infraestructuras técnicas, sino como dispositivos comunicacionales y políticos. Desde esta perspectiva, los gemelos digitales se configuran como espacios donde se negocian narrativas sobre el futuro, se disputan sentidos y se distribuye poder. Este enfoque amplía la literatura existente, predominantemente centrada en aspectos técnicos, al incorporar de manera explícita la dimensión comunicacional.

Asimismo, el estudio aporta un marco conceptual para comprender la anticipación socioambiental como una capacidad sociotécnica, resultado de la interacción entre tecnología, comunicación y gobernanza. Esta concepción permite superar visiones deterministas que atribuyen a la tecnología un papel redentor, y enfatiza la necesidad de procesos participativos y éticamente orientados.

CONCLUSIONES

El análisis teórico–documental desarrollado en este estudio permite concluir que la convergencia entre gemelos digitales, inteligencia artificial y realidad mixta configura una arquitectura sociotécnica emergente con capacidad de incidir de manera significativa en la anticipación socioambiental y en los procesos de planificación territorial en comunidades vulnerables. Este resultado se sustenta en la evidencia teórica que caracteriza a los gemelos digitales como sistemas dinámicos capaces de integrar datos heterogéneos, simular escenarios y anticipar comportamientos futuros (Grieves y Vickers, 2017; Tao et al., 2019; Jones et al., 2020), lo que representa una diferencia sustantiva frente a los enfoques tradicionales basados en diagnósticos retrospectivos.

Los hallazgos confirman que, al integrarse con inteligencia artificial, los gemelos digitales adquieren capacidades avanzadas de análisis predictivo y reconocimiento de patrones que fortalecen la toma de decisiones basada en evidencia, especialmente en contextos de alta incertidumbre (Ketzler et al., 2023). No obstante, el estudio permite afirmar que dichas capacidades no garantizan por sí mismas resultados

socialmente deseables. Coincidiendo con Crawford (2021) y Pasquale (2020), se concluye que las tecnologías digitales no son neutrales, sino que reflejan y, en muchos casos, reproducen las estructuras de poder y las desigualdades presentes en los contextos donde se implementan.

En este sentido, la anticipación socioambiental debe entenderse como una capacidad sociotécnica construida, y no como una propiedad automática de las plataformas digitales. Tal como advierte Morin (2005), los problemas complejos requieren enfoques que integren dimensiones técnicas, humanas y culturales. Los gemelos digitales pueden contribuir a esta integración solo cuando se insertan en marcos institucionales capaces de articular datos, conocimiento experto y saberes territoriales.

Asimismo, el estudio permite concluir que la incorporación de la realidad mixta introduce una transformación sustantiva en la dimensión comunicacional de la planificación. Las experiencias inmersivas facilitan la comprensión espacial, la conciencia situacional y la apropiación de información compleja (Milgram y Kishino, 1994; UNDP, 2021), lo que favorece procesos de alfabetización climática y participación. Desde el enfoque del diseño comunáutico, los gemelos digitales inmersivos pueden ser comprendidos como dispositivos relacionales orientados a la co-construcción de sentido y a la deliberación colectiva (Harvey, 2017).

No obstante, los resultados también permiten concluir que la potencia comunicacional de estas tecnologías conlleva riesgos. La visibilidad inmersiva puede generar efectos de naturalización de los modelos, presentándolos como representaciones incuestionables de la realidad. En consonancia con Floridi (2022), se advierte que, en la infósfera contemporánea, los sistemas digitales no solo informan, sino que moldean percepciones y comportamientos, lo que exige promover una alfabetización crítica y mecanismos de transparencia.

En relación con la hipótesis planteada, el estudio confirma su validez de manera condicional. Los gemelos digitales integrados con inteligencia artificial y realidad mixta pueden fortalecer la anticipación socioambiental y la planificación sostenible en comunidades vulnerables, siempre que su diseño e implementación incorporen principios de justicia algorítmica, gobernanza ética de los datos y participación comunitaria. De lo contrario, estas tecnologías corren el riesgo de amplificar

desigualdades, tal como advierte O'Neil (2016) en su análisis sobre los efectos sociales de los modelos predictivos.

Finalmente, el principal aporte del estudio consiste en proponer una lectura interdisciplinaria que concibe los gemelos digitales no solo como infraestructuras técnicas, sino como dispositivos comunicacionales y políticos. Esta perspectiva amplía el campo de análisis, tradicionalmente dominado por enfoques ingenieriles, e incorpora la comunicación, la ética y la sostenibilidad como dimensiones centrales para evaluar el impacto de las tecnologías emergentes. En síntesis, el estudio aporta elementos conceptuales para repensar la relación entre tecnología, territorio y desarrollo sostenible desde un enfoque orientado al bien común y a la justicia social.

