



Inteligencia artificial aplicada al riesgo de las viviendas: Una revisión de literatura.

Artificial Intelligence Applied to Housing Risk: A Review of the Literature.

Sebastián Balcer Muñetón¹, Daniel Esteban Aguiar Jaramillo², Julián Rodríguez Olaya³,
Jhon Esteban Velásquez Gómez⁴

Tipo de Artículo: Revisión de literatura

Recibido: 09/11/2022 **Aprobado:** 15/08/2023 **Publicado:** 22/12/2023

Resumen: En Colombia existen viviendas que fueron construidas de manera empírica sin estudios especializados de suelos ni valoraciones previas de los materiales de construcción, lo que las ha llevado al colapso por la aparición de fenómenos naturales. En la actualidad, la Inteligencia Artificial (IA) se ha convertido en una gran herramienta para la realización de tareas complejas, como lo puede ser determinar el grado de vulnerabilidad o el riesgo de colapso de una obra civil. El objetivo de este trabajo es presentar una Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) sobre cómo se ha aplicado la Inteligencia Artificial (IA) en la identificación de riesgo de colapso de viviendas. Se concluye que, si bien la IA no puede prevenir directamente los derrumbes de viviendas, puede ayudar a identificar y mitigar los factores que contribuyen a tales eventos; principalmente, a través del uso de sensores para monitorear continuamente

la salud estructural en tiempo real y detectar signos de deterioro, estrés u otros problemas que podrían provocar un colapso.

Palabras clave: Inteligencia Artificial, vulnerabilidad, obra civil, riesgo, colapso.

Abstract: In Colombia, there are houses that were built empirically without specialized soil studies or previous valuations of construction materials, which has led them to collapse due to the occurrence of natural phenomena. Nowadays, Artificial Intelligence (AI) has become a great tool for performing complex tasks such as determining the degree of vulnerability or the risk of collapse of a civil work. The objective of this paper is to present a Systematic Literature Review (SLR) on how Artificial Intelligence (AI) has been applied in the identification of housing collapse

1 Autor correspondiente: Sebastián Balcer Muñetón. Filiación institucional: Universidad Católica Luis Amigó. País: Colombia, Ciudad: Medellín. Correo electrónico: sebastian.balceromu@amigo.edu.co

2 Autor correspondiente: Daniel Esteban Aguiar Jaramillo. Filiación institucional: Universidad Católica Luis Amigó. País: Colombia, Ciudad: Medellín. Correo electrónico: daniel.aguiarja@amigo.edu.co

3 Autor correspondiente: Julián Rodríguez Olaya título: Ingeniero de Sistemas. Universidad Católica Luis Amigó. País: Colombia, Ciudad: Medellín. Correo electrónico: Julian.rodriguezol@amigo.edu.co

4 Autor correspondiente: Jhon Esteban Velásquez Gómez. Filiación institucional: Universidad Católica Luis Amigó. País: Colombia, Ciudad: Medellín. Correo electrónico: Jhon.velasquezgo@amigo.edu.co

risk. It is concluded that, while AI cannot directly prevent housing collapses, it can help identify and mitigate factors that contribute to such events, primarily through the use of sensors to continuously monitor structural health in real time and detect signs of deterioration, stress or other problems that could lead to collapse.

Keywords: Artificial Intelligence, vulnerability, civil works, risk, collapse.

I. Introducción

En el año 2018 en la ciudad de Medellín, Colombia, 1.269.612 viviendas fueron censadas por el DANE [1]. De este censo se identificó que las viviendas que colapsan son construidas por personas que no poseen conocimientos geológicos de suelos, a pesar de que tengan experiencia en la construcción de viviendas [2], sin considerar los factores de riesgo que pueden hacer que una vivienda colapse. El objetivo de este trabajo es presentar una RSL para identificar las causas de colapso de viviendas, los tipos de materiales y técnicas de construcción para evitar este tipo de peligro. Adicionalmente, mapear los softwares existentes basados en Inteligencia Artificial (IA) para detectar este tipo de riesgo.

Las preguntas de investigación consideradas fueron las siguientes: *P1. ¿Qué riesgos existen asociados al colapso de obras civiles? P2. ¿Cómo se ha aplicado la IA para predecir el riesgo de colapso de obras civiles? y P3. ¿Qué aplicaciones existen en la actualidad para predecir el riesgo de colapso de obras civiles?*

