

Artículo Científico

Implementación de gemelos digitales probabilísticos en el monitoreo de infraestructuras geotécnicas

Implementation of probabilistic digital twins in the monitoring of geotechnical infrastructures



Rivadeneira-Moreira, Julio Cesar ¹

<https://orcid.org/0000-0003-4889-4392>

jcrivadeneirar@ucvvirtual.edu.pe

Universidad Cesar Vallejo, Ecuador, Santo Domingo.

Autor de correspondencia ¹



DOI / URL: <https://doi.org/xxxxxx>

Resumen: La creciente complejidad de las infraestructuras geotécnicas y su exposición a condiciones dinámicas y variables ha motivado la implementación de gemelos digitales probabilísticos como herramienta para su monitoreo avanzado. Este estudio adopta una metodología de revisión bibliográfica sistemática, examinando artículos académicos recientes que abordan el desarrollo y aplicación de estos modelos en contextos geotécnicos. Se analizaron avances metodológicos como la integración de inferencia bayesiana, simulaciones estocásticas y aprendizaje automático, los cuales permiten representar y actualizar modelos en tiempo real, incorporando la incertidumbre inherente al comportamiento del terreno. Asimismo, se documentaron aplicaciones en presas, taludes y túneles, mostrando cómo estos sistemas mejoran la predicción de fallas y optimizan la toma de decisiones. No obstante, persisten desafíos técnicos y económicos relacionados con la instrumentación, la variabilidad geológica, la validación de modelos y los costos de implementación. El estudio concluye que, pese a estas limitaciones, los gemelos digitales probabilísticos representan una evolución significativa en la gestión estructural, con alto potencial de adopción en la ingeniería civil moderna.

Palabras clave: gemelos digitales; ingeniería geotécnica; monitoreo estructural; inferencia bayesiana; modelos probabilísticos.



Check for updates

Received: 12/Ene/2024
Accepted: 31/Ene/2024
Published: 22/Feb/2024

Cita: Rivadeneira-Moreira, J. C. (2024). Implementación de gemelos digitales probabilísticos en el monitoreo de infraestructuras geotécnicas. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 2(1), 27-40. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v2/n1/29>

Revista Científica Ciencia y Método (RCyM)
<https://revistacym.com>
revistacym@editorialgrupo-aea.com
info@editorialgrupo-aea.com

© 2024. Este artículo es un documento de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la **Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional**.



Abstract:

The increasing complexity of geotechnical infrastructures and their exposure to dynamic and variable conditions has motivated the implementation of probabilistic digital twins as a tool for advanced monitoring. This study adopts a systematic literature review methodology, examining recent academic articles that address the development and application of these models in geotechnical contexts. Methodological advances such as the integration of Bayesian inference, stochastic simulations and machine learning were analyzed, which allow representing and updating models in real time, incorporating the uncertainty inherent to ground behavior. Likewise, applications in dams, slopes and tunnels were documented, showing how these systems improve failure prediction and optimize decision making. However, technical and economic challenges related to instrumentation, geological variability, model validation and implementation costs remain. The study concludes that, despite these limitations, probabilistic digital twins represent a significant evolution in structural management, with high potential for adoption in modern civil engineering.

Keywords: digital twins; geotechnical engineering; structural monitoring; Bayesian inference; probabilistic models.

1. Introducción

La creciente complejidad de las infraestructuras geotécnicas y su estrecha relación con la seguridad pública, el desarrollo urbano sostenible y la resiliencia frente al cambio climático ha impulsado la necesidad de adoptar metodologías avanzadas de monitoreo y diagnóstico estructural. En este contexto, la implementación de gemelos digitales representa un avance significativo, al permitir una representación virtual en tiempo real de las infraestructuras físicas. Sin embargo, la naturaleza inherentemente incierta de los procesos geotécnicos —como la variabilidad del subsuelo, las condiciones hidrológicas fluctuantes o el comportamiento no lineal de los materiales— limita la eficacia de los modelos deterministas. Esto plantea el problema central abordado en esta revisión: la necesidad de integrar enfoques probabilísticos dentro del marco de los gemelos digitales para reflejar adecuadamente la incertidumbre en el comportamiento y evolución de infraestructuras geotécnicas (Cuervo Reyes, 2020).

Las infraestructuras geotécnicas —incluyendo presas, túneles, taludes, cimentaciones profundas y muros de contención— operan bajo condiciones altamente variables que dificultan su monitoreo mediante técnicas convencionales. Los métodos tradicionales de inspección in situ, combinados con modelos numéricos estáticos, resultan insuficientes para anticipar fallas estructurales en escenarios de alta incertidumbre. Esta limitación no solo compromete la seguridad de las estructuras, sino que también impone altos costos de mantenimiento y aumenta el riesgo de interrupciones críticas. En consecuencia, la incorporación de modelos dinámicos que integren datos en

tiempo real, junto con técnicas de análisis probabilístico, se vuelve imperativa para una toma de decisiones informada y eficiente (Aguado, 2023).

