

Trends and Challenges for Technological Innovation in the Construction Industry: A Systematic Literature Review

Harold Gaspar Cano Condori¹

¹School of Civil Engineering, Universidad Continental, Arequipa, Perú, hcano@continental.edu.pe

Abstract: Despite the importance of the construction industry, the development and implementation of new technologies within it is the lowest among all industries. This literature review aims to identify the trends and challenges of technological innovation over the past five years. Articles were selected from SCOPUS, IEEE Xplore, and ScienceDirect, and the research was filtered based on the PRISMA methodology. The most studied technologies were artificial intelligence, the use of robots in construction, and BIM. The field with the most applications was sustainable construction. Among the main challenges are the need for further research and the difficulties in adapting technological approaches to practical realities.

Keywords: Technology, innovation, construction, trends, challenges.

Tendencias y desafíos para la innovación tecnológica en la industria de la construcción: una revisión sistemática de la literatura

Harold Gaspar Cano Condori¹ 

¹Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Continental, Arequipa, Perú, hcano@continental.edu.pe

Resumen: A pesar de la importancia de la industria de la construcción, el desarrollo y la implementación de nuevas tecnologías en ella es el más bajo de todas las industrias, esta revisión de la literatura busca conocer cuáles han sido las tendencias y desafíos de la innovación tecnológica en los últimos 5 años, para esto se seleccionaron artículos de SCOPUS, IEEE Xplore y ScienceDirect, el filtro de las investigaciones se hizo en base a la metodología PRISMA, se encontró que las tecnologías más investigadas fueron la inteligencia artificial, el uso de robots en la construcción y BIM mientras que el campo con más aplicaciones fue el de la construcción sostenible, entre los principales desafíos están la necesidad de más investigación y las dificultades para adaptar los enfoques tecnológicos a las realidades prácticas.

Palabras clave: Tecnología, innovación, construcción, tendencias, desafíos.

I. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción impulsa el crecimiento económico en muchos países[1], esta representa el 13% del PIB a nivel mundial[2] mientras que en Latinoamérica y el Caribe abarca el 6% del PIB regional equivalente a 20 millones de puestos de trabajo[3].

A pesar del importante papel que desempeña, esta ha adoptado la digitalización a un ritmo más lento que cualquier otra industria[2], esto afecta seriamente su productividad y representa pérdidas económicas a nivel global, ya que se sabe que la productividad de esta industria tiene el potencial de aumentar entre 5 a diez veces su valor actual [4].

Estos bajos niveles de industrialización y adopción de tecnologías innovadoras en la industria de la construcción son motivo de investigación y aunque varias revisiones del estado del arte se han enfocado en aspectos específicos del problema como son la automatización en manufactura [5], la construcción inteligente y el medio ambiente [6], la digitalización y productividad [7] y los proyectos fuera de sitio [8], hacen falta estudios integrales que brinden perspectivas más amplias respecto a las tendencias y retos que enfrenta la innovación en dicha industria.

Esta investigación tiene como objetivo conocer cuáles son las tendencias actuales en innovación tecnológica en la industria de la construcción en los últimos 5 años, para ello se identifican tendencias, tecnologías y desafíos para la adopción práctica de estas innovaciones, teniendo en cuenta el contexto actual.

II. METODOLOGIA

Para cumplir con los objetivos de esta investigación, se trabajó con la metodología Prisma (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses)[9], el detalle del proceso de selección se muestra en la Fig. 1, como se puede ver en ella durante la etapa de identificación, se consultaron las bases de datos de Scopus, IEEE Xplore y ScienceDirect. Las búsquedas se realizaron empleando términos como: "innovative technology", "technological innovation", "emerging technologies", "smart construction", "construction automation", "digital construction" y "advanced building methods", entre otros. Como resultado, se identificaron un total de 275 artículos en Scopus, 51 en IEEE Xplore y 84 en ScienceDirect, de este conjunto 6 artículos fueron descartados por duplicidad.

El cribado tomó en cuenta los criterios de inclusión mostrados en la tabla I, es decir solo se consideraron investigaciones de los últimos 5 años, artículos originales o conference paper, dejando de lado los estudios de tipo revisión, estos debían ser de acceso abierto (open access) y contar con datos de innovaciones tecnologías investigadas para su aplicación en la industria de la construcción, teniendo en cuenta ello, el número de artículos se redujo a 46 en Scopus, 4 en IEEE Xplore y 17 en ScienceDirect. En esta misma etapa se recuperaron y revisaron los 67 artículos que se tenía hasta el momento.