Como se mencionó anteriormente, se empleó la metodología de la RSL, enfoque integral y estructurado para revisar y resumir la investigación existente sobre un tema o pregunta de investigación específica. Es ampliamente reconocida en la investigación académica y científica, y se utiliza a menudo en diversos campos, incluidos la medicina, la psicología, las ciencias sociales y más. El objetivo principal de una RSL es proporcionar un análisis imparcial y riguroso de la evidencia disponible para

responder preguntas de investigación específicas o abordar un tema en particular. En resumen, las RSL son valiosas porque proporcionan un resumen completo y basado en evidencia de la investigación existente, lo que ayuda a los investigadores a tomar decisiones informadas, identificar vacíos en la literatura y contribuir al avance del conocimiento en un campo en particular. Además, pueden informar las políticas y las prácticas en diversos ámbitos. Las RSL están conformadas por los siguientes pasos:

- *Definición de la pregunta de investigación:* se articula claramente la pregunta de investigación o los objetivos que pretende abordar a través de la revisión. Es fundamental ser específico y centrado en su consulta.
- *Establecimiento de criterios de inclusión y exclusión:* se establecen criterios para seleccionar estudios relevantes. Estos criterios pueden incluir fecha de publicación, diseño del estudio, ubicación geográfica, datos demográficos de los participantes y más. Los criterios deben ser explícitos y documentados para garantizar la transparencia y la coherencia.
- *Definición de la estrategia de búsqueda:* se crea una estrategia de búsqueda integral y sistemática para identificar estudios relevantes. Esto implica buscar en múltiples bases de datos, utilizar palabras clave y términos específicos y considerar diversas fuentes de literatura (p. ej., revistas, actas de congresos, literatura gris).
- *Selección de estudios:* se evalúan los resultados de la búsqueda, según sus criterios de inclusión y exclusión. Por lo general, esto implica una selección inicial de títulos y resúmenes y luego una evaluación más detallada de los textos completos de los artículos potencialmente relevantes.
- *Extracción de datos:* se extrae información relevante de los estudios seleccionados, como el diseño del estudio, el tamaño de la muestra, los hallazgos clave y cualquier otro dato que aborde su pregunta de investigación.

- *Evaluación de calidad*: se evalúa la calidad metodológica y el rigor de los estudios incluidos. Este paso le ayuda a evaluar la confiabilidad y validez de la evidencia.
- *Síntesis de datos*: se analizan y sintetizan los datos extraídos de los estudios seleccionados. Esto puede implicar métodos cualitativos o cuantitativos, según la naturaleza de la pregunta de investigación y los datos disponibles.
- *Presentación de hallazgos*: se presentan los resultados de su revisión sistemática de la literatura de manera clara y organizada. Esto puede incluir resúmenes narrativos, tablas, figuras u otras formas de presentación.
- *Interpretación de los hallazgos*: se interpretan los hallazgos en el contexto de su pregunta de investigación, considerando las fortalezas y limitaciones de los estudios incluidos.
- *Conclusión e implicaciones*: se resume los hallazgos clave de su revisión y discuta sus implicaciones para la práctica, las políticas o la investigación futura.
- *Redacción de informes*: se prepara un informe o manuscrito bien estructurado y documentado de su revisión sistemática de la literatura, siguiendo las pautas y estándares establecidos en su campo.

En definitiva, se identificó que la IA, ha tenido grandes avances en el sector de la construcción, específicamente a través del uso de sensores (Wireless Sensor Networks), para ayudar a determinar los riesgos de colapso de vivienda, los cuales implementan un seguimiento e informan los fallos, vulnerabilidades, análisis e inconsistencias de las estructuras para prevenir un futuro colapso o daño.

II. Marco Teórico

La IA hace referencia a la capacidad que tienen las máquinas para usar algoritmos, aprender de

los datos y utilizar lo aprendido en la toma de decisiones tal y como lo haría un ser humano [3]; en otras palabras, es el arte de programar máquinas para que tengan la capacidad de razonar como los seres humanos [4], es decir, busca que las computadoras realicen tareas que realizan los humanos [5]. La IA es la rama de la ciencia de la computación que se ocupa de la automatización de la conducta inteligente [6]; se enfoca en la explicación y emulación de la conducta inteligente en función de procesos computacionales [7].

Por otra parte, una obra civil hace referencia a las infraestructuras y edificaciones que permiten a la población incrementar su calidad de vida [8]; involucra la planificación, organización, ejecución, supervisión y evaluación de proyectos en las que se ven involucrados distintos sistemas y procesos constructivos [9]. Los riesgos asociados a la construcción de obras civiles pueden ser el ruido, los sobreesfuerzos, las temperaturas extremas, los movimientos repetitivos y caídas en alturas [10].

El colapso de obras civiles puede ser causado por una variedad de factores, que pueden ser el resultado de problemas de diseño, construcción, mantenimiento, o condiciones ambientales extremas. Algunas de las causas más comunes del colapso de casas incluyen deficiencias en la construcción; es decir, errores durante el proceso de construcción, como la falta de refuerzo estructural adecuado, cimientos inadecuados, mala calidad de los materiales de construcción o mano de obra deficiente, pueden debilitar la estructura de una casa con el tiempo. Otra causa puede ser daños por agua, la infiltración de agua a lo largo del tiempo puede debilitar la estructura de una casa; esto puede ser causado por fugas de tuberías, problemas en el techo o la falta de un sistema de drenaje adecuado [10].