En este sentido, los gemelos digitales probabilísticos emergen como una herramienta disruptiva. A diferencia de los gemelos digitales convencionales, que tienden a ser deterministas, los modelos probabilísticos permiten capturar la incertidumbre inherente a los sistemas geotécnicos mediante la utilización de metodologías como la inferencia estadística, la simulación de escenarios, el aprendizaje automático y la actualización de modelos basada en datos. Estas técnicas no solo permiten representar el estado actual de la infraestructura, sino también predecir su evolución bajo distintos escenarios con una medida explícita del riesgo. Además, la integración de sensores inteligentes, técnicas de adquisición de datos geoespaciales y plataformas de análisis en la nube permite que estos gemelos digitales sean alimentados continuamente con datos del entorno físico, mejorando su precisión y adaptabilidad (Lagos Sepúlveda, 2021).

La justificación para realizar una revisión bibliográfica sobre la implementación de gemelos digitales probabilísticos en el ámbito geotécnico radica en la necesidad de consolidar el conocimiento existente y establecer las tendencias más recientes en esta área interdisciplinaria. Si bien el concepto de gemelo digital ha sido ampliamente desarrollado en contextos industriales y de manufactura, su aplicación en ingeniería geotécnica aún se encuentra en una etapa emergente y carece de una sistematización clara. Esta revisión permite identificar brechas de conocimiento, evaluar las metodologías empleadas, y analizar casos de aplicación documentados en la literatura científica internacional. Asimismo, ofrece una base teórica sólida para futuras investigaciones que busquen adaptar o desarrollar modelos probabilísticos específicos para distintas tipologías de infraestructura geotécnica.

Desde el punto de vista de la viabilidad, el desarrollo de gemelos digitales probabilísticos se ve favorecido por los avances en tecnologías de sensores, conectividad, ciencia de datos e inteligencia artificial. Estos avances han reducido significativamente los costos asociados a la instrumentación y procesamiento de datos, al tiempo que han aumentado la capacidad de modelado y simulación. A nivel institucional, existe un creciente interés por parte de gobiernos, agencias de infraestructura y empresas privadas en adoptar enfoques de monitoreo inteligente como parte de estrategias de mantenimiento predictivo y resiliencia estructural. Esto sugiere que la adopción de gemelos digitales probabilísticos no solo es técnicamente posible, sino también económicamente justificable y estratégicamente deseable (González Canales, 2023).

El objetivo de este artículo es realizar una revisión bibliográfica exhaustiva sobre el uso de gemelos digitales probabilísticos en el monitoreo de infraestructuras geotécnicas, con énfasis en los fundamentos teóricos, metodologías computacionales, fuentes de incertidumbre, casos de aplicación y desafíos actuales. Se pretende establecer un marco conceptual y metodológico que permita a

investigadores, ingenieros y responsables de políticas públicas comprender el potencial de esta herramienta, identificar sus limitaciones y delinear oportunidades de desarrollo futuro. Esta revisión se sustenta en literatura científica indexada en bases de datos reconocidas, asegurando la calidad y fiabilidad de las fuentes utilizadas (Toala Arias et al., 2022).

2. Materiales y métodos

Para el desarrollo del presente artículo, se adoptó un enfoque exploratorio basado en una revisión bibliográfica sistemática con el objetivo de recopilar, analizar y sintetizar el estado actual del conocimiento relacionado con la implementación de gemelos digitales probabilísticos en el monitoreo de infraestructuras geotécnicas. Esta metodología permitió abordar el objeto de estudio desde una perspectiva integral, considerando distintas aproximaciones teóricas, modelos computacionales, aplicaciones prácticas y desafíos identificados en la literatura científica internacional.

El proceso de búsqueda de información se realizó en bases de datos académicas de alto impacto, como Scopus y Web of Science, asegurando así la relevancia y calidad de las fuentes utilizadas. Se establecieron criterios de inclusión específicos que consideraron únicamente artículos científicos publicados en revistas arbitradas, preferentemente indexadas, que abordaran temáticas vinculadas con gemelos digitales, análisis probabilístico, monitoreo geotécnico, modelado computacional e inteligencia artificial aplicada a la ingeniería civil. Asimismo, se limitaron los resultados a publicaciones comprendidas entre los años 2015 y 2024, con el fin de garantizar la actualidad de los enfoques analizados.

La estrategia de búsqueda incluyó el uso de operadores booleanos y términos clave combinados en inglés y español, tales como “probabilistic digital twin”, “geotechnical monitoring”, “uncertainty modeling”, “Bayesian updating”, “infrastructure health monitoring” y “inteligencia artificial en geotecnia”. Los resultados obtenidos fueron filtrados inicialmente por título y resumen, y posteriormente evaluados en función de su pertinencia temática y contribución al objetivo del estudio.

