erevna
RESEARCH REPORTS

Construcción 4.0 en Economías Emergentes: Revisión de la Literatura sobre Tecnologías, Madurez, Barreras y Factores Impulsores

Construction 4.0 in Emerging Economies: A Literature Review of Technologies, Maturity, Barriers and Drivers

David Alexander Calderón-Arregui[1]*, Pedro José Sánchez-Caimán[2], Jaime Tinto-Arandes[3]

[1] Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina
[2] Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia
[3] Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Ecuador

Recibido: 2 de agosto de 2026. **Aceptado:** 3 de octubre de 2026. **Publicado en línea:** 6 de noviembre de 2026
***Autor de correspondencia:** dacalderon07@gmail.com

Resumen

Justificación: La transición hacia la Construcción 4.0 (C4.0) enfrenta marcos teóricos fragmentados, herramientas limitadas de evaluación de madurez y escaso conocimiento validado en economías emergentes. **Objetivo:** Sintetizar la adopción tecnológica, la madurez, las barreras y las fuerzas motrices de la C4.0, identificar brechas en economías emergentes y derivar una arquitectura conceptual para un modelo de gestión. **Metodología:** Se realizó una revisión de la literatura (2020–2026; ScienceDirect, Scopus, Google Scholar y Crossref); se reunieron 694 registros únicos en 2024 y 1.420 en 2026, con 296 y 346 candidatos tras un cribado por reglas, con síntesis narrativa y análisis exploratorio de co-ocurrencia (VOSviewer). **Resultados:** Se mapeó un portafolio de 16 tecnologías en cuatro capas de interdependencia y se compararon cinco referentes de madurez; el modelo sectorial SMCeMM resultó el más coherente para construcción, aunque con validez solo conceptual. Se caracterizaron barreras y fuerzas motrices y, en el corpus analizado, se identificaron cuatro brechas: marcos de adopción orientados al liderazgo, desarrollo de competencias, instrumentos diagnósticos cuantitativos validados y estudios en economías emergentes. **Conclusión:** Se propuso una arquitectura de seis dimensiones habilitadoras, articuladas por un núcleo de Liderazgo y Estrategia, como propuesta conceptual derivada de la literatura y sujeta a validación empírica.

Palabras clave: adopción tecnológica, Construcción 4.0, economías emergentes, modelos de madurez, transformación digital.

Abstract

Justification: The transition to Construction 4.0 (C4.0) faces fragmented theoretical frameworks, limited maturity assessment tools and scarce validated knowledge in emerging economies. **Objective:** To synthesise technology adoption, maturity, barriers and drivers of C4.0, identify gaps in emerging economies and derive a conceptual architecture for a management model. **Methodology:** A literature review (2020–2026; ScienceDirect, Scopus, Google Scholar and Crossref) was conducted, using defined eligibility criteria; 694 unique records were gathered in 2024 and 1,420 in 2026, with 296 and 346 candidates after rule-based screening, with narrative synthesis and exploratory co-occurrence analysis (VOSviewer). **Results:** A portfolio of 16 technologies was mapped into four interdependence layers and five maturity references were compared; the sector model SMCeMM was the most coherent for construction, although its validity is only conceptual. Barriers and drivers were characterised and, within the analysed corpus, four gaps were identified: leadership-oriented adoption frameworks, competence development, validated quantitative diagnostic instruments and studies in emerging economies. **Conclusion:** A six-dimension enabling architecture articulated by a Leadership and Strategy core was proposed as a conceptual proposal derived from the literature and subject to empirical validation.

Keywords: Construction 4.0, digital transformation, emerging economies, maturity models, technology adoption.

Cita: Calderón-Arregui, D. A., Sánchez-Caimán, P. J., & Tinto-Arandes, J. (2026). Construcción 4.0 en Economías Emergentes: Revisión de la Literatura sobre Tecnologías, Madurez, Barreras y Factores Impulsores. *Erevna Research Reports*, *4*(2), e2026072. https://doi.org/10.70171/0b595657

CC BY NC SA

INTRODUCCIÓN

La industria global de la construcción representaba, según estimaciones de 2017, aproximadamente el 13% del PIB mundial y generaba más de 100 millones de empleos directos, sin embargo, ocupa los niveles más bajos en crecimiento de productividad y adopción digital entre los principales sectores económicos (Barbosa et al., 2017). La emergencia de la Industria 4.0 (I4.0) y su adaptación sectorial —la Construcción 4.0 (C4.0)— ha catalizado la atención investigativa desde 2016, cuando el informe de Berger (2016) introdujo formalmente el concepto e identificó el Modelado de Información de la Construcción (BIM), el IoT, los sensores inteligentes, la robótica y la realidad aumentada como tecnologías transformadoras clave.

La literatura académica sobre C4.0 ha crecido sustancialmente (Cuellar et al., 2023; Shafei et al., 2022; Yevu et al., 2021), pero persisten tres desequilibrios estructurales. Primero, las tecnologías individuales han sido estudiadas ampliamente de forma aislada, mientras que los marcos sistemáticos que integran el portafolio completo de tecnologías de C4.0 siguen siendo escasos. Segundo, los modelos de madurez para organizaciones constructoras —a diferencia de los destinados a la manufactura— carecen de instrumentos de medición validados con propiedades psicométricas documentadas (Das et al., 2023; Elhusseiny & Crispim, 2024). Tercero, la mayoría de los estudios empíricos se centran en economías de altos ingresos, mientras que las economías emergentes —que representan la mayor parte del crecimiento de la producción constructiva global— permanecen metodológicamente desatendidas (Jaiswal et al., 2024). Las revisiones sobre países en desarrollo se han centrado en seis tecnologías (BIM, IoT, robótica, impresión 3D, UAV e IA) y en los obstáculos de adopción (Jaiswal et al., 2024). Estudios de 2025 y 2026 mantienen este énfasis en contextos nacionales concretos: una encuesta a 912 contratistas de Malasia (Jaafar et al., 2026), además de una revisión que propone un marco conceptual de aceptación y adopción de la Industria 4.0 en construcción (Perera et al., 2026).