Otra de las causas es el desgaste natural, con el tiempo, todos los materiales de construcción se desgastan, las casas viejas pueden colapsar debido al envejecimiento de sus componentes, como vigas y columnas de madera que se debilitan con el tiempo. Los movimientos del suelo, también se constituye como una de las

principales causas, el asentamiento del suelo, la erosión o los terremotos pueden provocar el colapso de una casa. Los suelos inestables o una mala compactación del suelo pueden contribuir a este tipo de problemas [10].

La sobrecarga estructural, es decir, la adición de peso excesivo en una estructura, sin el refuerzo adecuado puede causar el colapso. Esto puede deberse a la acumulación de nieve en el techo, la sobrecarga de pisos o la colocación de objetos pesados en áreas no diseñadas para soportarlos. La corrosión y deterioro, principalmente de elementos metálicos en la estructura, como barras de refuerzo de acero o conexiones, puede debilitar gravemente la integridad de una casa. Los problemas en la cimentación, como asentamientos no uniformes o la erosión del suelo debajo de la cimentación, pueden hacer que la casa se hunda o se incline, lo que a su vez puede provocar el colapso [10].

Es necesario añadir que, los eventos como terremotos, huracanes, tornados e inundaciones pueden dañar gravemente las casas y provocar su colapso. La falta de mantenimiento adecuado a lo largo de los años puede permitir que problemas menores se conviertan en problemas graves. Esto incluye no abordar fugas, grietas o problemas estructurales a tiempo. Finalmente, las inundaciones repentinas pueden ejercer una gran presión sobre las paredes y los cimientos de una casa, lo que puede llevar al colapso [10].

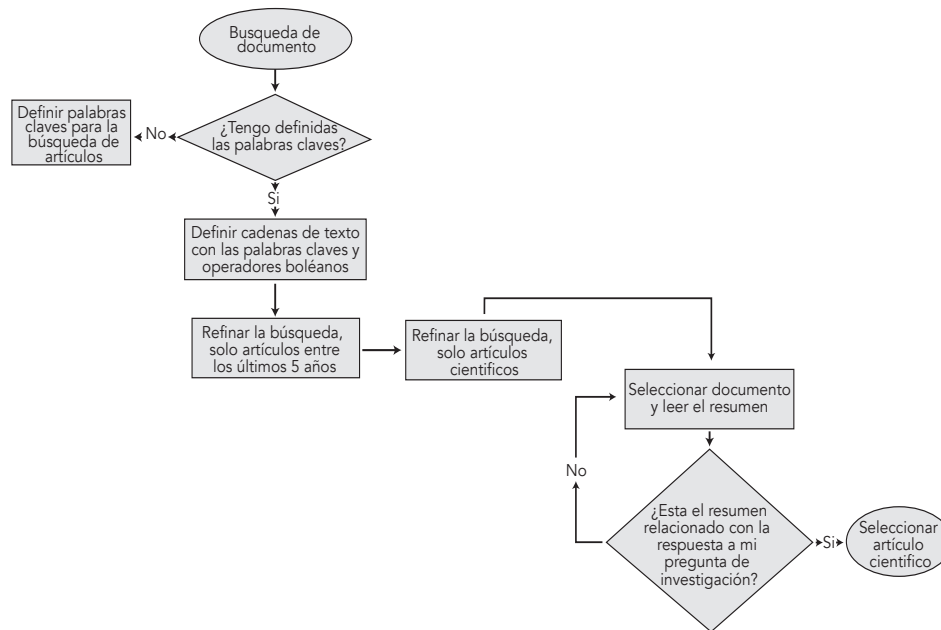
III. Procesos de búsqueda

Se analizaron publicaciones científicas de las bases de datos Scopus y Science Direct, en el período comprendido desde el 2017 hasta el 2023. Se utilizó la siguiente cadena de búsqueda:

```
TITLE-ABS-KEY ("ARTIFICIAL INTELLIGENCE"  
AND "PREDICT" AND ("CIVIL WORKS" OR  
"CIVIL INFRASTRUCTURE") AND ("COLLAPSE"  
OR "VULNERABILITY" OR "DISASTERS")  
AND PUBYEAR > 2016 AND PUBYEAR < 2023  
AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") AND (LIMIT-  
TO (LANGUAGE, "English") AND (LIMIT-TO  
(SUBJECT AREA, "Computer Science") AND  
(LIMIT-TO (SUBJECT AREA, "Engineering")  
AND (LIMIT-TO (KEYWORD, "CIVIL WORKS")  
(LIMIT-TO (KEYWORD, "ENG") AND AND  
(LIMIT-TO (OA, "all"))
```

Para la selección de documentos de la RSL se consideraron los títulos de las revistas científicas, el resumen del artículo, las conclusiones, la claridad y la coherencia del documento, la metodología aplicada en la investigación para la solución del problema buscado y los resultados finales y aspectos a mejorar. La figura 1, presenta el proceso que se aplicó para la selección final de los estudios.