TABLA I
CRITERIOS DE INCLUSIÓN

| | |
|----|--|
| C1 | Publicado entre los años 2020 y 2025. |
| C2 | Artículo original o conference paper , no de revisión. |

| | |
|----|--|
| C3 | Disponible en su versión completa (Open access). |
| C4 | El artículo contiene información de innovaciones tecnológicas para su aplicación en la industria de la construcción. |

Finalmente, en la etapa de inclusión se rechazaron 35 artículos por ser muy teóricos y no contar con datos prácticos de tecnologías innovadoras, es decir artículos de tipo encuesta o entrevista, 10 por no ser de acceso abierto y 2 por ser artículos de tipo revisión. El número final de estudios considerados para esta revisión es de 20.

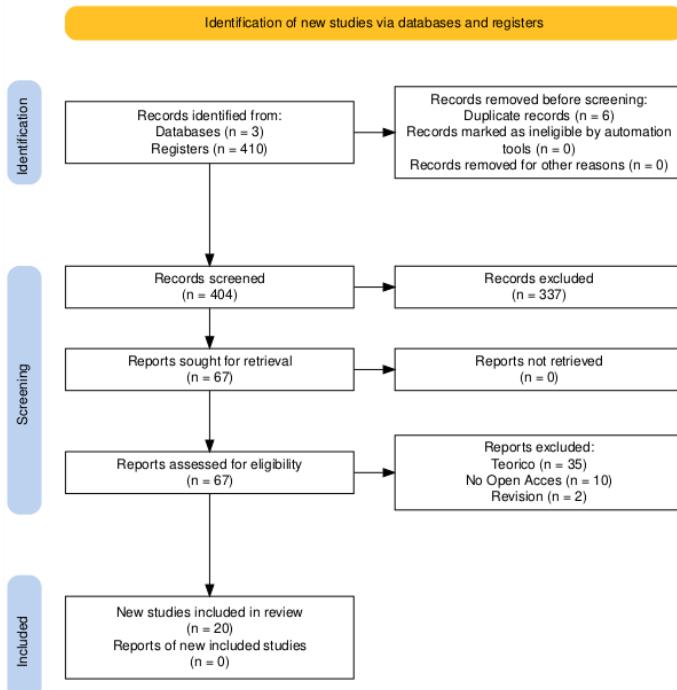


Fig. 1 Diagrama de flujo PRISMA [10].

TABLA II
ARTICULOS ANALIZADOS

| Referencia | título |
|---------------------------|--|
| Pan et al. 2020 [11] | A conceptual design of an integrated Façade system to reduce embodied energy in residential buildings |
| Maisano et al. 2023 [12] | Dimensional measurements in the shipbuilding industry: on-site comparison of a state-of-the-art laser tracker, total station and laser scanner |
| Kamel et al. 2023 [13] | A framework for smart construction contracts using BIM and blockchain |
| Zhang et al. 2023 [14] | Evolutionary Game Analysis for Key Participants' Behavior in Digital Transformation of the Chinese Construction Industry |
| Lauria et al. 2024 [15] | Digital Transformation in the Construction Sector: A Digital Twin for Seismic Safety in the Lifecycle of Buildings |
| Ramezani et al. 2020 [16] | Quality 4.0 in action: Smart hybrid fault diagnosis system in plaster production |
| Aibinu et al. 2020 [17] | Conceptualizing and operationalizing team task interdependences: BIM implementation assessment using effort distribution analytics |
| Podder et al. 2022 [18] | Immersive Industrialized Construction Environments for Energy Efficiency Construction Workforce |
| Volpe et al. 2021 [19] | Building envelope prefabricated with 3d printing technology |
| Mazur Ł. 2023[20] | Sustainable Architecture: Innovations and Perspectives for Multifamily Housing in Timber-Based Structures † |
| Kim et al. 2024[21] | Unmanned Aerial Vehicle-Based Automated Path Generation of Rollers for Smart Construction |
| Disney et al. 2023 [22] | Total Bim On The Construction Site: A Dynamic Single Source Of Information |
| Wang et al. 2020[23] | IoT-based intelligent construction system for prefabricated buildings: Study of operating mechanism and implementation in China |