El presente artículo realizó una revisión de la literatura que abordó estos desequilibrios. Forma parte de una investigación doctoral orientada a proponer un modelo de gestión para la adopción de tecnologías de la C4.0 en economías emergentes, y constituye su fundamento teórico; su objetivo general fue sintetizar la literatura para fundamentar dicha propuesta. Sus objetivos específicos fueron: (O1) sintetizar el panorama conceptual de la C4.0 mediante análisis de redes de co-ocurrencia y revisión bibliográfica dirigida; (O2) mapear y caracterizar el portafolio de 16 tecnologías avanzadas que constituyen el ecosistema C4.0 y sus interdependencias; (O3) analizar comparativamente los referentes de madurez existentes para la adopción de C4.0; (O4) organizar el sistema de barreras y fuerzas motrices en un marco multinivel; y (O5) identificar brechas de investigación y proponer una arquitectura conceptual que fundamente un modelo de gestión validado empíricamente para la adopción de C4.0 en economías emergentes. Las preguntas de investigación fueron: (PI1) ¿qué tecnologías conforman el ecosistema de la C4.0 y cómo se interrelacionan?; (PI2) ¿qué referentes de madurez existen y qué limitaciones tienen para la construcción?; (PI3) ¿qué barreras y fuerzas motrices condicionan la adopción?; y (PI4) ¿qué brechas subsisten en economías emergentes? Frente a revisiones centradas en tendencias científicas y de patentes (Cuellar et al., 2023), en la toma de decisiones (Shafei et al., 2022), en países en desarrollo (Jaiswal et al., 2024) y en la madurez de empresas constructoras (Das et al., 2023), este artículo integra en un solo análisis el portafolio de tecnologías, los referentes de madurez y los sistemas de barreras y fuerzas motrices.

De la Industria 4.0 a la Construcción 4.0

La Industria 4.0 —introducida formalmente por Kagermann et al. (2013) y adoptada como Estrategia de Alta Tecnología de Alemania— representa la cuarta revolución industrial, caracterizada por la integración digital de sistemas físicos y cibernéticos a través del IoT, la IA, la Computación en la Nube, los Sistemas Ciberfísicos y la robótica avanzada (Birkel & Müller, 2021; Senna et al., 2023). El análisis de redes de co-ocurrencia revela que la investigación en I4.0 se agrupa principalmente en torno a la digitalización, la manufactura inteligente, la IA, el IoT, el aprendizaje automático y la sostenibilidad. Los clústeres emergentes incluyen modelos de madurez, blockchain, economía circular y pymes —señalando un desplazamiento desde el análisis puramente tecnológico hacia el organizacional y contextual (Elhusseiny & Crispim, 2024; Broccardo et al., 2024).

El término 'Construcción 4.0' fue introducido formalmente por Berger (2016). Se identifican cinco perspectivas conceptuales primarias en la literatura: (1) aplicación de principios I4.0 a la construcción (El Jazzar et al., 2021); (2) digitalización de la industria de la construcción (Pinto et al., 2024); (3) industrialización de los procesos constructivos (Li & Zou, 2023); (4) subconjunto de la Industria 4.0 (Kozlovska et al., 2021); (5) paradigma de desarrollo autónomo (van der Heijden, 2023). Entre las definiciones más citadas: 'La Construcción 4.0 es la convergencia de la producción industrial, los sistemas ciberfísicos y las tecnologías digitales con el objetivo final de crear una obra de construcción digital' (Begić & Galić, 2021, p. 6).

Un rasgo diferenciador clave respecto a la manufactura I4.0 es la naturaleza irrepetible y basada en proyectos de la producción constructiva, que exige enfoques de implementación sustancialmente más adaptativos que la digitalización en planta fabril (Baduge et al., 2022; Siriwardhana & Moehler, 2023). Newman et al. (2021) reportaron que el esfuerzo del sector se concentra en el BIM, en ocasiones a costa de otras tecnologías de la I4.0.

METODOLOGÍA

Se realizó una revisión de la literatura, con criterios explícitos de búsqueda y selección, complementada con un análisis bibliométrico exploratorio de co-ocurrencia de términos (Van Eck & Waltman, 2010). La guía PRISMA 2020 (Page et al., 2021) se tomó como referencia de transparencia. Al tratarse de una revisión de literatura, no se requirió aprobación de un comité de ética ni consentimiento informado.

Fuentes y Estrategia de Búsqueda

La búsqueda del corpus base (2020–2024) se realizó en ScienceDirect, con exportaciones del 22 y 23 de septiembre de 2024, y se complementó con la biblioteca de referencias del autor. La actualización (2021–2026) se efectuó en ScienceDirect, Scopus y Google Scholar el 29 de julio de 2026, y en Scopus y Crossref el 27 de octubre de 2026. Se aplicó una ecuación booleana orientada a la adopción tecnológica, sus facilitadores y sus obstáculos:

> ("Construction 4.0" OR "Industry 4.0 in construction") AND ("technology adoption" OR "digital transformation") AND ("barriers" OR "challenges" OR "success factors").

Se consideraron documentos en inglés o español con texto completo. Antes de la búsqueda completa se realizó una prueba piloto con 10 artículos para validar los términos de búsqueda y los criterios de

elegibilidad, lo que permitió ajustar el período temporal y el enfoque sectorial. Los ejes de madurez y liderazgo se exploraron con consultas temáticas separadas en ScienceDirect (modelos de madurez de la Industria 4.0; liderazgo en la industria de la construcción), cuyos 80 y 275 registros se integraron al cribado.