Figura 1. Proceso de selección de documentos

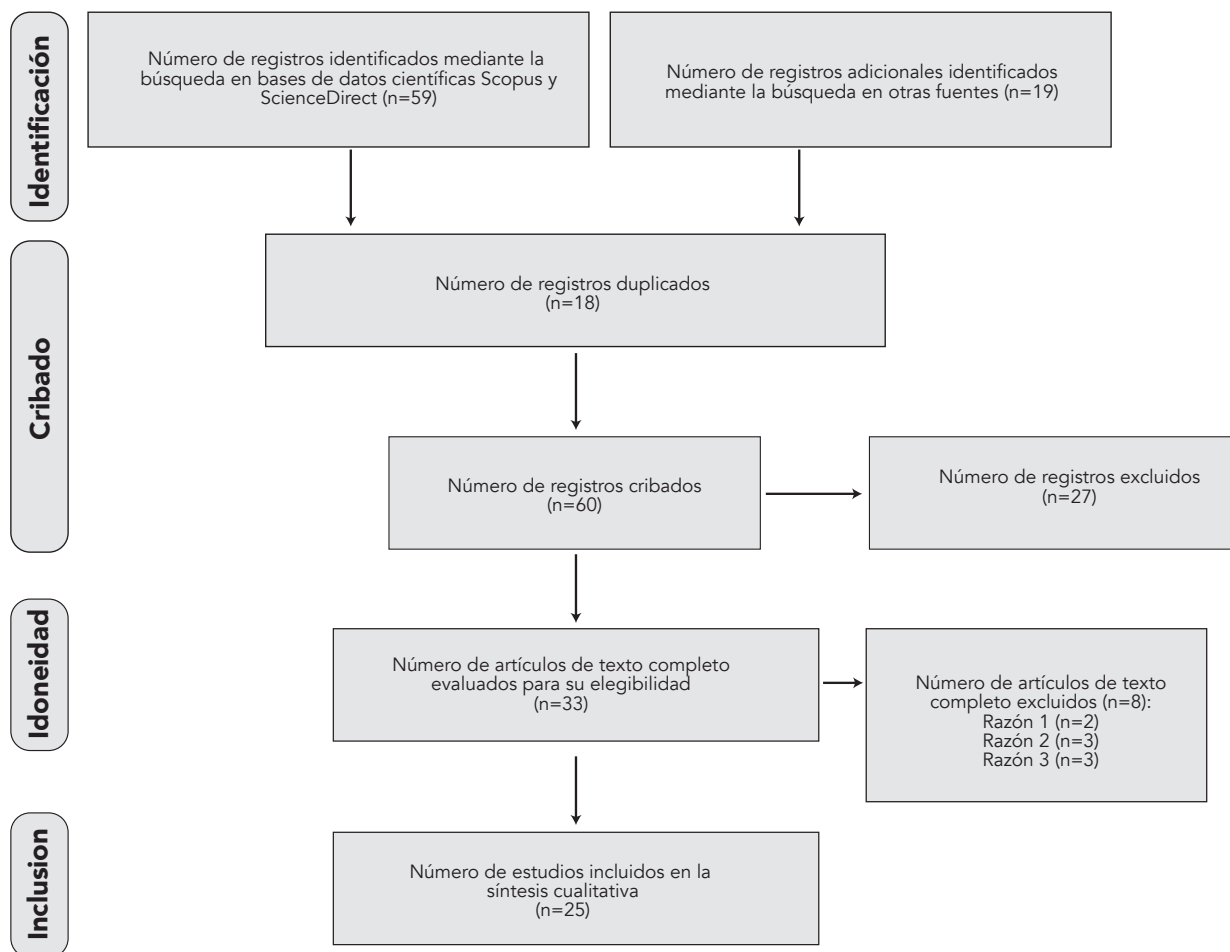


Nota: Fuente elaboración propia.

IV. Resultados

Aplicando la ecuación de búsqueda presentada anteriormente, se obtuvieron 42 resultados en Science Direct y 17 en Scopus, para un total de 59 resultados. También se identificaron 19 publicaciones divulgativas relacionadas con la temática en otro tipo de fuentes. Tras eliminar 18 duplicados entre las dos bases de datos quedaron 60 artículos, a los cuales se les realizó el cribado con base en la lectura de los títulos y resúmenes; a partir de esta lectura se descartaron 27 artículos por no tener relación con la temática.