III. RESULTADOS

En la tabla II, se muestran los 20 artículos obtenidos mediante la metodología PRISMA detallada en el capítulo anterior, la presentación de los resultados que se detalla más adelante considera que estos se pueden dividir en *resultados bibliométricos* y *en resultados de ingeniería*, abordando datos generales relacionados con el numero de publicaciones por año y por país el primero y profundizando sobre los objetivos de esta revisión el segundo.

| | |
|------------------------------|---|
| Yang et al. 2023[24] | Can the development of digital construction reduce enterprise carbon emission intensity? New evidence from Chinese construction enterprises |
| Zhou H. et al. 2024 [25] | Process Control of Robotic Tile Laying Based on Position-Based Impedance and Fuzzy-Adaptive Contact Force Control |
| Farshadfar, et al. 2025 [26] | Machine learning-based automated waste sorting in the construction industry: A comparative competitiveness case study |
| Hadengue, et al. 2022 [27] | Screening innovative technologies for energy-efficient domestic hot water systems |
| Ibrahim, et al. 2023 [28] | Influence of limestone calcined clay cement on properties of 3D printed concrete for sustainable construction |
| Ahmed, et al. 2023 [29] | Energy-Efficient UAVs Coverage Path Planning Approach |
| Pavón et al. 2021[30] | Use of bim-fm to transform large conventional public buildings into efficient and smart sustainable buildings |

A. Resultados Bibliométricos

La Fig. 2 muestra la distribución del número de estudios realizados por año en el periodo comprendido entre 2020 y 2025. Se observa que el año con mayor producción de estudios es 2023, con un total de 8 investigaciones, lo que podría indicar un interés creciente o un enfoque particular en el tema durante ese periodo. En contraste, el año con menos estudios es 2021, con solo 2 estudios.

En 2020 y 2024 se presentan cifras iguales, con 5 estudios realizados en cada año, lo que sugiere una estabilidad en la producción académica.

Esta variabilidad refleja la influencia de diferentes factores en la producción académica, como tendencias temáticas, disponibilidad de recursos o contextos sociales y económicos específicos de cada año.

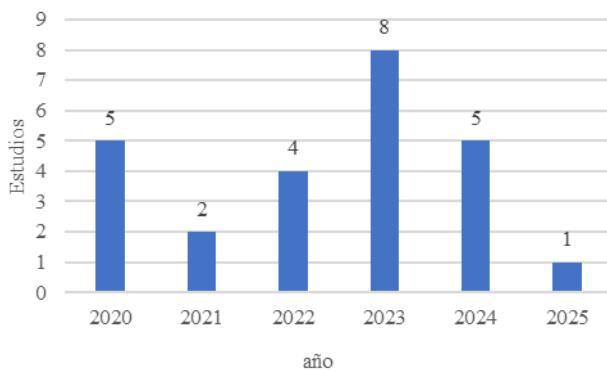


Fig. 2 Evolución del número de publicaciones en el tiempo.

La tabla III presenta una distribución de publicaciones según la revista fuente. En su mayoría, cada *journal* contiene un solo artículo publicado, con excepción de *Sustainability (Switzerland)*, que cuenta con tres publicaciones en total.

La diversidad de revistas, como *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*, *Journal of Building Engineering* y *Waste Management*, entre otros, refleja un enfoque multidisciplinario, abarcando temas relacionados con ingeniería, construcción, gestión ambiental, sostenibilidad, realidad virtual y procesos aplicados.

Esto sugiere que la investigación está difundida en diferentes áreas del conocimiento, con un énfasis particular en

sostenibilidad, dada la mayor representación en la revista mencionada. Esta variedad evidencia la importancia de abordar el tema desde múltiples perspectivas y su relevancia en diferentes contextos científicos y tecnológicos.

TABLA III
REVISTAS CIENTÍFICAS Y NUMERO DE PUBLICACIONES

| Revista/ Journal | cantidad |
|--|----------|
| CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences | 1 |
| Construction Management and Economics | 1 |
| Journal of Information Technology in Construction | 1 |
| Waste Management | 1 |
| Journal of Environmental Management | 1 |
| Journal of Building Engineering | 1 |
| Scientific Reports | 1 |
| Electronics (Switzerland) | 1 |
| Sustainability (Switzerland) | 3 |
| Production Engineering | 1 |
| Engineering Proceedings | 1 |
| Energies | 1 |
| Frontiers in Virtual Reality | 1 |
| Processes | 1 |
| Applied Sciences (Switzerland) | 1 |
| Frontiers in Ecology and Evolution | 1 |
| Buildings | 1 |
| Journal of Intelligent Construction | 1 |

La Fig. 3 muestra la distribución geográfica de los estudios analizados, esta se muestra representada mediante un gráfico de color que indica la cantidad de contribuciones por país. Se observa que China es el país que más interés ha tenido en el tema, con 4 publicaciones, destacándose con un tono más oscuro en el gráfico, mientras que otros países, como Estados Unidos y algunos en Europa, están representados con un tono más claro, indicando una menor cantidad de contribuciones, específicamente 1 publicación cada uno.