Una vez seleccionados los documentos relevantes, se procedió a una lectura crítica de los textos completos, extrayendo la información más significativa en relación con los fundamentos conceptuales de los gemelos digitales probabilísticos, las metodologías de implementación más comunes, los elementos de incertidumbre considerados en los modelos y los casos de estudio documentados. Esta información fue organizada y clasificada de acuerdo con categorías temáticas emergentes, lo que facilitó la estructuración del análisis y la identificación de tendencias, vacíos de investigación y oportunidades de desarrollo futuro.

Se emplearon técnicas cualitativas de análisis de contenido para interpretar los hallazgos, priorizando la profundidad en el análisis conceptual y la coherencia en la integración de los distintos enfoques revisados. La metodología también contempló la

comparación entre diferentes marcos metodológicos propuestos en la literatura, así como la valoración crítica de sus ventajas, limitaciones y grado de aplicabilidad en contextos reales de ingeniería geotécnica.

Dado el carácter exploratorio del estudio, no se realizó una meta-análisis cuantitativo, ya que el propósito principal fue interpretar y discutir el conocimiento existente más que evaluar estadísticamente la eficacia de intervenciones específicas. Esta decisión metodológica es coherente con la naturaleza interdisciplinaria y emergente del tema tratado, el cual aún se encuentra en proceso de consolidación conceptual y metodológica en el ámbito de la ingeniería civil.

Finalmente, el corpus de análisis se complementó con documentos técnicos de organismos internacionales, libros especializados y actas de congresos que presentaran avances recientes o enfoques innovadores no publicados aún en revistas científicas, siempre y cuando cumplieran con criterios de rigor académico. De esta forma, la metodología adoptada permitió una comprensión amplia y actualizada del fenómeno estudiado, aportando una base sólida para el análisis crítico y la formulación de recomendaciones en el campo de los gemelos digitales probabilísticos aplicados a infraestructuras geotécnicas.

3. Resultados

3.1. Avances metodológicos en gemelos digitales probabilísticos

La evolución de los gemelos digitales en el ámbito de la ingeniería geotécnica ha derivado hacia el desarrollo de modelos probabilísticos que integran múltiples fuentes de incertidumbre presentes en el comportamiento del subsuelo y en la interacción suelo-estructura. Este avance metodológico no solo responde a la necesidad de mayor precisión en la predicción del comportamiento de las infraestructuras, sino también a la creciente disponibilidad de datos provenientes de sensores, sistemas de monitoreo remoto e inteligencia artificial. La incorporación de la inferencia bayesiana, los modelos estocásticos, la simulación en tiempo real y el aprendizaje automático constituye una revolución en la forma en que los ingenieros conciben, representan y gestionan los activos geotécnicos (Toala Arias et al., 2022)

Uno de los pilares metodológicos más relevantes es el uso de la inferencia bayesiana para la actualización secuencial de los modelos numéricos a medida que se incorporan nuevos datos observacionales. Esta técnica, que permite integrar información previa (a priori) con datos empíricos (evidencia) para generar distribuciones de probabilidad posteriores (a posteriori), ha demostrado una notable capacidad para reducir la incertidumbre en la estimación de parámetros geotécnicos críticos, tales como la resistencia al corte, el módulo de elasticidad o la presión intersticial. Este enfoque ha sido particularmente eficaz en contextos donde las condiciones del subsuelo cambian en el tiempo, como en taludes inestables, presas de materiales sueltos o cimentaciones sometidas a ciclos de carga y descarga (Sun,

Zhang, & Zhou, 2022). A través de esta metodología, los gemelos digitales dejan de ser réplicas estáticas y deterministas para convertirse en sistemas dinámicos, que se ajustan continuamente a la realidad física, mejorando así su capacidad predictiva y su utilidad operativa.

En complemento, los modelos estocásticos permiten representar la aleatoriedad inherente al medio geotécnico mediante la simulación de variables como la heterogeneidad del terreno, la distribución espacial de propiedades mecánicas, o la ocurrencia de eventos extremos, como sismos o lluvias intensas. En lugar de una única solución, estos modelos generan múltiples escenarios posibles del comportamiento estructural, proporcionando a los tomadores de decisiones una gama de resultados asociados a distintos niveles de confianza. Esto resulta crucial en proyectos con alto impacto económico o social, donde los errores de predicción pueden tener consecuencias severas. Gras, Arroyo, Gens y Soga (2023) proponen un marco metodológico integral que incorpora campos aleatorios, redes de sensores inteligentes y simulaciones de Monte Carlo para generar gemelos digitales capaces de capturar el comportamiento probabilístico del sistema geotécnico en distintas etapas del ciclo de vida de la infraestructura.

