



Aplicaciones de inteligencia artificial para la identificación de daños estructurales en edificaciones. Una revisión sistemática

Artificial intelligence applications for the identification of structural damage in buildings. A systematic review

Aplicações da inteligência artificial para a identificação de danos estruturais em edifícios. Uma revisão sistemática

Luis Leonardo Zambrano Salazar^I
ll.zambrano@uta.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0001-5966-8123>

Enma Katherine Gamboa López^{II}
egamboa@mtop.gob.ec
<https://orcid.org/0009-0005-5996-1820>

Correspondencia: ll.zambrano@uta.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 20 de mayo de 2024 * **Aceptado:** 22 de junio de 2024 * **Publicado:** 05 de julio de 2024

- I. Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.
- II. Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, Ecuador.

Resumen

La detección de daños estructurales en edificaciones es un aspecto fundamental para garantizar la seguridad de las construcciones y prevenir posibles daños mayores. En este sentido, la aplicación de herramientas de inteligencia artificial (IA) ha surgido como una alternativa prometedora para mejorar la eficacia y precisión en la detección de estos daños. En esta revisión sistemática se analizaron diversos estudios que reportan la aplicación de diversas herramientas de IA como Redes Neuronales, Machine Learning y ChatGPT como apoyo en las inspecciones de las estructuras. Las técnicas de IA identificadas en la literatura, permiten analizar de forma automatizada y precisa las imágenes y datos recopilados de las estructuras, identificando posibles áreas de daño. Los resultados de los estudios revisados muestran que la aplicación de herramientas de IA permite mejorar la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos, lo que contribuye a una mejor gestión de la seguridad de las construcciones. Se sugiere la necesidad de continuar desarrollando experimentos que enriquezcan y potencien estos modelos para lograr una eficiencia cada vez mayor y más depurada.

Palabra clave: Inteligencia Artificial, Daños estructurales, Edificaciones, Ingeniería Civil.

Abstract

The detection of structural damage in buildings is a fundamental aspect to guarantee the safety of constructions and prevent possible major damage. In this sense, the application of artificial intelligence (AI) tools has emerged as a promising alternative to improve the efficiency and accuracy of damage detection. In this systematic review, several studies reporting the application of various AI tools such as Neural Networks, Machine Learning and ChatGPT as support in the inspections of structures were analyzed. The AI techniques identified in the literature, allow automated and accurate analysis of the images and data collected from the structures, identifying possible areas of damage. The results of the reviewed studies show that the application of AI tools allows improving the accuracy and reliability of the obtained results, which contributes to a better management of building safety. It is suggested the need to continue developing experiments that enrich and enhance these models to achieve an increasingly greater and more refined efficiency.

Keywords: Artificial Intelligence, Structural Damage, Buildings, Civil Engineering

Resumo

A detecção de danos estruturais em edifícios é um aspeto fundamental para garantir a segurança dos edifícios e prevenir possíveis danos adicionais. Neste sentido, a aplicação de ferramentas de inteligência artificial (IA) surgiu como uma alternativa promissora para melhorar a eficácia e a precisão na detecção destes danos. Nesta revisão sistemática foram analisados diversos estudos que relatam a aplicação de diversas ferramentas de IA como Redes Neurais, Machine Learning e ChatGPT como apoio nas inspeções de estruturas. As técnicas de IA identificadas na literatura permitem que as imagens e os dados recolhidos das estruturas sejam analisados de forma automatizada e precisa, identificando possíveis áreas de dano. Os resultados dos estudos revistos mostram que a aplicação de ferramentas de IA permite melhorar a precisão e fiabilidade dos resultados obtidos, o que contribui para uma melhor gestão da segurança na construção. Sugere-se a necessidade de continuar a desenvolver experiências que enriqueçam e melhorem estes modelos para alcançar uma eficiência cada vez maior e mais refinada.

Palavra-chave: Inteligência Artificial, Danos Estruturais, Edifícios, Engenharia Civil.

Introducción

Una falla estructural en una edificación se produce cuando su estructura principal de hormigón armado colapsa, ya sea por fracturas u otros efectos que puedan llevar a grandes pérdidas. Este colapso no siempre implica la destrucción total de la edificación, sino que también se refiere a situaciones donde la estructura no logra funcionar según lo diseñado.