Fig. 3 Distribución geográfica del número de publicaciones.

La presencia de publicaciones en otros países refleja un enfoque global, aunque con contribuciones más dispersas.

B. Resultados de ingeniería

Para la identificación de tendencias en base a los artículos analizados, inicialmente se realizó un análisis de agrupamientos con la ayuda del software VOSviewer, en base a dicho análisis se obtuvieron los resultados mostrados en la Fig. 4.

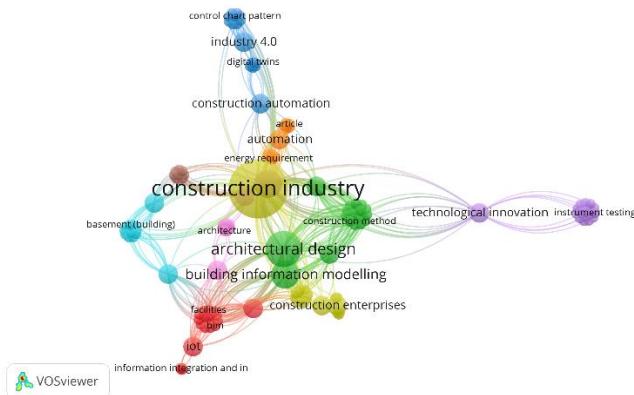


Fig. 4 Análisis de agrupamientos usando VOSviewer.

El agrupamiento central es el relacionado con el *color amarillo*, el cual hace mención a la industria de la construcción, las empresas, la gestión y la digitalización en la construcción. El agrupamiento *rosado* toma en cuenta BIM y la arquitectura, el agrupamiento *morado* considera la innovación tecnológica, el *azul* la industria 4.0 y la automatización finalmente el *rojo* hace referencia al internet de las cosas IoT. De esta manera y de forma general se puede afirmar que con el uso de esta herramienta se identificaron 4 tendencias: *la incorporación de BIM, la innovación tecnológica en general, la automatización y el uso del internet de las cosas IoT*.

Sin embargo, para tener una idea más clara de las tendencias en base a los artículos analizados se realizó un

análisis de agrupamiento manual, en base al cual se identificaron 9 tecnologías mostradas en la tabla IV.

La tabla muestra las tendencias actuales en tecnologías innovadoras aplicadas en la industria de la construcción en los últimos 5 años, en la primera columna se aprecia el tipo de tecnología aplicada, en la columna cantidad se muestra el número de investigaciones asociadas con dicha tecnología, mientras que en la tercera columna se muestra la lista de autores en detalle.

Se puede ver que las tecnologías más usadas en investigación han sido BIM e IA/Robots, ambas con 4 investigaciones en total, en segundo lugar, tenemos los nuevos sistemas constructivos y el internet de las cosas IoT.

TABLA IV
TENDENCIAS TECNOLOGIAS Y REFERENCIAS

| Tendencia en tecnología | Cantidad | Autores |
|------------------------------------|----------|--|
| Nuevos sistemas constructivos | 2 | Pan et al. 2020, Mazur L. 2023 [11] |
| Nuevos dispositivos de medición | 1 | Maisano et al. 2023 [12] |
| Blockchain / criptomonedas | 1 | Kamel et al. 2023 [13] |
| Algoritmos /software | 1 | Zhang et al. 2023[14] |
| Bim | 4 | Lauria et al. 2024[15], Aibinu et al. 2020[17], Kim et al. 2024[21], Disney et al. 2023[22] |
| IA /robots | 4 | Ramezani et al. 2020[16], Zhou H. et al. 2024[25], Farshadfar, et al. 2025[26], Ahmed, et al. 2023[29] |
| Realidad virtual/gemelos digitales | 1 | Podder et al. 2022[18] |
| Impresión 3d | 1 | Volpe et al. 2021[19] |
| Internet de las cosas - IoT | 2 | Pavón et al. 2021[30] |
| Nuevas tecnologías para IISS | 1 | Hadengue, et al. 2022[27] |
| Optimización de materiales | 1 | Ibrahim, et al. 2023[28] |

A continuación, se presenta una breve descripción de algunas de las tecnologías en función a las referencias encontrados, se detalla el propósito y algunos de los hallazgos de las fuentes más investigadas.