Por otro lado, los avances en plataformas digitales y herramientas computacionales han facilitado la implementación de métodos de simulación en tiempo real, alimentados por flujos de datos continuos provenientes de sensores de presión de poros, inclinómetros, piezómetros o sistemas LIDAR. Estas plataformas integran motores de cálculo numérico con módulos de análisis de datos, permitiendo una interacción constante entre el modelo digital y su contraparte física. A esta integración se suma el aprendizaje automático, que ha potenciado la capacidad adaptativa de los gemelos digitales. Algoritmos como las redes neuronales profundas, los modelos de bosques aleatorios y los métodos de boosting han sido aplicados para detectar patrones de comportamiento no lineal en grandes volúmenes de datos, identificar precursores de fallas y optimizar modelos constitutivos del suelo (Wang, Kim, & Zhang, 2021). Esta convergencia de métodos físicos y computacionales ha dado origen a sistemas ciberfísicos capaces de tomar decisiones autónomas o semiautónomas basadas en análisis probabilísticos y datos históricos.

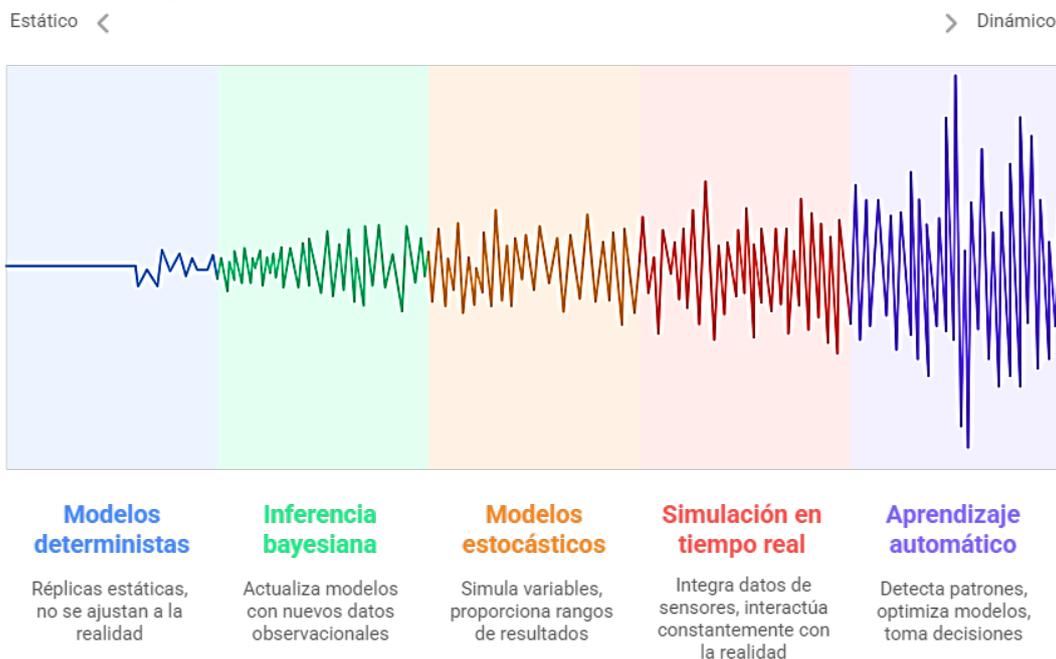
Un desafío metodológico adicional ha sido la adaptación de marcos conceptuales de gemelos digitales, originalmente diseñados para industrias con condiciones de operación controladas (como la aeroespacial o la manufacturera), al entorno impredecible y heterogéneo de la geotecnia. Mientras que en industrias como la automotriz las condiciones de carga y los parámetros materiales pueden medirse con alta precisión y replicarse en laboratorio, en geotecnia la incertidumbre es estructural y muchas veces no reducible (Toala Arias et al., 2022). Esto ha exigido reformular las arquitecturas de los gemelos digitales, diseñando modelos que incorporen límites difusos, datos incompletos y condiciones de contorno dinámicas. Zhang, Li y Chen (2023) proponen una arquitectura de gemelo digital orientada específicamente a geotecnia, basada en sistemas distribuidos de adquisición de datos, modelos

geomecánicos estocásticos y módulos de inferencia continua, permitiendo una mayor fidelidad entre el modelo y el comportamiento real de la infraestructura (Fatás Casanovas, 2024).

En resumen, los avances metodológicos en gemelos digitales probabilísticos han transformado la manera en que se monitorean, modelan y mantienen las infraestructuras geotécnicas. Al incorporar técnicas de inferencia bayesiana, simulaciones estocásticas y aprendizaje automático, se fortalece la capacidad de anticipar fallas, gestionar riesgos y tomar decisiones informadas bajo incertidumbre. Estas metodologías no solo representan una mejora técnica, sino también un cambio epistemológico profundo en la ingeniería geotécnica, orientado hacia un enfoque más flexible, adaptativo y basado en datos, en la presente figura 1 se demuestra la transformación que permite la representación más precisa, interactiva y adaptativa del comportamiento del subsuelo.