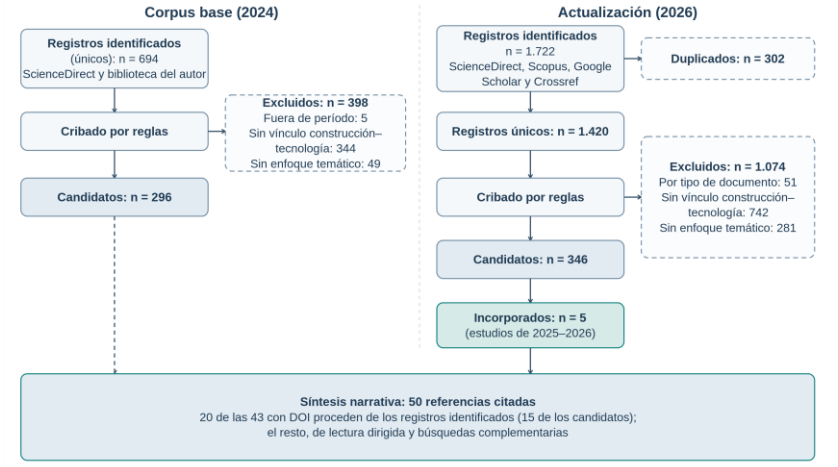
Criterios de Elegibilidad

Corpus base (2020–2024): se incluyeron estudios empíricos y revisiones sobre el sector de la construcción, en inglés o español y con texto completo, y se excluyeron los estudios de otros sectores, los documentos duplicados y los artículos sin revisión por pares. Actualización (2021–2026): se aplicaron los mismos criterios de sector y tipo mediante reglas de cribado. Lecturas fundacionales y literatura gris, sin límite de fecha ni requisito de revisión por pares: el contexto ecuatoriano (MINTEL, 2022) y los referentes de madurez (Kagermann et al., 2013; Berger, 2016; Bew & Richards, 2008; ISO, 2018; Lichtblau et al., 2015; Schumacher et al., 2016).

Cribado, Extracción y Calidad

Los registros se cribaron mediante reglas de palabras clave aplicadas al título, el resumen y las palabras clave, con tres criterios: período, vínculo entre construcción y tecnología, y enfoque en adopción, barreras, madurez o liderazgo (Figura 1). El corpus de 2024 reunió 694 registros únicos (ScienceDirect y biblioteca del autor) y la actualización de 2026, 1.722 registros (ScienceDirect, Scopus, Google Scholar y Crossref), de los cuales 1.420 fueron únicos tras eliminar duplicados por DOI o título; el cribado dejó 296 y 346 candidatos, respectivamente. La síntesis fue narrativa y se apoyó en 50 referencias, de las cuales 20 de las 43 con DOI proceden de los registros identificados (15 de los candidatos); el resto se incorporó por lectura dirigida y búsquedas complementarias. De los candidatos de 2026 se incorporaron cinco estudios de 2025 y 2026 por su pertinencia temática (Chen et al., 2025; Dehbandi et al., 2026; Jaafar et al., 2026; Perera et al., 2026; Siriwardhana et al., 2025).

Figura 1. Diagrama de flujo del cribado de registros (2024 y 2026)



Nota: Elaboración propia. «Sin enfoque temático» = sin enfoque en adopción, barreras, madurez o liderazgo.

Las dos exportaciones de ScienceDirect de 2026 usaron “industry 4.0 AND construction 4.0” (284 resultados en título, resumen y palabras clave) y “construction 4.0” en ingeniería, gestión y ciencias de la decisión (293).

Análisis de Redes de Co-ocurrencia

Se construyeron redes de co-ocurrencia de términos mediante VOSviewer (Van Eck & Waltman, 2010), con fines exploratorios, sobre subconjuntos temáticos de la literatura: (a) Industria 4.0 en sentido amplio; (b) Industria 4.0 en la construcción; y (c) adopción de tecnologías C4.0. El análisis permitió reconocer núcleos temáticos, relaciones entre conceptos y tendencias emergentes. Su interpretación es exploratoria: la baja frecuencia de un término no demuestra la inexistencia de investigación, pues depende de la base consultada, la estrategia de búsqueda, los campos analizados, los umbrales y la normalización de términos. Los clústeres se interpretaron como asociaciones temáticas y no como relaciones de dependencia entre tecnologías.

RESULTADOS

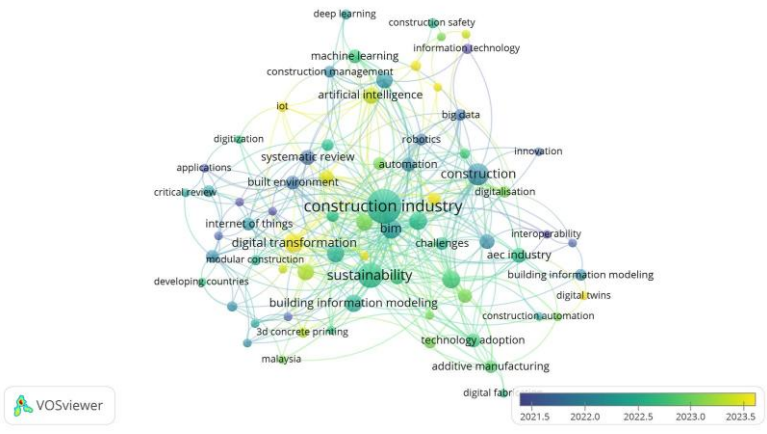
Corpus Analizado

El corpus analizado comprendió las 50 referencias citadas, identificadas en los registros de 2024 y 2026 o mediante lectura dirigida.

Estructura Temática de la Literatura

La red de co-ocurrencia de términos mostró la estructura temática de la literatura sobre adopción con fines exploratorios. En la red de adopción de tecnologías C4.0 (Figura 2), el núcleo estuvo formado por construction industry, BIM, digital transformation, sustainability y technology adoption, con presencia de términos como developing countries y modular construction. La coloración indica el año promedio de publicación de los documentos en que aparece cada término.

Figura 2. Red de co-ocurrencia de términos: adopción de tecnologías de la Construcción 4.0 (VOSviewer)



Nota: Elaboración propia. El mapa es exploratorio; la escala de color indica el año promedio de publicación.