Respecto de *BIM*, su uso estuvo orientado al trabajo con gemelos digitales[15] alimentados con sensores como el que se muestra en la Fig. 5.



Fig. 5 Sensores instalados en un edificio existente (tomado de [15], bajo licencia CC BY 4.0).

El uso de BIM también considero proyectos viales en los que se busca optimizar el proceso de compactación a través de la integración del uso de rodillos, BIM y vehículos aéreos no tripulados UAV [21], esto con el fin de obtener rutas óptimas para el desplazamiento y compactación de los rodillos como se ve en la Fig. 6.

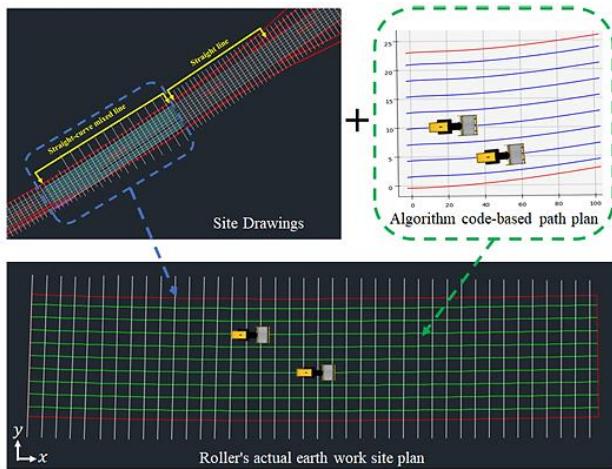


Fig. 6 Rutas generadas (tomado de [21], bajo licencia CC BY 4.0).

Otra de las tendencias tecnológicas más investigadas fue el uso de la *inteligencia artificial IA y Robots*, entre las principales aplicaciones podemos mencionar al uso de robots para la instalación de baldosas[25], con procedimientos similares a los de la instalación manual de cerámicos, parte del proceso se muestra en la Fig. 7, en dicha investigación encontraron que, respecto de la colocación manual de baldosas, la eficiencia de la colocación robótica de baldosas se multiplicó por tres o cuatro.

Estos resultados son prometedores, pero se necesita ajustar el comportamiento del robot a otras condiciones como el trabajo en condiciones variables de espacio y posición.

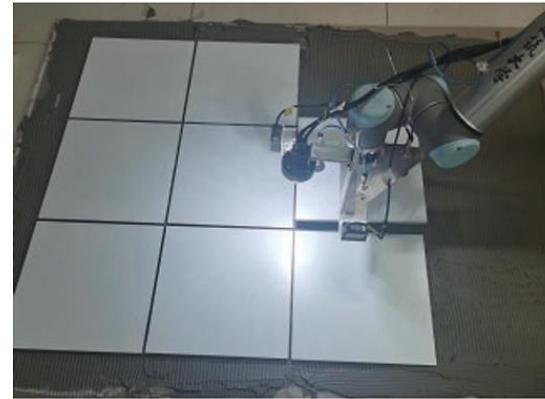


Fig. 7 Colocación de baldosas por el robot (tomado de [25] bajo licencia CC BY 4.0).

Otro caso de la aplicación de la *IA y el uso de robots* es el desarrollado para el reciclaje de materiales de construcción a través de un sistema de clasificación automatizada (MLAS) [26], el concepto de la clasificación robótica planteado en dicha investigación se muestra en la Fig. 8.

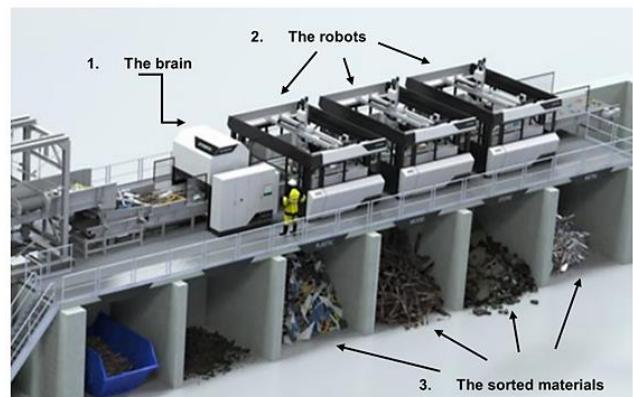


Fig. 8 Unidad de reciclado automatizado (tomado de [26] bajo licencia CC BY 4.0).