La razón detrás del colapso de una estructura de hormigón armado radica en que uno o más elementos no tienen la resistencia suficiente para soportar las cargas externas, lo que impide la correcta distribución de fuerzas hacia los apoyos.

Este proceso suele ser progresivo, con un efecto dominó que provoca colapsos parciales en diferentes partes de la estructura, hasta que finalmente ya no hay manera de sostener las cargas y se produce el colapso total. (Zaruma, 2024).

Restaurar los elementos fallidos en una estructura, es posible y para lograrlo, es necesario investigar el origen de la falla, analizar sus causas y comprender por qué sucedió. También es importante identificar los posibles efectos posteriores, establecer responsabilidades y recomendar una solución al problema. Es fundamental recopilar evidencia después del colapso, ya que esto proporcionará información relevante sobre los mecanismos de la falla.

Identificar estos daños estructurales puede lograrse al detectar cambios significativos en la respuesta dinámica, que superen los valores normales. Esta detección se basa en el hecho de que los parámetros dinámicos están influenciados por las características físicas y estructurales, como la masa y la rigidez. Por lo tanto, la presencia de daños en elementos estructurales provocará cambios en las frecuencias naturales, en el amortiguamiento y en las formas modales. Sin embargo, es importante tener en cuenta que existen otros factores que pueden generar variaciones similares en la respuesta dinámica y dificultar la detección precisa de daños estructurales. (Lozano, 2019).

Entre las principales causas del deterioro estructural en las edificaciones se encuentran los daños derivados de errores de diseño como errores conceptuales en la planificación estructural, defectos en la composición de la mezcla, fallos en la solución de los detalles constructivos, mala ejecución de cimientos y refuerzos o elección inadecuada del tipo de estructura.

En algunos casos, las patologías estructurales pueden originarse por deficiencias en la colocación de encofrados, errores en la disposición de las armaduras de acero, insuficiente recubrimiento en las armaduras, uso de hormigón inapropiado, falta de compactación, insuficiente curado o interrupciones en el vertido del hormigón.

No obstante, la degradación de materiales como el concreto es impredecible, por lo que es necesario realizar inspecciones periódicas para garantizar la integridad estructural, estas inspecciones pueden conducir a la necesidad de llevar a cabo labores de mantenimiento, reparación, rehabilitación o refuerzo en la estructura. (Ingenieros Asesores, 2021).

Además, variables externas como el clima, fenómenos geológicos y las condiciones del entorno impactan directamente en los materiales de construcción y, por ende, en el diseño de la estructura. Por este motivo, es esencial conocer el estado de la edificación y las posibles patologías que puedan presentarse.

En este sentido, explorar alternativas a las metodologías existentes para la detección de daños estructurales, representa un gran aporte para la Ingeniería Civil. Es así como el objetivo principal de esta revisión es conocer cómo la aplicación de la Inteligencia Artificial (IA) permite la identificación de daños estructurales en edificaciones, ya que es bien sabido que las soluciones dentro de la IA van marcando gran diferencia en todas las áreas.

Planteamiento del problema

La fiabilidad de los sistemas estructurales se puede describir como la posibilidad de que la estructura en cuestión tenga un desempeño adecuado a lo largo de su permanencia en funcionamiento. La vida útil

de una estructura se refiere al tiempo desde su puesta en servicio, durante el cual debe mantener condiciones de seguridad, funcionalidad y apariencia satisfactorias. Durante este período, será necesario realizar labores de mantenimiento normales sin necesidad de llevar a cabo rehabilitaciones. (Sánchez, 2017).

Es posible que en algunas edificaciones afloren fallos o defectos habiendo transcurrido un tiempo desde la finalización de estas, los cuales pueden ser consecuencia de errores en la fase de ejecución de la obra o de deficiencia en el proyecto y que ponen en riesgo a los usuarios, además de generar costos de reparación muy elevados. (ERN, 2017).

Muchas veces, estos fallos son difíciles de identificar y diagnosticar, además está el hecho de que las estructuras civiles pueden sufrir daños por diversos factores como el uso, el paso del tiempo, sobrecargas, fatiga, eventos sísmicos o explosivos.