De los 33 artículos que quedaron y según los criterios de inclusión y exclusión mencionados anteriormente, se descartaron 8 artículos porque: no existía evidencia de su aplicación real ($n=2$), porque eran algoritmos de IA que no se habían validado ($n=3$) y porque no servían para prevenir el riesgo de colapso ($n=3$). Finalmente, 25 artículos cumplieron los criterios de inclusión y se seleccionaron para llevar a cabo la revisión sistemática. La figura 2 condensa lo mencionado anteriormente mediante un diagrama de Flujo PRISMA en cuatro niveles:

Figura 2. Diagrama de Flujo de Cuatro Niveles

Nota: Fuente elaboración propia.

V. Discusión

A continuación, se presentan los resultados encontrados en la revisión de literatura en cada una de las preguntas de investigación:

P1. ¿Qué riesgos existen asociados al colapso de obras civiles?

Muchos de los riesgos que pueden llevar al colapso de obras civiles están relacionados con desastres naturales. Esto ocurre, principalmente, porque no se evalúa la confiabilidad a lo largo

del tiempo, teniendo en cuenta el cambio climático. Como resultado, fenómenos naturales como huracanes, terremotos e inundaciones se convierten en las principales causas de colapsos en obras civiles [14].

Otros factores de riesgo incluyen la falta de experiencia en la evaluación de la zona de construcción y la construcción deficiente de los elementos más críticos de una obra civil. La mampostería y las estructuras de marco de concreto suelen ser los elementos más afectados durante la construcción [15].

El colapso de obras civiles puede tener consecuencias graves y peligrosas. Los riesgos asociados al colapso de obras civiles incluyen lesiones personales y pérdida de vidas humanas, daños a la propiedad, impacto económico, daños al medio ambiente, problemas jurídicos y altos costos de costos de recuperación y reconstrucción [16].

En síntesis, para prevenir los riesgos asociados al colapso de obras civiles, es fundamental llevar a cabo una planificación, diseño, construcción y mantenimiento adecuados. Esto incluye la inspección regular de la infraestructura, el cumplimiento de normativas y estándares de seguridad, y la implementación de medidas de prevención y mitigación de riesgos. Además, es crucial contar con la supervisión de ingenieros civiles calificados y seguir buenas prácticas de gestión de proyectos de construcción [17].

P2. ¿Cómo se ha aplicado la inteligencia artificial para predecir el riesgo de colapso de obras civiles?

En el ámbito de la ingeniería y la gestión de infraestructuras, se emplean diversas técnicas de IA para evaluar el nivel de vulnerabilidad de estructuras. Estas técnicas incluyen el uso de modelos como las redes neuronales artificiales, la programación de expresión genética y los modelos de árbol de aumento de gradiente. Además, se recurre a algoritmos de aprendizaje automático optimizados mediante inteligencia de enjambre, tales como Máquinas de Vectores de Soporte (SVM), Redes Neuronales Artificiales (ANN), embolsado, Base Radial (RBF) y el modelo de árbol M5P. Estos métodos se aplican para evaluar factores como la humedad y la vulnerabilidad en estructuras de gran envergadura, como represas [18].

Un ejemplo concreto de aplicación de la inteligencia artificial en este campo es Art-Risk 3.0, una herramienta capaz de gestionar la vulnerabilidad, los riesgos y la vida útil funcional de edificios. Para ello, utiliza la teoría de la lógica difusa y los sistemas de información geográfica (SIG) para incorporar variables ambientales y

la ubicación geológica de los edificios en el territorio peninsular de España [19].

En el contexto de monitoreo de estructuras de edificios, la inteligencia artificial se utiliza para analizar los datos recopilados de sensores integrados en las construcciones. Un proyecto de gestión específico emplea sensores inalámbricos (Wireless Sensor Networks, WSN) para este propósito. La WSN permite la adquisición de datos en el sitio (DAQ) y su análisis fuera del lugar. Los sistemas DAQ son controlados mediante programas de software desarrollados en lenguajes como C, C++, Java, LabVIEW, Lisp y Pascal [20].

Además, se lleva a cabo una inspección basada en imágenes para detectar defectos concretos en la infraestructura civil. Este enfoque sigue una metodología de tubería de inspección potenciada por inteligencia artificial, que consta de tres pasos principales: detección de anomalías, extracción de anomalías y clasificación de defectos. Esta metodología se implementa utilizando el lenguaje de programación Python, y los modelos de aprendizaje profundo se crean con Tensorflow y se ejecutan en unidades de procesamiento gráfico Nvidia 2080-ti [20].