Figura 1

Evolución de los gemelos digitales geotécnicos: de la estática a la dinámica



Nota: Representación de lo estático a lo inteligente: los gemelos digitales ahora aprenden y se ajustan a la realidad (Autores, 2024).

3.2. Aplicaciones y desafíos en infraestructuras geotécnicas

La adopción de gemelos digitales probabilísticos en infraestructuras geotécnicas representa un avance disruptivo en el monitoreo, análisis predictivo y gestión del riesgo en obras de ingeniería civil de alta complejidad. Su aplicabilidad en estructuras como presas, taludes y túneles está estrechamente relacionada con la capacidad de estos sistemas para integrar incertidumbre, datos en tiempo real y simulaciones numéricas adaptativas, permitiendo una representación fiel, dinámica y estadísticamente robusta del comportamiento estructural. A pesar de los logros alcanzados, aún persisten importantes retos que limitan su escalabilidad, efectividad

técnica y viabilidad económica. Esta sección presenta un análisis profundo sobre las principales aplicaciones documentadas y los desafíos técnicos que enfrenta su implementación (González Canales, 2023).

3.2.1. Casos en presas, taludes y túneles

Las presas, particularmente aquellas construidas con materiales sueltos o compactados, presentan condiciones de operación que se ven afectadas por la variabilidad hidrogeológica, las filtraciones internas y la evolución de esfuerzos no uniformes a lo largo del tiempo. En este contexto, la aplicación de gemelos digitales probabilísticos ha demostrado ser especialmente eficaz al permitir la anticipación de comportamientos anómalos mediante el acoplamiento de sensores geotécnicos, modelado numérico y simulaciones estocásticas. Un ejemplo emblemático se encuentra en la presa de Shuibuya (China), donde se integró un sistema digital que combina inferencia bayesiana, datos de presión intersticial y deformación, generando un entorno de modelado dinámico que permitió identificar patrones de comportamiento asociados a fallas potenciales antes de que se manifestaran físicamente (Wu, Tang, & Zhang, 2023). El gemelo digital, en este caso, sirvió como un sistema de alerta temprana que fortaleció significativamente la toma de decisiones operativas y de mantenimiento.

En el ámbito de los taludes, especialmente aquellos que bordean infraestructuras viales o ferroviarias, el uso de gemelos digitales ha permitido modelar la evolución del factor de seguridad en función de variables exógenas como las precipitaciones, la sismicidad o los cambios en el nivel freático. La aplicación desarrollada en los taludes del corredor ferroviario Lyon-Turín representa un caso de referencia, donde se empleó un sistema de monitoreo híbrido que incluía radar interferométrico terrestre (GBInSAR), estaciones topográficas y sensores inerciales conectados a una plataforma digital que ejecutaba simulaciones probabilísticas en tiempo real. El modelo digital fue capaz de anticipar deslizamientos incipientes con una precisión superior a las metodologías convencionales, generando un historial de datos útil para la calibración de modelos futuros (Crespo, Gallipoli, & Tasiopoulou, 2021).

En lo que respecta a túneles, estos representan uno de los entornos más desafiantes para el monitoreo estructural debido a la dificultad de acceder al terreno circundante durante la excavación, así como a la heterogeneidad litológica que puede encontrarse incluso en trayectos cortos. En el túnel urbano de Oslo (Noruega), se implementó un gemelo digital que integraba un modelo tridimensional del frente de excavación con retroalimentación de sensores de convergencia y presiones de contacto. Este sistema permitió ajustar en tiempo real los parámetros del modelo numérico mediante algoritmos de actualización bayesiana, facilitando una excavación más segura y eficiente (Johansen, Ødegård, & Hjelseth, 2022). Este tipo de aplicación evidencia cómo el gemelo digital no solo cumple una función pasiva de representación, sino que actúa como agente activo en la toma de decisiones técnicas durante la fase constructiva.

3.2.2. Limitaciones por sensores y variabilidad del terreno

A pesar de sus beneficios, la efectividad de los gemelos digitales probabilísticos depende directamente de la calidad y representatividad de los datos recolectados por los sistemas de sensores. Las infraestructuras geotécnicas, al estar ubicadas en entornos naturales altamente variables, requieren sensores capaces de operar en condiciones adversas, con rangos de medición amplios, bajo consumo energético y mínima necesidad de mantenimiento. No obstante, la realidad técnica actual presenta limitaciones significativas. Los sensores tradicionales, como los piezómetros y los extensómetros, si bien confiables, tienen cobertura espacial limitada y pueden presentar problemas de calibración o interferencia electromagnética. Incluso los sistemas de fibra óptica, a pesar de sus ventajas en términos de resolución y durabilidad, requieren una instalación costosa y especializada (Liu, Wu, Zhang, & Wang, 2021).