Debido a lo anterior, es crucial realizar una evaluación constante del estado estructural de las edificaciones a través de un sistema de detección de fallos para tomar decisiones oportunas en cuanto a su reforzamiento o reparación. De esta manera, se reduce al máximo el riesgo de daños graves y se protege la seguridad de las estructuras y de quienes las utilizan.

Por otro lado, el peligro sísmico acecha a innumerables regiones a nivel global, por lo que es vital implementar medidas que permitan reducir los impactos negativos de un terremoto, como realizar estudios para evaluar el comportamiento de las estructuras ante dichos eventos, con el fin de planificar y mitigar sus devastadoras consecuencias.

La inspección visual puede ofrecer rápidamente una idea de los posibles daños estructurales presentes en una edificación, sin embargo, es necesario realizar una evaluación más exhaustiva utilizando equipos y tecnologías especializadas para analizar de forma más precisa el comportamiento de la estructura y poder desarrollar planes de refuerzo estructural y reducción de riesgos. (Cunalata & Caiza, 2022).

En este contexto, la revisión sistemática se enfocará en dar respuesta a la siguiente interrogante: ¿En qué medida las aplicaciones de inteligencia artificial pueden mejorar la precisión y eficacia en la identificación de daños estructurales en edificaciones?

Justificación

La presente revisión sistemática aborda un tema de gran relevancia en el campo de la ingeniería estructural, como lo es la identificación de daños en edificaciones.

La ingeniería estructural se basa en principios científicos y matemáticos para desarrollar estructuras seguras y eficientes, teniendo en cuenta variables como el peso, la carga, las fuerzas sísmicas y los

vientos fuertes al diseñar una estructura. Para ello emplea materiales duraderos como el acero y el hormigón y utiliza técnicas avanzadas de modelado y simulación para prever el comportamiento estructural, ya que una infraestructura resistente y bien planificada no solo previene tragedias y desastres, sino que también infunde confianza a sus usuarios. (SEDETEC-Servicios, 2023).

Actualmente, la implementación de tecnologías de Inteligencia Artificial (IA) ha demostrado ser una herramienta eficaz para detectar de manera temprana y precisa posibles daños en estructuras, lo que permite tomar medidas preventivas y correctivas de forma oportuna.

El uso de algoritmos de IA en la identificación de daños estructurales en edificaciones ha mostrado resultados prometedores en diversos estudios, tanto a nivel experimental como a nivel teórico, ya que estos modelos permiten analizar grandes volúmenes de datos, identificar patrones y anomalías y predecir posibles fallos estructurales con una mayor precisión que los métodos tradicionales.

Por lo tanto, en esta investigación se recopilará y analizará de manera exhaustiva la evidencia científica disponible sobre las aplicaciones de IA en la identificación de daños estructurales en edificaciones, siendo este el objetivo primordial de la misma.

Adicionalmente, se identificarán los diferentes tipos de daños estructurales que pueden ser detectados mediante técnicas de inteligencia artificial, las ventajas y limitaciones existentes y en cuáles actividades de proyectos de Ingeniería Civil pueden ser aplicadas.

Metodología

Se realizó una revisión sistemática de literatura científica con el fin de recopilar evidencias de diversos autores sobre las aplicaciones de la Inteligencia Artificial en la identificación de daños estructurales en edificaciones.

La búsqueda se realizó en diferentes bases de datos como Scielo, Dialnet, Redalyc y Google Scholar y se incluyó en la búsqueda artículos científicos, revisiones sistemáticas y tesis de grado. Para realizar la búsqueda se utilizaron combinaciones de las siguientes palabras claves: “Inteligencia Artificial”, “Daños estructurales”, “Edificaciones”, “Ingeniería Civil”, “Artificial Intelligence”, “Structural Damage”, “Buildings”, “Civil Engineering”

Se hizo uso de los operadores booleanos AND y OR para acceder a la investigación en las bases de datos mencionadas, lo cual contribuyó a la reducción del tiempo de búsqueda y la facilitó. Se establecieron como criterios de inclusión los siguientes: artículos con fecha de publicación del 2019 en adelante, investigaciones publicadas en inglés y en español, artículos completos y de acceso abierto.

De la revisión se excluyeron todas las investigaciones publicadas antes del 2019, las que estuviesen en

idiomas diferentes al inglés o al español, artículos incompletos o duplicados en las diferentes bases de datos, artículos de acceso restringido. Se encontraron inicialmente 164 artículos, de los cuales se seleccionaron 12 para incluir en esta revisión.