Portafolio de 16 Tecnologías

El análisis de la red de co-ocurrencia del clúster de adopción C4.0 sugirió un ecosistema de 16 tecnologías avanzadas interrelacionadas (Franco et al., 2022), organizadas en cuatro capas funcionales según se presenta en la Tabla 1 y la Figura 3, en coherencia con propuestas de implementación por capas (El Jazzar et al., 2021). Estas capas no son secuencias de adopción sino

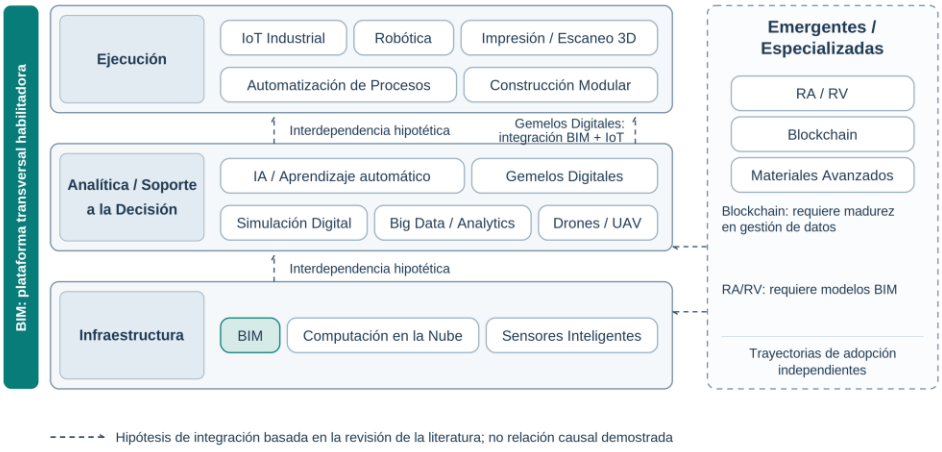
niveles de interdependencia: se plantea, como hipótesis de integración sustentada en la literatura, que la madurez de las tecnologías de la capa de infraestructura condiciona el potencial de adopción de las tecnologías analíticas y de ejecución. La clasificación es una propuesta conceptual de esta revisión; la co-ocurrencia de términos identifica asociaciones temáticas, no dependencias técnicas demostradas.

Tabla 1. Taxonomía en cuatro capas de las 16 tecnologías avanzadas de la Construcción 4.0 con descripción de interdependencias

Capa	Tecnologías	Interdependencias clave y roles habilitadores
Infraestructura	BIM · Computación en Nube · Sensores Inteligentes	Columna vertebral de datos; habilitan capas analítica y de ejecución. BIM actúa como plataforma transversal habilitadora para el intercambio de datos.
Analítica / Soporte a la Decisión	IA/ML · Gemelos Digitales · Simulación Digital · Big Data/Analytics · Drones/UAVs	Requieren datos de la capa de infraestructura; generan capacidades predictivas y de optimización. Los Gemelos Digitales requieren integración BIM+IoT para funcionar.
Ejecución	IoT Industrial · Robótica · Impresión/Escaneo 3D · Automatización de Procesos · Construcción Modular	Operacionalizan decisiones de la capa analítica; la mayoría requiere conectividad en nube e infraestructura de integración de datos.
Emergentes / Especializadas	RA/RV · Blockchain · Materiales Avanzados	Trayectorias de adopción independientes; RA/RV requiere modelos BIM para visualización; Blockchain requiere madurez en gestión de datos; Materiales Avanzados impulsados por imperativas de sostenibilidad.

Nota: Las relaciones de dependencia constituyen hipótesis de integración, no relaciones causales demostradas. BIM = Modelado de Información de la Construcción; IA/ML = inteligencia artificial/aprendizaje automático; IoT = Internet de las cosas; RA/RV = realidad aumentada/virtual; UAV = vehículos aéreos no tripulados.

Figura 3. Taxonomía conceptual en cuatro capas de las 16 tecnologías avanzadas de la Construcción 4.0



Nota: Elaboración propia a partir de la revisión de la literatura; las relaciones son hipótesis de integración y no dependencias técnicas demostradas.

Entre las 16 tecnologías, el BIM ocupó una posición estructuralmente singular como plataforma habilitadora transversal pues, según la literatura revisada, favorece el potencial de adopción de los Gemelos Digitales, la Simulación Digital, la IA/ML y la integración con IoT (Tabla 1). Como

interpretación de esta revisión, la Computación en la Nube y la Construcción Modular aparecerían como tecnologías de adopción más consolidada en organizaciones con digitalización intermedia, mientras que los Drones/UAV, ubicados en la capa analítica, constituirían una tecnología de transición entre el uso consolidado y el piloto (Calderón Arregui & Gómez Espinoza, 2023). La IA/ML, los Gemelos Digitales y el Blockchain exigirían, en cambio, mayor capacidad de absorción organizacional y datos estructurados, por lo que su incorporación sería exploratoria o piloto. En el caso del blockchain, la literatura señala desafíos de confianza, ineficiencias y fragmentación de la cadena de información, que podrían abordarse mediante gemelos digitales (Teisserenc & Sepasgozar, 2021).

Referentes de Madurez

Los cinco referentes analizados no son equivalentes: dos modelos de madurez de manufactura (IMPULS y Schumacher et al.), un modelo específico BIM (Bew y Richards), una norma de gestión de información (ISO 19650-1) y un modelo conceptual sectorial (SMCeMM). Se compararon en seis atributos —origen, enfoque sectorial, número de dimensiones evaluadas, enfoque de medición, evidencia de validación y limitación principal—, con la salvedad de que los atributos de medición y validación no son plenamente homólogos entre categorías (Tabla 2). Los modelos de manufactura requieren adaptación antes de su uso en construcción.

Tabla 2. Análisis comparativo de referentes de madurez aplicables a la adopción de la Construcción 4.0

Referente	Origen	Sector	Dim.	Medición	Validación	Limitación principal
IMPULS (Lichtblau et al., 2015)	Alemania	Manufactura	6	Ordinal 1–5	Parcial	Específico de manufactura; sin aplicación constructiva
Schumacher et al. (2016)	Alemania	Manufactura	9	Ordinal 1–5	Sin IVC formal	Sin validación en construcción ni instrumento validado
BIM Maturity Model (Bew & Richards, 2008)	RU	Construcción	1 (BIM)	4 niveles ord.	Normativo	Restringido a BIM; no cubre portafolio C4.0
ISO 19650-1 (2018)	ISO	Construcción	1 (BIM)	Cumplimiento	Normativo	Solo BIM/información; no es instrumento diagnóstico
SMCeMM/Das et al. (2023, 2025)	Intl.	Construcción	7	Ordinal 1–5	Validez conceptual (Delphi)	Sin validación psicométrica ni diagnóstico cuantitativo

Nota: IVC = Índice de Validez de Contenido; Dim. = número de dimensiones evaluadas; SMCeMM = Smart Modern Construction enterprise Maturity Model.