En resumen, la gestión de la vulnerabilidad, riesgos y vida útil de las edificaciones se ha vuelto cada vez más dependiente de técnicas avanzadas de inteligencia artificial y análisis de datos, permitiendo una evaluación más precisa y eficiente de la integridad de las estructuras, con aplicaciones que abarcan desde represas hasta edificios en zonas específicas como el Valle de Aburrá.

P3. ¿Qué aplicaciones existen en la actualidad para predecir el riesgo de colapso de obras civiles?

Se identificó el diseño de un software utilizando la plataforma de elementos finitos Staad Pro con el propósito de generar una amplia variedad de simulaciones y adaptar sus resultados a un motor de cálculo de fatiga. La efectividad y validez de este entorno en la evaluación de la vida útil de las

estructuras se comprobó mediante la realización de simulaciones a ciegas para diferentes tipos de estructuras. La herramienta actualmente disponible puede ser utilizada con confianza para predecir el inicio de grietas por fatiga y así prevenir posibles colapsos adicionales de las estructuras [21]. Por otro lado, se emplea el reconocimiento de componentes estructurales basado en el aprendizaje profundo utilizando imágenes, datos y detección de daños con consistencia a nivel de la estructura, para medir el grado de vulnerabilidad de las construcciones [22].

Para el monitoreo de grandes estructuras con altos requisitos de vida y seguridad de diseño, como puentes de carreteras, edificios de varios pisos, casas, chimeneas, plataformas marinas y reactores nucleares, se utiliza una red inalámbrica de sensores inteligentes. Estos sensores cuando se combinan con herramientas de inteligencia artificial como redes neuronales artificiales, aprendizaje automático, aprendizaje profundo y tecnologías derivadas como las Redes Neuronales Convolucionales y la Inteligencia Híbrida, permiten la creación de un sistema de monitoreo completamente automatizado para evaluar la vulnerabilidad y el estado de las estructuras. Sin embargo, es importante señalar que este sistema puede resultar costoso de implementar y no es adecuado para un análisis a gran escala [23].

El Sistema de Gestión de Datos (*Data Management System*) utiliza la inteligencia artificial para evaluar la salud estructural y ha sido probado en puentes con la posibilidad de adaptarse a otras aplicaciones. Este programa recopila datos de la construcción, incluyendo la carga de trabajo y las condiciones atmosféricas, como el peso de los vehículos, la presión del viento, el movimiento causado por terremotos, la alta temperatura, la humedad, y factores relacionados con la estructura, como miembros, bisagras, grietas y pesos vehiculares, que incluyen el tráfico, la velocidad y el peso de cada eje, a menudo medido a través del principio de pesaje en movimiento (WIM) [24].

Una vez que un vehículo cruza el puente, este sistema proporciona orientación para los sistemas de tráfico de carreteras y realiza la configuración y evaluación de la estructura. Además, los avances en tecnología de sensores de fibra óptica (OFS) han permitido su aplicación en la ingeniería civil para el seguimiento de estructuras importantes, garantizando una mayor durabilidad. Estos sensores ópticos y las soluciones basadas en datos tienen una capacidad superior para detectar daños y fallas en estructuras de ingeniería civil [25]. Este estudio también introduce una innovadora herramienta informática llamada "Art-Risk 3.0" para la conservación preventiva del patrimonio en centros urbanos, basada en modelos de inteligencia artificial. Esta metodología es capaz de gestionar la vulnerabilidad, los riesgos y la vida útil funcional de los edificios, contribuyendo así a la conservación del patrimonio cultural construido. Esta herramienta ayuda a los propietarios, administraciones locales, regionales y nacionales a tomar decisiones basadas en criterios científicos para la conservación del patrimonio. "Art-Risk 3.0" utiliza la teoría de la lógica difusa y los sistemas de información geográfica (SIG) para incorporar variables ambientales y la ubicación geográfica de los edificios en el territorio peninsular de España [25].

En el contexto del monitoreo de estructuras, se emplean sensores inalámbricos (Wireless Sensor Networks) para adquirir datos en el sitio y realizar análisis fuera del sitio. Estos sistemas de adquisición de datos (DAQ) son controlados por programas de software desarrollados mediante programación informática. Además, se utiliza la Inteligencia Artificial, incluyendo Redes Neuronales Artificiales y Aprendizaje Profundo, para estudiar las vibraciones de la estructura y analizar datos complejos en busca de patrones significativos. También se menciona la aplicación de Redes Neuronales Convolucionales (CNN) en el análisis de vibraciones de estructuras de construcción [25].