Resultados

Luego de revisar los artículos incluidos, se distinguen tres principales modelos o herramientas de IA utilizados para la identificación de daños estructurales, siendo estos el ChatGPT, las Redes Neuronales y el Machine Learning (ML) / Deep Learning (DL).

En el cuadro 1 se presenta el artículo relacionado con el Chat GPT.

Tabla 1: *Artículos relacionados con el ChatGPT*

Autor(es) / Año	Título
Cohaila & Gómez, 2023.	Implementación de un asistente virtual estructural para automatizar el análisis sísmico de un edificio multifamiliar utilizando inteligencia artificial.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2: *Se presentan los artículos relacionados con Redes Neuronales.*

Autor(es) / Año	Título
Aldana et al. 2023.	Uso de redes neuronales convolucionales en UAVs para la detección de anomalías estructurales.
Moreno, 2020.	Detección, localización y cuantificación de daños en estructuras civiles metálicas midiendo vibraciones.
Palacin, 2023.	Detección del daño estructural en viviendas de Albañilería Confinada mediante Redes Neuronales Artificiales con la aplicación de los modelamientos numéricos MEF y MCA, Pasco 2023.
Jiménez & Alfaro, 2019.	Fatigue damage effect approach by artificial neural network.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3: Artículos relacionados con *Machine Learning (ML)* / *Deep Learning (DL)*.

Autor(es) / Año	Título
González et al., 2023.	Sistema de gestión integral para el mantenimiento predictivo de vías interurbanas mediante técnicas de Inteligencia Artificial.
Yepes et al, 2023.	La inteligencia artificial en la ingeniería civil: oportunidades y desafíos.
Ortega, 2021.	Aprendizaje profundo para la detección automática de fisuras de hormigón usando redes neuronales convolucionales.
Kristombu et al. 2022.	Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications.
Avci et al., 2021.	A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications
Zhang et al. 2021.	Probabilistic estimation of flexural loading capacity of existing RC structures based on observational corrosion-induced crack width distribution using Machine Learning.
Wang et al. 2023.	State-of-the-art AI-based computational analysis in civil engineering

Fuente: Elaboración Propia.

ChatGPT

El ChatGPT se presenta como un asistente virtual que colabora en la automatización de procesos en el análisis sísmico de edificios residenciales, optimizando recursos y ofreciendo un servicio de excelencia. (Cohaila & Gómez, 2023).

Mediante la automatización con Python y con el asistente virtual, estos autores lograron reducir el

tiempo de desarrollo del análisis sísmico a un aproximado de 1 hora, lo que representa una reducción del 70 % del tiempo que tarda un especialista en realizar el análisis.

Redes Neuronales

Las redes neuronales artificiales son una forma adecuada de establecer una relación entre los efectos de la secuencia y la vida a fatiga. Los algoritmos y modelos de Inteligencia Artificial pueden mejorar el análisis de pandeo y fatiga de componentes estructurales. (Jiménez & Alfaro, 2019). Estos autores analizaron la fatiga de piezas de acero empleando una red neuronal para predecir el comportamiento de pandeo de elementos sometidos a tensión axial en diversas geometrías.

En este sentido, Palacin (2023), utiliza datos de análisis realizados a través del Método de Elementos Finitos (MEF) y del Método de Columna Ancha (MCA), para entrenar una Red Neuronal Artificial (RNA) que permita identificar, localizar y cuantificar el daño estructural. Por medio de RNA, identifica y mide la pérdida de rigidez mediante la reducción del módulo de elasticidad en los componentes, utilizando los métodos de modelado numérico mencionados y que han sido aceptados y validados en el análisis de estructuras.

Por su parte, Aldana et al., (2023), destaca la eficacia de combinar redes neuronales convolucionales (CNN) con un software, para lograr la detección de fallos estructurales más rápida y precisa en comparación con los métodos tradicionales, exponiendo un método innovador para examinar infraestructuras como edificios y puentes, los cuales a menudo presentan áreas de difícil alcance.