Por otro lado, en la tabla V se muestra las tendencias relacionadas a los entornos en los que los autores han considerado la aplicación de las tecnologías mencionadas anteriormente, de esta forma en la primera columna se han identificado 9 categorías, en la columna cantidad se muestra el número de investigaciones asociadas con cada categoría y en la columna autores el detalle de las fuentes relacionadas.

El ámbito con más aplicaciones es el de las *construcciones sostenibles*, este considera 6 investigaciones, en segundo lugar, tenemos la *construcción en general* con 4 investigaciones y en tercer lugar la *gestión* con 3 estudios.

TABLA V
TENDENCIAS EN AMBITOS DE APLICACION Y REFERENCIAS

| tendencia: entorno/ámbito | Cantidad | Autores |
|------------------------------|----------|---------|
|------------------------------|----------|---------|

| | | |
|---------------------------------|---|--|
| construcción sostenible | 6 | Pan et al. 2020[11], Mazur L. 2023[20], Yang et al. 2023[24], Farshadfar, et al. 2025[26], Hadengue, et al. 2022[27], Ahmed, et al. 2023[29] |
| construcción en nuevos entornos | 1 | Maisano et al. 2023[12] |
| gestión | 3 | Kamel et al. 2023[13], Zhang et al. 2023[14], Ramezani et al. 2020[16] |
| monitoreo estructural | 2 | Lauria et al. 2024[15], Pavón et al. 2021[30] |
| construcción en general | 4 | Aibinu et al. 2020[17], Disney et al. 2023[22], Zhou H. et al. 2024[25], Ibrahim, et al. 2023[28] |
| capacitación | 1 | Podder et al. 2022[18] |
| construcción modular | 1 | Volpe et al. 2021[19] |
| construcción vial | 1 | Kim et al. 2024[21] |
| construcción de prefabricados | 1 | Wang et al. 2020[23] |

Los desafíos encontrados son que se requiere más investigación, hay dificultades para llevar a la práctica los enfoques tecnológicos propuestos en estas investigaciones, en algunos casos aunque la tecnología está lista para ser implementada, el entorno no cumple con los requisitos tecnológicos o de infraestructura necesarios para una adecuada implementación, finalmente hay algunos planteamientos tecnológicos que requieren ser optimizados previamente, estas categorías se muestran asociadas al número de publicaciones en la tabla VI. En ella se puede ver que el desafío más mencionado por las fuentes analizadas es la necesidad de desarrollar más investigación.

TABLA VI
DESAFIOS Y NUMERO DE PUBLICACIONES

| desafío | cantidad investigaciones |
|------------------------|--------------------------|
| llevar a la práctica | 4 |
| requisitos del entorno | 3 |
| requiere optimización | 3 |
| requiere investigación | 10 |

Finalmente, los resultados en general están en consonancia con los obtenidos por [31], [32], y [33], respecto de las tendencias de investigación específicas , en relación a [32], se comprueba la clara orientación hacia los sistemas sostenibles, mientras que algunas de las limitaciones y retos, tales como las dificultades en su implementación práctica están en relación con las obtenidas por [33].

IV. CONCLUSIONES

Esta revisión tuvo como objetivo la búsqueda de tendencias tecnológicas aplicables a la industria de la construcción enfocándose principalmente en investigaciones empíricas que planteen escenarios realistas para el uso y aprovechamiento de dichas tecnologías, 11 tendencias fueron identificadas y 9 ámbitos o campos de aplicación relacionados a las mismas.

Respecto a las tendencias tecnológicas se identificaron: *nuevos sistemas constructivos, nuevos dispositivos de medición, blockchain/criptomonedas, algoritmos/software, BIM, IA/ Robots, realidad virtual/gemelos digitales, impresión 3d, internet de las cosas IoT, nuevas tecnologías para instalaciones sanitarias ISS y nuevos materiales*, las más investigadas fueron *BIM e IA/Robots* ambas consideradas en el 20% del total de investigaciones.

En cuanto a los campos de aplicación de estas tecnologías se identificaron a *la construcción sostenible, la construcción en nuevos entornos, la gestión, el monitoreo estructural, la construcción en general, la capacitación, la construcción modular, la construcción vial y la construcción de prefabricados*, los ámbitos más investigados fueron el de la *construcción sostenible* y el de la *construcción en general* representando el 30% y 20% del total de investigaciones respectivamente.