El análisis comparativo indicó que el SMCeMM (Das et al., 2023) es el referente específico de construcción arquitectónicamente más relevante, con una estructura de siete dimensiones aplicable a organizaciones constructoras. La versión de 2025 definió cinco niveles de madurez y criterios de evaluación, con validez conceptual establecida mediante foros de expertos Delphi modificado (Das et al., 2025). Sin embargo, no se identificó una operacionalización en instrumentos con validación psicométrica, no cubre el portafolio de 16 tecnologías como objeto de medición y, en el corpus analizado, no se identificó su aplicación en contextos de economías emergentes. Estas tres limitaciones definen los requisitos que debería satisfacer un marco de gestión de la adopción orientado a economías emergentes, apoyado en la arquitectura dimensional del SMCeMM. En 2025 se propuso un modelo de preparación multinivel para cadenas de suministro de construcción

prefabricada, con dimensiones de tecnología, estrategia, alianzas y personal (Chen et al., 2025), diseñado para ese segmento y no como referente general. Se consideró el SMCeMM el referente más coherente con base en cuatro criterios cualitativos aplicados a la Tabla 2 (especificidad sectorial, alcance más allá del BIM, estructura multidimensional y algún grado de validación), sin puntuación numérica.

Barreras y Fuerzas Motrices

Sistema de barreras en cinco niveles. Las barreras para la adopción C4.0 conforman un sistema interdependiente más que obstáculos aislados (León-García & Bermúdez-Segura, 2021; Van Tam et al., 2024). Esta revisión propone organizar estas restricciones en un modelo sistémico de cinco niveles, desde causas raíz estructurales, pasando por barreras organizacionales, tecnológicas y de procesos, hasta los impactos negativos sistémicos. Los bucles de retroalimentación —en particular el bucle de restricción de inversión (baja productividad → baja inversión → baja madurez → baja productividad) y el bucle de brecha de habilidades (competencias insuficientes → baja adopción → evidencia limitada de ROI → subinversión en formación)— explicarían, como hipótesis de esta revisión, la persistencia de las barreras incluso cuando las restricciones individuales son parcialmente atendidas.

En el nivel estructural, los elevados costos de implementación (Durdyev et al., 2021; Jaiswal et al., 2024), la limitada capacidad de inversión de las pymes y los incentivos gubernamentales insuficientes (Manzoor et al., 2021; Jaiswal et al., 2024) constituyen la capa de causas raíz. En el nivel organizacional, la resistencia al cambio (Van Tam et al., 2024), las crónicas carencias de personal digitalmente competente (Jaiswal et al., 2024; Siriwardhana & Moehler, 2023), el débil liderazgo digital y las culturas adversas a la innovación reducen la capacidad de absorción organizacional. En el nivel tecnológico, la conectividad limitada, los equipos obsoletos y la baja interoperabilidad de plataformas crean barreras directas de implementación. En el nivel de procesos, la ausencia de estandarización y la gestión fragmentada de datos socavan la ejecución de proyectos digitales.

Sistema de fuerzas motrices en tres niveles. Las fuerzas motrices operan como un sistema habilitador macro-meso-micro. En el nivel macro, las políticas de digitalización, los incentivos fiscales y los mandatos regulatorios (ej., mandatos BIM) funcionan como catalizadores externos. En el nivel meso, el compromiso de la alta dirección y la cultura orientada a la innovación constituyen el núcleo organizacional (síntesis de esta revisión). En el nivel micro, los imperativos de eficiencia operativa y la infraestructura digital preexistente crean efectos de trayectoria que aceleran la adopción (síntesis de esta revisión). Se planteó, como hipótesis, que la infraestructura digital previa funciona como condición habilitante de las demás fuerzas motrices, en línea con la teoría de dependencia de trayectoria, lo que subraya que las intervenciones sobre infraestructura y datos preceden y condicionan las de capacidades y cultura.

Tabla 3. Síntesis del sistema multinivel de barreras y fuerzas motrices para la adopción de la Construcción 4.0

Componente	Nivel	Factores identificados en la síntesis
Barreras	Estructural (causas raíz)	Costos de implementación elevados; limitada capacidad de inversión de las pymes; incentivos gubernamentales insuficientes (Durdyev et al., 2021; Jaiswal et al., 2024; Manzoor et al., 2021)

Componente	Nivel	Factores identificados en la síntesis
Barreras	Organizacional	Resistencia al cambio; carencia de personal digitalmente competente (Jaiswal et al., 2024; Siriwardhana & Moehler, 2023; Van Tam et al., 2024); débil liderazgo digital; culturas adversas a la innovación
Barreras	Tecnológico	Conectividad limitada; equipos obsoletos; baja interoperabilidad de plataformas (Jaiswal et al., 2024)
Barreras	Procesos	Ausencia de estandarización; gestión fragmentada de datos
Barreras	Impactos sistémicos	Bucle de restricción de inversión; bucle de brecha de habilidades
Fuerzas motrices	Macro	Políticas de digitalización; incentivos fiscales; mandatos regulatorios (p. ej., BIM)
Fuerzas motrices	Meso	Compromiso de la alta dirección; cultura orientada a la innovación
Fuerzas motrices	Micro	Eficiencia operativa; infraestructura digital preexistente

Nota: Elaboración propia. Los factores sin cita (procesos, impactos sistémicos y fuerzas motrices) son interpretaciones de esta revisión y no hallazgos atribuibles a estudios individuales; requieren contraste empírico.

Alineación con los ODS y Contexto de Ecuador

Seis ODS están directamente implicados en la agenda de adopción C4.0: ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), ODS 12 (Producción y Consumo Responsables), ODS 13 (Acción por el Clima), ODS 8 (Trabajo Decente y Crecimiento Económico), ODS 4 (Educación de Calidad) y ODS 17 (Alianzas para lograr los Objetivos). En economías emergentes, esta alineación aporta legitimidad normativa a la inversión pública en digitalización y facilita el acceso a financiamiento climático para organizaciones que demuestren mejoras de sostenibilidad habilitadas por tecnología (Sajjad et al., 2023; Wang & Guo, 2022).