El enfoque de su investigación se centra en la utilización de redes neuronales convolucionales (CNN) para analizar imágenes capturadas por drones (UAVs) con el propósito de identificar posibles daños estructurales. Destaca la relevancia de la implementación de esta tecnología en el contexto operativo actual, donde la inspección visual directa es restringida y riesgosa en diversas circunstancias. Los UAVs se presentan como una solución al proporcionar acceso visual a áreas no accesibles, mientras que las CNN se posicionan como una valiosa herramienta para analizar las imágenes obtenidas.

Moreno (2020), señala que se requiere de sistemas que sean capaces de procesar grandes volúmenes de datos, con el fin de detectar, localizar y medir los daños en estructuras civiles metálicas y poder determinar su estado de integridad, para ello, utiliza Redes Neuronales Artificiales, para detectar, localizar y cuantificar daños en estructuras civiles metálicas.

Machine Learning (ML) / Deep Learning (DL)

Los métodos numéricos tradicionales todavía demandan un esfuerzo manual considerable y no

satisfacen los estándares actuales en cuanto a precisión, eficiencia, transparencia y versatilidad, lo que hace imperativo el uso de tecnologías de la información más sofisticadas para lograr avances significativos.

De acuerdo con la perspectiva del modelado fenomenológico, las tecnologías emergentes de inteligencia artificial (IA), como el aprendizaje automático (ML) y el aprendizaje profundo (DL), brindan nuevas oportunidades para superar las restricciones de la cognición empírica y disminuir la dependencia de la intervención manual. El ML, que incluye el DL, puede detectar patrones ocultos en los datos y aproximar de forma precisa funciones continuas que conectan distintos conjuntos de información. (Wang et al, 2023).

Debido a esto, los modelos basados en aprendizaje automático, son un enfoque confiable y eficiente para estimar la capacidad estructural de elementos corroídos y demuestra el potencial para evaluar la condición de deterioro de las estructuras. Zhang et al., (2021), aplican métodos de aprendizaje automático para predecir la distribución de pérdida de peso del acero a partir de la observación de grietas causadas por la corrosión en vigas de concreto reforzado. Estos resultados posteriormente sirven para predecir la capacidad de carga bajo flexión.

En concordancia, Avci et al., (2021), sostienen que los algoritmos de (ML) y especialmente de (DL) se han vuelto más factibles y ampliamente utilizados en la detección de daños estructurales basada en vibraciones con una precisión rigurosa.

Estos investigadores realizaron un análisis exhaustivo sobre la aplicación de la detección de daños basada en vibraciones, abarcando desde métodos tradicionales hasta el aprendizaje automático y profundo. La determinación de la capacidad de carga a flexión de las estructuras de concreto reforzado existentes presenta desafíos, ya que resulta complicado cuantificar grietas y daños en el momento de su instalación.

La implementación de algoritmos de optimización, Machine Learning, reconocimiento de patrones y Deep Learning en la ingeniería civil ha resultado muy promisorio en la mejora de la eficiencia, seguridad y sostenibilidad de las infraestructuras y construcciones. (Yepes et al, 2023), resultando en una poderosa herramienta para monitorear el ciclo de vida completo de edificaciones, desde la etapa conceptual, la etapa de diseño, la etapa de construcción, la etapa operativa y de mantenimiento hasta el final de su vida útil. (Kristombu et al, 2022).

En los últimos años, la inteligencia artificial ha sido ampliamente implementada en la investigación de ingeniería civil, mediante la utilización de algoritmos genéticos, redes neuronales, lógica difusa y programación paralela. La optimización heurística ha adquirido una relevancia significativa en

disciplinas como estructuras e infraestructuras. Por otro lado, nuevas técnicas como el reconocimiento de patrones, el aprendizaje automático y el aprendizaje profundo están siendo aplicadas en este campo para comprender las interacciones complejas entre parámetros y variables.

En este sentido, un modelo predictivo de aprendizaje automático, puede predecir el futuro estado de la red vial basándose en los datos proporcionados, permitiendo hacer estimaciones exactas sobre los cambios en la condición del pavimento y sugerir los tratamientos preventivos más eficientes (González et al. 2023).

González et al., plantean una solución para la gestión integral del mantenimiento de los pavimentos en carreteras interurbanas, mediante la integración de diversas tecnologías. En principio, emplean un sistema automático y georreferenciado que permite monitorear el estado de los pavimentos a través de la captura de imágenes sincronizadas, lo que facilita la detección y medición de los daños en la superficie.