Adicionalmente, la variabilidad intrínseca del terreno plantea uno de los retos más complejos para la implementación de modelos digitales probabilísticos. La heterogeneidad espacial de parámetros como la cohesión, el ángulo de fricción o la permeabilidad puede derivar en comportamientos no lineales que son difíciles de capturar incluso con modelos estocásticos. La baja densidad de instrumentación en muchos proyectos implica que se deben hacer inferencias sobre grandes volúmenes de suelo a partir de un número limitado de observaciones, lo que puede introducir errores en la simulación digital. Para mitigar esta limitación, se han comenzado a explorar algoritmos de aprendizaje automático robusto que permiten imputar datos faltantes o reducir el ruido en señales reales sin comprometer la fidelidad del modelo digital (Zhang, Li, & Chen, 2023).

3.2.3. Retos de validación, escalabilidad y costos

La validación de gemelos digitales probabilísticos en contextos geotécnicos plantea desafíos de orden técnico y metodológico. Dado que muchas de las condiciones de carga, geometría y propiedades del terreno no pueden reproducirse experimentalmente, resulta difícil establecer criterios de validación directa entre el modelo digital y el sistema físico. Este problema se agrava por la ausencia de estándares unificados que definan métricas de precisión, convergencia y desempeño en entornos probabilísticos. En respuesta a esta carencia, algunos autores proponen el uso de validación cruzada mediante datos históricos, comparación entre modelos múltiples y análisis de sensibilidad probabilística como mecanismos alternativos de validación (Giuffrè, Granà, & Marino, 2020).

En cuanto a la escalabilidad, la implementación de gemelos digitales en obras de gran envergadura o con presupuestos restringidos aún representa una barrera. Las plataformas más avanzadas requieren una combinación de hardware especializado, almacenamiento en la nube, herramientas de modelado numérico y personal altamente capacitado. Esto limita su aplicación a proyectos piloto o infraestructuras críticas con alto presupuesto. La interoperabilidad entre software de simulación, bases

de datos geoespaciales y redes de sensores aún es baja, lo que obliga a procesos de adaptación técnica que elevan los tiempos y costos de implementación (Facio Medina, 2020).

En términos económicos, los costos iniciales de un gemelo digital probabilístico pueden ser significativos, considerando la necesidad de sensores avanzados, sistemas de procesamiento y modelado, y formación técnica. Sin embargo, diversos estudios muestran que, a largo plazo, esta inversión se ve compensada con una mayor eficiencia en la gestión del mantenimiento, reducción de intervenciones correctivas y prevención de fallas catastróficas. Zhang et al. (2023) destacan que la adopción temprana de estas tecnologías puede reducir los costos del ciclo de vida de una infraestructura geotécnica en hasta un 20 %, especialmente en contextos de alta criticidad estructural o complejidad geológica.

4. Discusión

La implementación de gemelos digitales probabilísticos en el monitoreo de infraestructuras geotécnicas representa un cambio de paradigma en la forma en que se conciben, analizan y gestionan sistemas estructurales en contextos naturales complejos. La evidencia analizada a lo largo de esta revisión bibliográfica revela que estos modelos avanzados no solo permiten una representación dinámica y continua del estado estructural, sino que integran de manera explícita la incertidumbre inherente al comportamiento del subsuelo, superando las limitaciones de los enfoques deterministas tradicionales (Fatás Casanovas, 2024).

Desde un punto de vista metodológico, se destaca el papel central que desempeñan las técnicas de inferencia bayesiana y los modelos estocásticos en la construcción de gemelos digitales capaces de actualizarse en tiempo real con datos empíricos. Esta capacidad adaptativa es particularmente valiosa en geotecnia, donde la escasa visibilidad del medio y la variabilidad espacial de los parámetros materiales dificultan una caracterización exacta a priori. La literatura revisada muestra cómo la inferencia bayesiana ha sido empleada con éxito en presas y túneles para refinar modelos a medida que se acumulan datos de monitoreo, mejorando la precisión predictiva y el control del riesgo estructural (Sun, Zhang, & Zhou, 2022; Wu, Tang, & Zhang, 2023). No obstante, la implementación efectiva de estos modelos exige una base de datos densa y confiable, lo cual no siempre es factible debido a las restricciones técnicas y económicas presentes en muchos proyectos de ingeniería civil.