Las fuentes institucionales consultadas (MINTEL, 2022) describen para las economías emergentes de la región un perfil con predominio de pymes de capacidad de inversión limitada, infraestructura digital insuficiente, competencias digitales bajas y ausencia de mandatos BIM, a diferencia de Colombia, Chile y Brasil. Estas descripciones no miden la madurez del sector constructor ecuatoriano; ubicarlo en fases tempranas («Exploración») es una hipótesis contextual, no un resultado verificado. Un estudio empírico en 30 proyectos de empresas privadas ecuatorianas asoció el bajo uso de BIM con mayores costos y plazos (Andrade et al., 2024), pero estas evidencias no bastan para caracterizar el sector en su conjunto. En el corpus analizado, la investigación sobre C4.0 en Ecuador y la región andina fue escasa y no se identificaron instrumentos diagnósticos validados ni modelos de gestión específicos para este contexto.

Evidencia en economías emergentes. De los 346 candidatos de la actualización de 2026, 47 (14 %) mencionan en el título o el resumen un país o región en desarrollo, y solo 2 mencionan América Latina. Los estudios con diseño explícito siguen un patrón común: en Jordania, 373 profesionales valoraron 16 desafíos para adoptar tecnologías digitales de construcción (Alwashah et al., 2024); en India se jerarquizaron 25 desafíos de la adopción de la Industria 4.0 con un método multicriterio basado en conjuntos aproximados (Singh et al., 2023); y en Malasia, una encuesta a 912 contratistas indicó que la C4.0 se adopta sobre todo en grandes proyectos de infraestructura y edificación compleja (Jaafar et al., 2026). Estos estudios emplean cuestionarios y jerarquizaciones de percepción, no instrumentos de madurez validados, lo que respalda la brecha B3 y matiza la B4: la evidencia en economías emergentes existe, pero se concentra en Asia y África y es escasa en la región andina.

Brechas de Investigación

La Tabla 4 presenta las cuatro brechas de investigación identificadas en el corpus analizado, mapeadas a evidencia de la literatura e implicaciones para el marco conceptual propuesto. Constituyen una síntesis analítica de esta revisión, no una validación empírica.

Tabla 4. Brechas de investigación para la adopción de tecnologías de la Construcción 4.0, mapeadas a evidencia bibliográfica e implicaciones para el marco

Brecha de Investigación	Evidencia de la Revisión	Implicaciones para el Marco
B1: Ausencia de marcos de gestión de adopción orientados al liderazgo	El liderazgo se identifica de forma recurrente como factor primario de la adopción en los estudios revisados; en las fuentes revisadas no se identificó un marco que traduzca el compromiso del liderazgo en pasos accionables de adopción (Das et al., 2023)	Se sugiere considerar el pilar de Liderazgo y Estrategia como núcleo integrador de un modelo de gestión, no como una dimensión más entre iguales
B2: Estrategias subdesarrolladas de desarrollo de competencias de la fuerza laboral	La brecha de habilidades se identifica de forma recurrente como restricción vinculante en los estudios de barreras; pocos estudios proponen marcos de desarrollo de competencias integrados con la evaluación de madurez (Jaiswal et al., 2024; Siriwardhana & Moehler, 2023)	La dimensión Personas y Cultura requiere una trayectoria de desarrollo de competencias en tres etapas (conciencia → formación → institucionalización) integrada en la hoja de ruta de implementación
B3: Ausencia de instrumentos diagnósticos cuantitativos validados	Los referentes de madurez revisados que emplean escalas ordinales se basan en autoevaluaciones sin IVC, alfa de Cronbach ni fiabilidad intercodificadores documentados (Elhusseiny & Crispim, 2024)	El marco debe incluir instrumentos validados que generen índices continuos de adopción (difusos) en lugar de evaluaciones categóricas
B4: Escasez de investigación sobre adopción C4.0 en economías emergentes	En la actualización de 2026, 47 de 346 candidatos (14 %) mencionan en el título o el resumen un país o región en desarrollo y solo 2, América Latina; en el corpus analizado no se identificaron modelos de gestión validados para estos contextos (Jaiswal et al., 2024)	El modelo de gestión debería calibrarse empíricamente a las restricciones de economías emergentes y validarse por paneles de expertos con conocimiento constructivo regional

Nota: IVC = Índice de Validez de Contenido.

DISCUSIÓN

La revisión generó cuatro contribuciones respecto a la literatura existente. Primera, un mapeo integrador del portafolio de 16 tecnologías C4.0 con sus interdependencias y el rol habilitador del BIM como hipótesis. Segunda, el análisis comparativo de referentes de madurez (Tabla 2) mostró que, en el corpus analizado, ninguno cubre simultáneamente el portafolio tecnológico completo, utiliza instrumentos de medición con validación psicométrica y ha sido aplicado en contextos constructivos de economías emergentes. Tercera, la caracterización multinivel (macro-meso-micro) de barreras y fuerzas motrices permitió situar la infraestructura digital previa como condición habilitante hipotética de la adopción. Cuarta, la contextualización de Ecuador sistematizó la evidencia disponible, institucional y limitada.

Los hallazgos son coherentes con la literatura reciente. La concentración del esfuerzo en el BIM coincide con Newman et al. (2021), y los obstáculos de infraestructura, competencias y presupuesto coinciden con los de Jaiswal et al. (2024) en países en desarrollo. La organización en capas coincide con El Jazzar et al. (2021), y Shafei et al. (2022) señalaron brechas entre las tecnologías C4.0 y la toma de decisiones, que esta revisión aborda desde la gestión de la adopción. Se han hecho

evaluaciones de preparación industrial en economías emergentes (Rajbhandari et al., 2022), pero en el corpus analizado no se identificaron instrumentos específicos para organizaciones constructoras, lo que respalda la brecha B3. Hay también diferencias: los estudios de economías emergentes revisados (Alwashah et al., 2024; Singh et al., 2023; Jaafar et al., 2026) jerarquizan barreras por percepción, mientras que esta revisión propone una secuencia de intervención por capas, y Jaiswal et al. (2024) se centra en seis tecnologías frente a las 16 aquí mapeadas, por lo que las prioridades podrían variar según la tecnología.