Este análisis se lleva a cabo utilizando Redes Neuronales Convolucionales, lo que genera una evaluación objetiva y automatizada de la condición de los pavimentos sin necesidad de inspecciones visuales o técnicas invasivas.

Asimismo, el software cuenta con un módulo de predicción del futuro estado de las vías, utilizando técnicas de aprendizaje profundo a partir de los datos obtenidos en el monitoreo. Esto permite mejorar el sistema y proporcionar mayor información para la planificación y toma de decisiones, optimizando mediante algoritmos heurísticos y multicriterio. De esta manera, se plantea una solución que aborda aspectos sociales, económicos y medioambientales para mejorar la gestión del mantenimiento de los pavimentos en carreteras interurbanas.

Por otro lado, Ortega (2021), sostiene que las redes neuronales simplifican la identificación de daños al automatizar el proceso y lograr altos niveles de precisión. Sin embargo, en ocasiones los inspectores no pueden acceder a todas las partes de las estructuras para recopilar datos de imágenes. Durante la inspección, la recopilación de datos es una labor que demanda tiempo. Por ello, el empleo de drones se presenta como una herramienta eficaz que disminuye la carga de trabajo manual, ahorra tiempo, brinda rentabilidad y seguridad, y también garantiza precisión y disponibilidad.

De acuerdo a Ortega (2021) las Redes Neuronales Convolucionales (CNN) pueden detectar fisuras con una precisión de más del 90%.

De los artículos revisados, el único que menciona los tipos de Redes Neuronales es el trabajo de Ortega (2021), quien comenta que la red neuronal con mayor precisión y menor gasto de memoria de disco duro fue GoogleNet, lo que se explica por su arquitectura, la cual cuenta con una mayor cantidad de

capas profundas que a lo largo de todo el proceso de clasificación extraen y almacenan más características que en un futuro puedan ser utilizadas para mejorar la herramienta.

Conclusiones

La integración de la Inteligencia Artificial en la ingeniería civil supone una sinergia beneficiosa, puesto que la IA no solo impulsa la actualización y evolución de la industria de la ingeniería civil, sino que también se enriquece y potencia a través de su implementación en proyectos reales, adquiriendo conocimientos de una amplia variedad de casos y datos, y logrando una eficiencia cada vez mayor y más depurada.

Se prevé un futuro prometedor para la Inteligencia Artificial en el campo de la ingeniería civil, ya que se espera que continúe avanzando y perfeccionándose, lo que facilitará una mayor automatización en la planificación, construcción y mantenimiento de infraestructuras. Además, se espera que la Inteligencia Artificial sea cada vez más capaz de manejar conjuntos de datos complejos y diversos, lo que permitirá una mayor precisión en la modelización y simulación de estructuras.

Las actuales técnicas de IA no son completamente automatizadas y replicar la percepción humana a través de algoritmos de Deep Learning no es sencillo. Es necesario abordar estas capacidades en investigaciones futuras, considerando la importancia del daño en relación con los componentes estructurales, materiales, ubicaciones y condiciones ambientales.

Referencias

1. Acosta, M. (2023). La Inteligencia Artificial en la Ingeniería Civil. CLIC; 27(14). 113 – 126. <https://convite.cenditel.gob.ve/publicaciones/revistaclic/article/view/1184>
2. Aldana, D., Lozano, C. & Orduy, J. (2023). Uso de redes neuronales convolucionales en UAVs para la detección de anomalías estructurales. [Trabajo de Grado]. Fundación Universitaria Los Libertadores. Colombia. <https://repository.libertadores.edu.co/bitstreams/6612bc05-ea62-40ab-b292-02388ecc9f26/download>
3. Avci, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Hussein, M., Gabbouj, M, & Inman, D. (2021). A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications. Mechanical Systems and Signal Processing, 147(2021). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327020304635>