El presente estudio emplea un enfoque probabilístico para desarrollar funciones de fragilidad, teniendo en cuenta diversas fuentes

de incertidumbre, como los movimientos del suelo, la geometría del puente y las propiedades de los materiales. Estas funciones de fragilidad proporcionan la probabilidad de que una estructura específica cumpla o exceda un límite predefinido (es decir, nivel de daño) dado un nivel específico de intensidad de movimiento del suelo (IM). Se evalúa la influencia de la elección del IM en las funciones de fragilidad mediante criterios comunes que se encuentran en la literatura. En este marco, la probabilidad de daño, pf , se calcula para cada nivel de daño de la siguiente manera:

$$pf = P\left[\frac{D}{C} > 1 \mid IM\right]$$

Donde D y C representan respectivamente la demanda estructural y la capacidad, suponiendo distribuciones logarítmicas normales para ambas.

$$pf = \frac{\Phi \left[\frac{\ln\left(\frac{SD}{SC}\right) IM}{\sqrt{(\beta D)^2 IM^2 + \beta C^2}} \right]}{\sqrt{(\beta D)^2 IM^2 + \beta C^2}}$$

Donde SD y βD | IM representan respectivamente la mediana y la dispersión de las demandas sísmicas y SC y βC , respectivamente, representan la mediana y dispersión de la capacidad. Por lo tanto, para estimar la probabilidad de daños, se necesitan modelos para calcular la mediana y la dispersión de los demandas y capacidades sísmicas. Nótese que esta forma de ecuación para estimar la probabilidad de falla asume que no hay correlación entre la demanda y parámetro de capacidad [25].

VI. Conclusiones

Los riesgos asociados a las construcciones civiles surgen debido a la falta de comprensión sobre los materiales utilizados y las características del suelo

en las ubicaciones de las viviendas, sin considerar los posibles peligros de colapso ante eventos naturales. La aplicación de la teoría de la lógica difusa y los sistemas de información geográfica se presenta como una solución óptima y viable para incorporar las variables ambientales y la ubicación geológica de las estructuras en el valle de Aburrá en la investigación. Esta propuesta representa un enfoque eficaz para identificar y abordar las deficiencias estructurales en las nuevas construcciones en constante crecimiento, gracias a la utilización de software especializado que evalúa la salud estructural. De esta manera, se puede mantener una vigilancia constante sobre cualquier posible vulnerabilidad y ejecutar un plan de acción de manera oportuna y efectiva.

En la actualidad, existen diversas aplicaciones y herramientas que pueden ayudar en la predicción y evaluación del riesgo de colapso de obras civiles (Análisis de Elementos Finitos (FEA), BIM (Modelado de Información de Construcción), Sensores IoT (Internet de las cosas), *Machine Learning* y Aprendizaje Profundo, Software de Geotecnia, Simulación de Elementos Finitos (FEM) y Sistemas de Gestión de Activos. Estas aplicaciones utilizan tecnologías como la inteligencia artificial, el análisis de datos y la modelización para prever posibles problemas en la construcción y el mantenimiento de estructuras civiles.

Es importante destacar que la elección de la aplicación o herramienta adecuada dependerá del tipo de obra civil, su complejidad y las necesidades específicas del proyecto. Además, es fundamental contar con la experiencia y el conocimiento de ingenieros y expertos en estructuras civiles para interpretar los resultados y tomar decisiones informadas sobre la prevención del riesgo de colapso.