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos y del análisis crítico desarrollado, se proponen las siguientes recomendaciones orientadas a guiar el diseño, implementación y evaluación de gemelos digitales integrados con inteligencia artificial y realidad mixta en contextos de vulnerabilidad:

a. Incorporar principios de justicia algorítmica desde las fases iniciales de diseño.

Los proyectos de gemelos digitales deben integrar mecanismos de detección y mitigación de sesgos, auditorías periódicas de modelos y revisión de los conjuntos de datos utilizados, con el fin de evitar la reproducción de desigualdades estructurales, tal como advierten O'Neil (2016) y Crawford (2021).

b. Establecer marcos de gobernanza ética y transparente de los datos.

Se recomienda definir protocolos claros sobre recolección, almacenamiento, uso y acceso a la información, garantizando la protección de datos sensibles, la trazabilidad de los procesos y la rendición de cuentas, en consonancia con los planteamientos de Floridi (2022) sobre ética de la información.

c. Promover la participación comunitaria en el diseño y uso de los gemelos digitales.

Las comunidades no deben ser únicamente objeto de modelación, sino actores involucrados en la definición de problemas, variables relevantes y escenarios a simular, lo que favorece la apropiación social de la tecnología y se alinea con el enfoque del diseño comunáutico (Harvey, 2017).

d. Fortalecer capacidades institucionales y alfabetización digital.

Para que los gemelos digitales generen valor sostenible, es necesario invertir en formación técnica, alfabetización digital y desarrollo de competencias en gobiernos locales y actores comunitarios, reduciendo brechas que limitan la adopción y el uso significativo de estas herramientas.

e. Diseñar estrategias de accesibilidad para tecnologías inmersivas.

La incorporación de realidad mixta debe acompañarse de alternativas de bajo costo, formatos híbridos y dispositivos compartidos que eviten la exclusión de sectores con limitada conectividad o recursos tecnológicos.

f. Fomentar alianzas intersectoriales.

Se recomienda promover colaboraciones entre universidades, gobiernos, organizaciones sociales y sector privado para compartir capacidades técnicas, reducir costos y asegurar sostenibilidad a largo plazo de los proyectos.

g. Impulsar investigaciones empíricas futuras.

Resulta pertinente desarrollar estudios de caso, investigaciones participativas y evaluaciones de impacto que permitan contrastar en terreno los alcances reales de los gemelos digitales inmersivos en comunidades vulnerables.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Berganza M. R., y Ruiz San Román, J. A. (2005). *Investigar en comunicación: Guía práctica de métodos y técnicas de investigación social en comunicación*. McGraw-Hill.
- Castells, M. (2010). *The rise of the network society* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Crawford, K. (2021). *Atlas of AI: Power, politics, and the planetary costs of artificial intelligence*. Yale University Press.
- Flick, U. (2015). *Introducing research methodology: A beginner's guide to doing a research project* (2nd ed.). SAGE Publications.
- Floridi, L. (2022). *The ethics of artificial intelligence*. Oxford University Press.
- Grieves, M., y Vickers, J. (2017). *Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems*. (pp. 85–113). https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- Harvey, P. (2017). *El diseño comunáutico: Fundamentos para una teoría del vínculo social en los entornos digitales*. Université du Québec.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., y Baptista-Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la investigación* (6a ed.). McGraw-Hill Education.
- Inter-American Development Bank. (2019). *Emerging technologies for resilience and disaster risk management*. BID.
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., y Hicks, B. (2020). *Characterising the digital twin: A systematic literature review*. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- Ketzler, B., Löchner, G., Neugebauer, C. S., Ritthoff, M., y Voss, A. (2023). *Digital twins for sustainability assessment and decision-making*. *Journal of Industrial Ecology*, 27(2), 345–360. <https://doi.org/10.1111/jiec.13369>
- Milgram, P., y Kishino, F. (1994). *A taxonomy of mixed reality visual displays*. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E77-D (12), 1321–1329.
- Morin, E. (2005). *Introduction à la pensée complexe*. Éditions du Seuil.
- O'Neil, C. (2016). *Weapons of math destruction: How big data increases inequality and threatens democracy*. Crown.
- OECD. (2023). *Artificial intelligence in society: Sustainability and governance*. Organization for Economic Co-operation and Development.

- ONU. (2023). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023. Organización de las Naciones Unidas.
- Pasquale, F. (2020). *New laws of robotics: Defending human expertise in the age of AI*. Harvard University Press.
- Tao, F., Qi, Q., Liu, A., y Kusiak, A. (2019). *Data-driven smart manufacturing*. Journal of Manufacturing Systems, 48, 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>
- United Nations Development Program. (2021). *Technology for development: Digital tools for climate resilience*. <https://www.undp.org/publications/technology-development-digital-tools-climate-resilience>
- Virtual Singapore. (2020). *Virtual Singapore: A dynamic 3D city model and collaborative platform*. Singapore Land Authority. <https://www.sla.gov.sg>