La aplicación de plataformas digitales que combinan simulación numérica, inteligencia artificial y redes de sensores ha permitido una integración sin precedentes entre el entorno físico y el entorno virtual. El uso de algoritmos de aprendizaje automático ha potenciado la capacidad de los gemelos digitales para interpretar grandes volúmenes de datos, detectar patrones no lineales y anticipar fallos estructurales con mayor eficiencia. Esta sinergia ha sido particularmente útil en escenarios de comportamiento

complejo, como los deslizamientos de taludes o la deformación progresiva de túneles urbanos, donde las condiciones cambian rápidamente y las decisiones deben tomarse con base en información en tiempo real (Crespo, Gallipoli, & Tasiopoulou, 2021; Johansen, Ødegård, & Hjelseth, 2022).

A pesar de estos avances, persisten desafíos técnicos significativos que limitan la masificación de esta tecnología. Entre ellos, la fiabilidad y resolución de los sensores utilizados en condiciones geotécnicas adversas siguen siendo un factor crítico. La cobertura espacial limitada, la susceptibilidad a interferencias ambientales y la complejidad del mantenimiento de sensores en terreno dificultan una recolección de datos continua y precisa. Además, la heterogeneidad geológica no solo introduce incertidumbre epistemológica en los modelos, sino que también complica los procesos de interpolación y validación cruzada. Como señalan Liu et al. (2021), la efectividad del gemelo digital está condicionada por la calidad de los datos de entrada y por la robustez de los algoritmos de integración que permiten su actualización en contextos de alta variabilidad.

Otro aspecto crítico identificado es la falta de marcos estandarizados para la validación de gemelos digitales en geotecnia. A diferencia de otras disciplinas donde existen protocolos experimentales bien definidos, en geotecnia las condiciones del terreno no son replicables y muchas veces los datos de referencia son escasos o incompletos. Esto requiere el desarrollo de nuevas metodologías de validación basadas en la comparación probabilística de escenarios, la calibración cruzada con eventos históricos y la evaluación de métricas de desempeño bajo incertidumbre (Giuffrè, Granà, & Marino, 2020).

En términos de escalabilidad y sostenibilidad económica, si bien los costos iniciales de implementación son elevados, los beneficios en términos de optimización del mantenimiento, prolongación de la vida útil y reducción de fallas no anticipadas justifican la inversión en el mediano y largo plazo. Estudios recientes han demostrado que el uso de gemelos digitales puede reducir en más de un 20 % los costos del ciclo de vida de infraestructuras críticas, lo que sugiere una oportunidad estratégica para su adopción en proyectos de alta responsabilidad estructural (Zhang, Li, & Chen, 2023).

En suma, la discusión evidencia que el desarrollo de gemelos digitales probabilísticos en infraestructuras geotécnicas se encuentra en una etapa de transición entre la validación conceptual y la aplicación operacional. Si bien las experiencias documentadas en presas, taludes y túneles muestran resultados alentadores, es necesario continuar avanzando en la estandarización de metodologías, la integración de datos multifuente, el diseño de sensores robustos y el fortalecimiento de capacidades técnicas para maximizar el potencial transformador de esta tecnología. La combinación de enfoques probabilísticos, inteligencia artificial y monitoreo geotécnico en tiempo real tiene el potencial no solo de mejorar la eficiencia técnica de

los proyectos, sino también de redefinir las prácticas de seguridad, mantenimiento y sostenibilidad en la ingeniería civil del siglo XXI (Facio Medina, 2020).

5. Conclusiones

La revisión realizada permite concluir que la implementación de gemelos digitales probabilísticos en infraestructuras geotécnicas constituye una estrategia avanzada y de alto potencial para el monitoreo, análisis y gestión de estructuras sometidas a condiciones geológicas complejas y dinámicas. Estos modelos representan una evolución significativa frente a los enfoques deterministas tradicionales, al incorporar explícitamente la incertidumbre inherente al comportamiento del subsuelo y al integrar datos en tiempo real provenientes de sensores distribuidos.

Desde una perspectiva metodológica, el uso de técnicas como la inferencia bayesiana, los modelos estocásticos y el aprendizaje automático ha demostrado una capacidad notable para mejorar la precisión predictiva, facilitar la actualización continua del modelo y optimizar la toma de decisiones bajo condiciones de riesgo. La integración de estas herramientas dentro de plataformas digitales permite no solo una representación más fiel del estado estructural, sino también la generación de alertas tempranas y la planificación eficiente del mantenimiento.

Las aplicaciones en presas, taludes y túneles han evidenciado resultados positivos en cuanto a la detección temprana de fallas, la reducción de incertidumbre y el soporte a la operación y la construcción en entornos críticos. No obstante, su implementación generalizada enfrenta desafíos significativos relacionados con la instrumentación del terreno, la variabilidad geológica, la validación de modelos y los costos asociados al desarrollo e integración de estas tecnologías.