VII. Referencias

- [1] Departamento Nacional de Estadísticas. DANE, "Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 - Pasto, Nariño," 2019, p. 31.
- [2] Semana. 2022. "Edificio Space: se cumplen nueve años de una tragedia que se pudo prevenir en Medellín", [En línea]. Disponible en: <https://www.semana.com/nacion/medellin/articulo/edificio-space-se-cumplen-nueve-anos-de-una-tragedia-que-se-pudo-prevenir-en-medellin/202222/>
- [3] J. Y. Lee and B. R. Ellingwood, "A decision model for intergenerational life-cycle risk assessment of civil infrastructure exposed to hurricanes under climate change", *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 159, pp. 100-107, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.10.022>
- [4] A. Karatzetzou, S. Stefanidis, S. Stefanidou, G. Tsinidis, and D. Pitolakis, "Unified hazard models for risk assessment of transportation networks in a multi-hazard environment", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 75, p. 102960, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.102960>
- [5] K. N. Siddiquee, A. M. Billah, and A. Issa, "Seismic collapse safety and response modification factor of concrete frame buildings reinforced with superelastic shape memory alloy (SMA) rebar", *Journal of Building Engineering*, vol. 42, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102468>
- [6] M. Terrenzi, E. Spacone, and G. Camata, "Engineering demand parameters for the definition of the collapse limit state for code-conforming reinforced concrete buildings", *Engineering Structures*, vol. 266, p. 114612, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114612>
- [7] A. Furtado, H. Rodrigues, A. Arêde, and H. Varum, "Experimental tests on strengthening strategies for masonry infill walls: A literature review", *Construction and Building Materials*, vol. 263, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120520>
- [8] N. Makoond, L. Pelà, and C. Molins, "A Risk Index for the Structural Diagnosis of Masonry Heritage (RISDiMaH)", *Construction and Building Materials*, vol. 284, p. 122433, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122433>
- [9] A. Rezaie, M. Godio, and K. Beyer, "Experimental investigation of strength, stiffness and drift capacity of rubble stone masonry walls", *Construction and Building Materials*, vol. 251, p. 118972, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118972>
- [10] J. Y. Lee, H. V. Burton, and D. Lallemand, "Adaptive decision-making for civil infrastructure systems and communities exposed to evolving risks", *Structural Safety*, vol. 75, pp. 1-12, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2018.05.001>
- [11] R. Hingorani, P. Tanner, M. Prieto, and C. Lara, "Consequence classes and associated models for predicting loss of life in collapse of building structures", *Structural Safety*, vol. 85, p. 101910, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2019.101910>
- [12] E. Mastroianni, J. Lancaster, B. Korkmann, A. Opdyke, and W. Beitelmal, "Mitigating infrastructure disaster losses through asset management practices in the Middle East and North Africa region", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 53, p. 102011, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.102011>
- [13] J. K. Chow, Z. Su, J. Wu, Z. Li, P. S. Tan, K. fu Liu, X. Mao, and Y. H. Wang, "Artificial intelligence-empowered pipeline for image-based inspection of concrete structures", *Automation in Construction*, vol. 120, p. 103372, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103372>
- [14] H. A. Al-Jamimi, W. A. Al-Kutti, S. Alwahaishi, and K. S. Alotaibi, "Prediction of compressive strength in plain and blended cement concretes using a hybrid artificial intelligence model", *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, p. e01238, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01238>
- [15] Q. Wang, A. Hussain, M. U. Farooqi, and A. F. Deifalla, "Artificial intelligence-based estimation of ultra-high-strength concrete's flexural property", *Case Studies in Construction*

- Materials*, vol. 17, p. e01243, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01243>
- [16] A. Sofi, J. Regita, B. Rane, and H. H. Lau, "Structural health monitoring using wireless smart sensor network – An overview", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 163, p. 108113, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108113>
- [17] Y. Liu and J. K. W. Yeoh, "Robust pixel-wise concrete crack segmentation and properties retrieval using image patches", *Automation in Construction*, vol. 123, p. 103535, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103535>
- [18] R. W. Blake, R. Mathew, A. George, and N. Papakostas, "Impact of Artificial Intelligence on Engineering: Past, Present and Future", *Procedia CIRP*, vol. 104, pp. 1728-1733, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.291>
- [19] B. A. Salami, M. Iqbal, A. Abduraheem, F. E. Jalal, W. Alimi, A. Jamal, T. Tafsirojjaman, Y. Liu, and A. Bardhan, "Estimating compressive strength of lightweight foamed concrete using neural, genetic and ensemble machine learning approaches", *Cement and Concrete Composites*, vol. 133, p. 104721, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104721>
- [20] F. Khosravikia, P. Clayton, and E. Williamson, "Investigation of potential damage to bridge infrastructure from induced earthquakes", *Engineering Structures*, vol. 238, p. 112252, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112252>
- [21] T. U. Banu, N. P. Rajamane, P. O. Awoyera, y R. Gobinath, "Strength characterisation of self-cured concrete using AI tools", *Materials Today: Proceedings*, vol. 39, pp. 839-848, 2020. [En línea]. Disponible en: DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.101.
- [22] U. M. N. Jayawickrema, H. M. C. M. Herath, N. K. Hettiarachchi, H. P. Sooriyaarachchi, y J. A. Epaarachchi, "Fibre-optic sensor and deep learning-based structural health monitoring systems for civil structures: A review", *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 199, p. 111543, 2022. [En línea]. Disponible en: DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111543.
- [23] G. N. Devi y M. M. Vijayalakshmi, "Smart structural health monitoring in civil engineering: A survey", *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 7143-7146, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.095.
- [24] R. A. Ali y O. H. Kharofa, "The impact of nanomaterials on sustainable architectural applications smart concrete as a model", *Materials Today: Proceedings*, vol. 42, pp. 3010-3017, 2021. [En línea]. Disponible en: DOI: 10.1016/j.matpr.2020.12.814.
- [25] F. Khosravikia, P. Clayton y E. Williamson, "Investigation of potential damage to bridge infrastructure from induced earthquakes", *Engineering Structures*, vol. 238, p. 112252, 2021. [En línea]. Disponible en: DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112252.