Implicaciones para Economías Emergentes

Los resultados sugieren que, en economías emergentes, la adopción de la C4.0 no depende solo de la disponibilidad de tecnología, sino de la combinación entre capacidades organizacionales, infraestructura de datos y condiciones de contexto. La coexistencia de barreras estructurales (costos y capacidad de inversión) con barreras organizacionales (competencias y liderazgo) indica que las estrategias basadas únicamente en la adquisición de herramientas tienen una probabilidad limitada de consolidarse. En consecuencia, un modelo de gestión orientado a estas economías debería secuenciar las intervenciones, comenzando por las tecnologías de mayor consolidación y menor exigencia de absorción organizacional (infraestructura y plataformas de información), y reservando las tecnologías de mayor exigencia (IA/ML, gemelos digitales, blockchain) para fases posteriores o piloto. Esta secuenciación es una inferencia de la síntesis y requiere validación empírica. Evidencia reciente de otros contextos es coherente con esta lectura: en Australia, entrevistas con 23 expertos señalaron como barreras la integración fragmentada de tecnologías, la resistencia al cambio, la gobernanza limitada y las brechas de competencias digitales (Siriwardhana et al., 2025), y una revisión de 51 estudios sobre gestión digital de la calidad halló una adopción limitada, dominada por ensayos de laboratorio y pilotos (Dehbandi et al., 2026).

La centralidad del liderazgo es coherente con estudios previos de los autores sobre estilos de liderazgo y clima organizacional (Calderón Arregui, 2023) y sobre la validación psicométrica de escalas de liderazgo y clima en educación superior militar (Calderón Arregui et al., 2023a, 2023b), que muestran que la validación de instrumentos es factible en otros contextos organizacionales. La revisión muestra además una asimetría entre la abundancia de estudios sobre tecnologías individuales y la escasez de marcos que traduzcan el liderazgo en pasos accionables, y la ausencia de instrumentos diagnósticos validados limita la comparabilidad entre estudios y el monitoreo de la adopción.

Arquitectura Conceptual Propuesta

Construyendo sobre el marco SMCeMM de Das et al. (2023) y las brechas identificadas, esta investigación propone, como propuesta conceptual, una arquitectura sociotécnica de seis dimensiones habilitadoras articuladas por el núcleo transversal de Liderazgo y Estrategia, que alinea todas las dimensiones con los objetivos organizacionales, con el BIM como plataforma transversal. Las seis dimensiones habilitadoras son: (1) Personas y Cultura, (2) Gestión del Cambio, (3) Colaboración y Comunicación, (4) Estandarización y Automatización, (5) Gestión de Datos y (6) Innovación Tecnológica. Esta arquitectura es una propuesta derivada de la revisión; forma parte de la investigación doctoral del autor principal, por lo que su derivación debe contrastarse de forma independiente, y su validación empírica excede el alcance de este artículo.

Trazabilidad de las dimensiones: Personas y Cultura se vincula con las barreras organizacionales y la brecha B2; Gestión del Cambio, con la resistencia al cambio; Estandarización y Automatización, con

las barreras de procesos y la capa de ejecución; Gestión de Datos, con la gestión fragmentada de datos y la capa de infraestructura; Innovación Tecnológica, con el portafolio de 16 tecnologías y las barreras tecnológicas; y Liderazgo y Estrategia, con la brecha B1 y la fuerza motriz meso. Colaboración y Comunicación procede de la arquitectura del SMCeMM y no cuenta con un hallazgo propio en el corpus analizado, por lo que requiere contraste.

Un esquema de transición basado en PESTEL sitúa la trayectoria de adopción en sus dimensiones contextuales (Teisserenc & Sepasgozar, 2021), lo que es relevante en economías emergentes, donde las restricciones macro —marcos regulatorios, financiamiento público, conectividad— condicionan qué estrategias son viables en las organizaciones.

CONCLUSIÓN

Esta revisión aportó al conocimiento sobre la adopción de tecnologías de la Construcción 4.0 mediante cuatro contribuciones: un mapeo integrador del ecosistema de 16 tecnologías y sus interdependencias estratificadas; un análisis comparativo de cinco referentes de madurez que identificó el SMCeMM como arquitectónicamente coherente pero instrumentalmente incompleto; una caracterización multinivel de barreras y fuerzas motrices; y una síntesis de la evidencia disponible sobre Ecuador. En el corpus analizado se identificaron cuatro brechas: marcos de gestión orientados al liderazgo, estrategias de desarrollo de competencias de la fuerza laboral, instrumentos diagnósticos cuantitativos validados y fundamentación empírica en economías emergentes. La arquitectura conceptual propuesta, de seis dimensiones habilitadoras articuladas por un núcleo de Liderazgo y Estrategia con BIM transversal y situada en un esquema de transición PESTEL, es una propuesta conceptual que aborda estas brechas y ofrece una base teórica para el desarrollo de modelos de gestión de la adopción validados empíricamente.

Implicaciones y Limitaciones

Desde el punto de vista teórico, la revisión ofrece una taxonomía en capas y una comparación de referentes de madurez que pueden orientar el diseño de instrumentos diagnósticos. En la práctica, sugiere que las organizaciones constructoras de economías emergentes podrían priorizar la infraestructura de datos y el liderazgo antes de incorporar tecnologías más exigentes. La investigación futura debería validar multicaso los modelos de gestión, dar seguimiento longitudinal a la adopción y extender los marcos diagnósticos a otras industrias constructoras latinoamericanas.

Las limitaciones del estudio incluyen: el corpus se limita a ScienceDirect (2024) y a ScienceDirect, Scopus, Google Scholar y Crossref (2026), con publicaciones de 2020–2026 (más lecturas fundacionales), por lo que puede excluir revistas regionales y trabajos previos; el cribado se basó en reglas sobre título, resumen y palabras clave, sin doble evaluación; de los candidatos de 2026 solo se incorporaron cinco estudios, a partir de su título y resumen; no se emiten juicios sobre calidad metodológica comparada; las afirmaciones de ausencia (de instrumentos, modelos o aplicaciones) se refieren al corpus analizado y no a toda la literatura; la revisión no incorpora evidencia primaria, por lo que las conclusiones sobre Ecuador se limitan a la literatura y a fuentes institucionales disponibles; y el análisis de redes VOSviewer es exploratorio y refleja frecuencia de co-ocurrencia más que calidad de citación.