4. Caiafa, C. & Lew, S. (2020). ¿Qué es la Inteligencia Artificial? <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/110093>
5. Cohaila, J. & Gómez, K. (2023). Implementación de un asistente virtual estructural para automatizar el análisis sísmico de un edificio multifamiliar utilizando inteligencia artificial. [Trabajo de Grado]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Perú. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/669963>
6. Cunalata, F. & Caiza, P. (2022). Estado del Arte de Estudios de Vulnerabilidad Sísmica en Ecuador. Revista Politécnica; 50(1): 55-64. <https://www.redalyc.org/journal/6887/688772225006/html/>
7. ERN. Evaluación de Riesgos Naturales. (2017). Daños asociados a estructuras por negligencia y errores. https://www.ern.com.mx/boletines/ERNterate_Nota_negligencias_y_errores.pdf
8. Ferrante, E. (2021). Inteligencia artificial y sesgos algorítmicos, ¿Por qué deberían importarnos? Nueva sociedad, (294), 27-36. <https://biblat.unam.mx/es/revista/nueva-sociedad/articulo/inteligencia-artificial-y-sesgos-algoritmicos-por-que-deberian-importarnos>
9. González, C., García, T., López, M., Mansanet, J. & Sánchez, J. (2023). Sistema de gestión integral para el mantenimiento predictivo de vías interurbanas mediante técnicas de Inteligencia Artificial. 27th International Congress on Project Management and Engineering Donostia-San Sebastián. 451 – 463. <http://dSPACE.aepro.com/xmlui/handle/123456789/3477>
10. Ingenieros Asesores. (2021). ¿Cómo identificar daños estructurales en un edificio? <https://ingenierosasesores.com/actualidad/identificar-danos-estructurales-en-un-edificio/#>
11. Jiménez, M. & Alfaro, M. (2019). Fatigue damage effect approach by artificial neural network. International Journal of Fatigue, 124(2019), 42-47. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142112319300647>
12. Kristombu, S., Thilakarathna, S., Shalitha, J., Arashpour, M., Sharafi, P., Teodosio, B., Shringi, A. & Mendis, P. (2022). Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. Automation in Construction, 141. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580522003132>
13. Lozano, G. (2019). Detección y Localización de Daño Estructural en Construcciones Históricas de Tierra. [Tesis de Maestría]. Pontificia Universidad Católica del Perú. Perú.

- <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/15016>
14. Moreno, A. (2020). Detección, localización y cuantificación de daños en estructuras civiles metálicas midiendo vibraciones. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/1693>
 15. Ortega, J. (2021). Aprendizaje profundo para la detección automática de fisuras de hormigón usando redes neuronales convolucionales. Universitat Politècnica de Valencia. España. [Trabajo de Fin de Máster] <https://riunet.upv.es/handle/10251/174954>
 16. Palacin, S. (2023). Detección del daño estructural en viviendas de Albañilería Confinada mediante Redes Neuronales Artificiales con la aplicación de los modelamientos numéricos MEF y MCA, Pasco 2023. [Tesis de Grado]. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrion. Perú. <http://45.177.23.200/handle/undac/3855>
 17. Russell, S. & Norvig, P. (2020). Artificial Intelligence: A Modern Approach. Pearson Education. 4ta edición.
 18. Sánchez, E. (2017). Análisis de confiabilidad para una estructura transportadora. [Tesis de Maestría]. Benemérita Universidad Autónoma De Puebla. México. <https://core.ac.uk/download/pdf/322608443.pdf>
 19. SEDETEC-Servicios. (2023). La importancia de la Ingeniería Estructural. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/la-importancia-de-ingenier%C3%ADa-estructural-sedetec-servicios/>
 20. Wang, C., Song, L., Yuan, Z. & Fan, J. (2023). State-of-the-art AI-based computational analysis in civil engineering. Journal of Industrial Information Integration, 33. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2452414X23000432>
 21. Yepes, V., Kripka, M., Yepes, L. & García, J. (2023). La inteligencia artificial en la ingeniería civil: oportunidades y desafíos. IC Ingeniería Civil Órgano oficial del Colegio de Ingenieros Civiles de México, 642, 20-23. https://victoryepes.blogs.upv.es/files/2023/07/IC642.pdf_2.pdf
 22. Zaruma, J. (2024). Fallas estructurales en viviendas. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/fallas-estructurales-en-viviendas-jorge-alberto-zaruma-campoverde-dbcue/>
 23. Zhang, M., Akiyama, M., Shintani, M., Xin, J. & Frangopol, D. (2021). Probabilistic estimation of flexural loading capacity of existing RC structures based on observational corrosion-induced crack width distribution using machine learning. Structural Safety, 91. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167473021000230>

© 2023 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).