Finalmente, entre los principales desafíos asociados con el desarrollo e implementación de estas nuevas tecnologías en la industria de la construcción están la necesidad de más investigación, las dificultades para llevar los nuevos enfoques a la práctica, el no contar con los requisitos requeridos del entorno y la necesidad de optimización de estas tecnologías. El análisis bibliométrico sugiere que una dificultad y desafío adicional a estos es la necesidad de plantear enfoques multidisciplinarios.

REFERENCIAS

- [1] A. J. Sánchez-Garrido, I. J. Navarro, J. García, and V. Yepes, “A systematic literature review on modern methods of construction in building: An integrated approach using machine learning,” Aug. 15, 2023, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.jobe.2023.106725.
- [2] McKinsey&Company, “The next normal in construction Executive summary,” 2020.
- [3] A. Latina *et al.*, “Transformando la construcción en América Latina y el Caribe: digitalización e innovación como claves para la sostenibilidad,” 2024. [Online]. Available: <http://www.iadb.org>
- [4] McKinsey&Company, “REINVENTING CONSTRUCTION: A ROUTE TO HIGHER PRODUCTIVITY,” Feb. 2017.
- [5] L. Xu, Y. Zou, Y. Lu, and A. Chang-Richards, “Automation in manufacturing and assembly of industrialised construction,” Feb. 01, 2025, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.autcon.2024.105945.
- [6] I. Shufrin, E. Pasternak, and A. Dyskin, “Environmentally Friendly Smart Construction—Review of Recent Developments and Opportunities,” Dec. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/app132312891.
- [7] S. L. Zulu, A. M. Saad, and T. Omotayo, “The Mediators of the Relationship between Digitalisation and Construction Productivity: A Systematic Literature Review,” Apr. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/buildings13040839.
- [8] J. Jang, S. Ahn, S. H. Cha, K. Cho, C. Koo, and T. W. Kim, “Toward productivity in future construction: Mapping knowledge and finding insights for achieving successful offsite construction projects,” Feb. 01, 2021, *Oxford University Press*. doi: 10.1093/jede/qwaa071.
- [9] M. J. Page *et al.*, “The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews,” Mar. 29, 2021, *BMJ Publishing Group*. doi: 10.1136/bmj.n71.