A pesar de estas limitaciones, los beneficios técnicos, operacionales y económicos que ofrecen los gemelos digitales probabilísticos justifican su desarrollo continuo y su incorporación en proyectos de infraestructura de alta responsabilidad. La maduración de esta tecnología requerirá esfuerzos coordinados en investigación, estandarización, desarrollo de sensores robustos y formación de profesionales capacitados en la intersección entre geotecnia, modelado computacional e inteligencia artificial.

En síntesis, los gemelos digitales probabilísticos no solo representan una innovación tecnológica, sino también una transformación profunda en las prácticas de monitoreo y gestión de infraestructuras geotécnicas. Su adopción progresiva abrirá nuevas posibilidades para alcanzar niveles superiores de seguridad, sostenibilidad y eficiencia en la ingeniería civil contemporánea.

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.

Referencias Bibliográficas

- Aguado, M. (2023). *Caracterización geológica y aplicaciones de las arenas silíceas en infraestructuras costeras: Incertidumbres en los modelos de predicción* [Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.69762>
- Beltrán-Jimenez, S. S., Gómez-Reina, M. Ángel, Monsalve-Estrada, N. Y., Ospina-Ladino, M. C., & López-Muñoz, L. G. (2023). Optimización del Overrun (aireado), del rendimiento, de los sólidos solubles y los costos de un helado mediante el diseño de mezclas. *Journal of Economic and Social Science Research*, 3(4), 68–83. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v3/n4/81>
- Crespo, M., Gallipoli, D., & Tasiopoulou, P. (2021). Monitoring landslides with digital twin frameworks: Application to the Lyon–Turin railway. *Engineering Geology*, 289, 106218.
- Cuervo Reyes, M. H. (2020). *Tecnologías digitales de la construcción* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio Séneca. <http://hdl.handle.net/1992/5096>
- Facio Medina, A. (2020). *Algoritmos de optimización para la provisión de máquinas virtuales en la nube elástica de Amazon para la ejecución de gemelos digitales de procesos industriales* [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, CICESE]. Repositorio CICESE. <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3347>
- Fatás Casanovas, O. (2024). *Gemelo digital de una viga biapoyada para la monitorización del daño a fatiga* [Trabajo de fin de grado, Escola d'Enginyeria de Barcelona Est, Universitat Politècnica de Catalunya]. UPCommons. <http://hdl.handle.net/2117/405085>
- Giuffrè, T., Granà, A., & Marino, S. (2020). A digital twin decision support system for bridge management based on safety, condition and risk assessment. *Structure and Infrastructure Engineering*, 17(3), 429–447.
- González Canales, J. A. (2023). *Relación entre la probabilidad de existencia de permafrost y la susceptibilidad de remociones en masa en la zona alta de la cuenca del río Huasco, Región de Atacama* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/194406>
- Gras, J. P., Arroyo, M., Gens, A., & Soga, K. (2023). A framework for the development of digital twins in geotechnical engineering. *Computers and Geotechnics*, 157, 105366.
- Johansen, T., Ødegård, M., & Hjelseth, E. (2022). Real-time digital twins in tunneling: Integrating probabilistic modeling and sensor feedback. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 130, 105016.
- Lagos Sepúlveda, C. S. (2021). *Análisis de riesgo en el proceso constructivo de túneles construidos con TBM* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile].

Repositorio Académico Universidad de Chile.
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181329>

- Liu, Z., Wu, Z., Zhang, J., & Wang, Y. (2021). Challenges and strategies of sensor deployment in geotechnical digital twin systems. *Sensors*, 21(12), 4024.
- Sun, H., Zhang, D., & Zhou, C. (2022). Probabilistic digital twins for geotechnical systems: Framework, challenges and opportunities. *Computers and Geotechnics*, 144, 104648.
- Toala Arias , F. J., Maldonado Zuñiga , K. ., Toala Zambrano , M. M. ., & Álava Cruzatty , J. E. . (2022). Gemelos digitales en la industria. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, 4(1), 75–83. Recuperado a partir de <https://www.editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/view/29>
- Wang, X., Kim, Y., & Zhang, C. (2021). Real-time monitoring and probabilistic assessment of geotechnical structures using digital twins. *Journal of Infrastructure Systems*, 27(3), 04021030.
- Wu, C., Tang, C., & Zhang, D. (2023). Bayesian-based digital twin for dam safety monitoring: A case study of Shuibuya dam. *Computers and Geotechnics*, 156, 105354.
- Zapata-Mendoza, P. C. O., Villalta-Arellano, S. R., Berrios-Zevallos, A. A., Atto-Coba, S. R., & Berrios-Taucaya, O. J. (2023). *Sostenibilidad ambiental en el diseño arquitectónico de plantas procesadoras de alimentos*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.59>
- Zhang, L., Li, J., & Chen, Q. (2023). Application of digital twin technology in geotechnical engineering: A comprehensive review. *Automation in Construction*, 149, 104790.