- [10] N. R. Haddaway, M. J. Page, C. C. Pritchard, and L. A. McGuinness, "PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis," *Campbell Systematic Reviews*, vol. 18, no. 2, Jun. 2022, doi: 10.1002/cel2.1230.
- [11] W. Pan, K. Iturralde, T. Bock, R. G. Martinez, O. M. Juez, and P. Finocchiaro, "A conceptual design of an integrated Façade system to reduce embodied energy in residential buildings," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 14, pp. 1–23, Jul. 2020, doi: 10.3390/su12145730.
- [12] D. A. Maisano *et al.*, "Dimensional measurements in the shipbuilding industry: on-site comparison of a state-of-the-art laser tracker, total station and laser scanner," *Production Engineering*, vol. 17, no. 3–4, pp. 625–642, Jun. 2023, doi: 10.1007/s11740-022-01170-7.
- [13] M. A. Kamel, E. S. Bakhoum, and M. M. Marzouk, "A framework for smart construction contracts using BIM and blockchain," *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-37353-0.
- [14] C. Zhang, L. Lv, and Z. Wang, "Evolutionary Game Analysis for Key Participants' Behavior in Digital Transformation of the Chinese Construction Industry," *Buildings*, vol. 13, no. 4, Apr. 2023, doi: 10.3390/buildings13040922.
- [15] M. Lauria and M. Azzalin, "Digital Transformation in the Construction Sector: A Digital Twin for Seismic Safety in the Lifecycle of Buildings," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 18, Sep. 2024, doi: 10.3390/su16188245.
- [16] J. Ramezani and J. Jassbi, "Quality 4.0 in action: Smart hybrid fault diagnosis system in plaster production," *Processes*, vol. 8, no. 6, Jun. 2020, doi: 10.3390/PR8060634.
- [17] A. A. Aibinu and E. Papadonikolaki, "Conceptualizing and operationalizing team task interdependences: BIM implementation assessment using effort distribution analytics," *Construction Management and Economics*, vol. 38, no. 5, pp. 420–446, May 2020, doi: 10.1080/01446193.2019.1623409.
- [18] A. Podder, K. Gruchalla, N. Brunhart-Lupo, S. Pless, M. Sica, and P. Lacchin, "Immersive Industrialized Construction Environments for Energy Efficiency Construction Workforce," *Front Virtual Real*, vol. 3, Mar. 2022, doi: 10.3389/fvrir.2022.781170.
- [19] S. Volpe, V. Sangiorgio, A. Petrella, A. Coppola, M. Notarnicola, and F. Fiorito, "Building envelope prefabricated with 3d printing technology," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 16, Aug. 2021, doi: 10.3390/su13168923.
- [20] L. Mazur, "Sustainable Architecture: Innovations and Perspectives for Multifamily Housing in Timber-Based Structures †," *Engineering Proceedings*, vol. 53, no. 1, 2023, doi: 10.3390/IOCBD2023-15990.
- [21] H. J. Kim, J. Y. Kim, J. W. Kim, S. K. Kim, and W. S. Na, "Unmanned Aerial Vehicle-Based Automated Path Generation of Rollers for Smart Construction," *Electronics (Switzerland)*, vol. 13, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.3390/electronics13010138.
- [22] O. Disney, M. Roupé, M. Johansson, J. Ris, and P. Höglin, "TOTAL BIM ON THE CONSTRUCTION SITE: A DYNAMIC SINGLE SOURCE OF INFORMATION," *Journal of Information Technology in Construction*, vol. 28, pp. 519–538, 2023, doi: 10.36680/j.itcon.2023.027.
- [23] X. Wang, S. Wang, X. Song, and Y. Han, "IoT-based intelligent construction system for prefabricated buildings: Study of operating mechanism and implementation in China," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 18, Sep. 2020, doi: 10.3390/APP10186311.
- [24] X. Yang, G. Lei, and X. Wang, "Can the development of digital construction reduce enterprise carbon emission intensity? New evidence from Chinese construction enterprises," *Front Ecol Evol*, vol. 11, 2023, doi: 10.3389/fevo.2023.1250593.
- [25] H. Zhou, S. Wang, C. Xu, and H. Li, "Process control of robotic tile laying based on position-based impedance and fuzzy-adaptive contact force control," *Journal of Intelligent Construction*, Dec. 2024, doi: 10.26599/jic.2024.9180031.
- [26] Z. Farshadfar, S. H. Khajavi, T. Mucha, and K. Tanskanen, "Machine learning-based automated waste sorting in the construction industry: A comparative competitiveness case study," *Waste Management*, vol. 194, pp. 77–87, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.wasman.2025.01.008.
- [27] B. Hadengue, E. Morgenroth, and T. A. Larsen, "Screening innovative technologies for energy-efficient domestic hot water systems," *J Environ Manage*, vol. 320, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115713.
- [28] K. A. Ibrahim, G. P. A. G. van Zijl, and A. J. Babafemi, "Influence of limestone calcined clay cement on properties of 3D printed concrete for sustainable construction," *Journal of Building Engineering*, vol. 69, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2023.106186.
- [29] G. Ahmed, T. Sheltami, A. Mahmoud, and A. Yasar, "Energy-Efficient UAVs Coverage Path Planning Approach," *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*, vol. 136, no. 3, pp. 3239–3263, 2023, doi: 10.32604/cmes.2023.022860.
- [30] R. M. Pavón, M. G. Alberti, A. A. Á. Alvarez, and I. Del Rosario Chiyón Carrasco, "Use of bim-fm to transform large conventional public buildings into efficient and smart sustainable buildings," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 11, Jun. 2021, doi: 10.3390/en14113127.
- [31] D. E. Hagan, T. Aryanti, and I. Saleh, "Trends of BIM integration in construction education: A bibliometric-based visualization analysis," *ARTEKS : Jurnal Teknik Arsitektur*, vol. 10, no. 1, pp. 125–136, Jan. 2025, doi: 10.30822/arteks.v10i1.3763.
- [32] A. Baik, "Three Decades of Innovation: A Critical Bibliometric Analysis of BIM, HBIM, Digital Twins, and IoT in the AEC Industry (1993–2024)," May 01, 2025, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), doi: 10.3390/buildings15101587.
- [33] J. Wang, Y. Ma, R. Li, and S. Zhang, "Applications of Building Information Modeling (BIM) and BIM-Related Technologies for Sustainable Risk and Disaster Management in Buildings: A Meta-Analysis (2014–2024)," Jul. 01, 2025, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), doi: 10.3390/buildings15132289.