Contribuciones

David Alexander Calderón Arregui: conceptualización, metodología, investigación, análisis formal, curación de datos, visualización y redacción del borrador original. Pedro José Sánchez Caimán: supervisión, validación y redacción (revisión y edición). Jaime Tinto Arandes: metodología, supervisión, administración del proyecto, validación y redacción (revisión y edición). Todos los autores leyeron y aprobaron la versión final del manuscrito y aceptan la responsabilidad de todos los aspectos del trabajo presentado.

Conflicto de Interés

Los autores declaran que no tienen conflictos de interés en relación con el trabajo presentado en este informe.

Uso de Inteligencia Artificial

Se utilizó el asistente de IA Claude (Anthropic) como apoyo en la redacción, la organización de la información y la verificación de referencias. Los autores definieron el enfoque, revisaron y validaron todo el contenido y asumen la responsabilidad total del trabajo.

FUENTES BIBLIOGRÁFICAS

Alwashah, Z., Sweis, G. J., Abu Hajar, H., Abu-Khader, W., & Sweis, R. J. (2024). Challenges to adopt digital construction technologies in the Jordanian construction industry. *Construction Innovation, 25*(5), 1610–1630. https://doi.org/10.1108/CI-03-2023-0056

Andrade, A., Rivera, A., Saigua, S., Castillo, T., & Zárate, A. (2024). Consequences in cost and time in construction projects due to the low level of BIM methodology use. *Revista Ingeniería de Construcción, 39*(2), 151–160. https://doi.org/10.7764/RIC.00107.21

Baduge, S. K., Thilakarathna, S., Perera, J. S., 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, 104440. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104440

Barbosa, F., Woetzel, J., Mischke, J., Ribeirinho, M. J., Sridhar, M., Parsons, M., & Brown, S. (2017). *Reinventing construction: A route to higher productivity*. In McKinsey Global Institute.

Begić, H., & Galić, M. (2021). A Systematic Review of Construction 4.0 in the Context of the BIM 4.0 Premise. *Buildings, 11*(8), 337. https://doi.org/10.3390/buildings11080337

Berger, R. (2016). *Digitization in the construction industry: Building Europe's Road to "Construction 4.0"*. Roland Berger GmbH.

Bew, M., & Richards, M. (2008*). BIM maturity model*. Presentación en Construct IT Autumn Members Meeting, Brighton, Reino Unido.

Birkel, H., & Müller, J. M. (2021). Potentials of industry 4.0 for supply chain management within the triple bottom line of sustainability – A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production, 289*, 125612. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125612

Broccardo, L., Tenucci, A., Agarwal, R., & Alshibani, S. M. (2024). Steering digitalization and management control maturity in small and medium enterprises (SMEs). *Technological Forecasting and Social Change, 204*, 123446. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123446

Calderón Arregui, D. A. (2023). Estilos de liderazgo y clima organizacional: un estudio correlacional en la Escuela de Ingeniería Militar "Gral. Guillermo Rodríguez Lara". *Killkana Social, 7*(1), 53–68. https://doi.org/10.26871/killkanasocial.v7i1.1057

Calderón Arregui, D. A., & Gómez Espinoza, J. P. (2023). Empleo de nuevas tecnologías para el reconocimiento técnico de ingenieros militares: Fotografía aérea, sistemas de información geográfica y análisis multicriterio. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa, 8*(2), 21. https://doi.org/10.24133/RCSD.VOL08.N02.2023.02

Calderón Arregui, D. A., Godoy Mena, M. J., & Marrero Fernández, A. (2023a). Validating a leadership style scale in a military higher education institution: Implications for research and practice. *Revista Killkana Social, 7*(3), 61–76. https://doi.org/10.26871/killkanasocial.v7i3.1423

Calderón Arregui, D. A., Godoy Mena, M. J., & Marrero Fernández, A. (2023b). Validation of an organizational climate scale in a military higher education institution: Implications for research and practice. Chakiñan, *Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, (22), 128–144. https://doi.org/10.37135/chk.002.22.08

Chen, Z.-S., Chen, K.-D., Govindan, K., & Antwi-Afari, M. F. (2025). Evaluating digital transformation readiness in prefabricated construction supply chains: A multi-level model and fairness-aware optimization approach. *Journal of Industrial Information Integration, 45*, 100831. https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.100831

Cuellar, S., Grisales, S., & Castaneda, D. I. (2023). Constructing tomorrow: A multifaceted exploration of Industry 4.0 scientific, patents, and market trend. *Automation in Construction, 156*, 105113. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105113

Das, P., Perera, S., Senaratne, S., & Osei-Kyei, R. (2023). Paving the way for industry 4.0 maturity of construction enterprises: a state of the art review. *Engineering, Construction and Architectural Management, 30*(10), 4665–4694. https://doi.org/10.1108/ECAM-11-2021-1001

Das, P., Perera, S., Senaratne, S., & Osei-Kyei, R. (2025). A smart modern construction enterprise maturity model for business scenarios leading to Industry 4.0. *Smart and Sustainable Built Environment, 14*(1), 23–49. https://doi.org/10.1108/SASBE-09-2022-0205

Dehbandi, R., Shirpourasl, Z., & Asnaashari, E. (2026). Digital transformation of construction quality management: Systematic review of adoption and governance. *Automation in Construction, 191*, 107166. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2026.107166

Durdyev, S., Mbachu, J., Thurnell, D., Zhao, L., & Hosseini, M. R. (2021). BIM Adoption in the Cambodian Construction Industry: Key Drivers and Barriers. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 10*(4), 215. https://doi.org/10.3390/ijgi10040215

El Jazzar, M., Schranz, C., Urban, H., & Nassereddine, H. (2021). Integrating construction 4.0 technologies: A four-layer implementation plan. *Frontiers in Built Environment, 7*, 671408. https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.671408

Elhusseiny, H. M., & Crispim, J. (2024). A Review of Industry 4.0 Maturity Models: Theoretical Comparison in The Smart Manufacturing Sector. Procedia Computer Science, 232, 1869–1878. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.009

Franco, J., Domingues, A., Africano, N., Deus, R., & Battistelle, R. (2022). Sustainability in the Civil Construction Sector Supported by Industry 4.0 Technologies: Challenges and Opportunities. *Infrastructures, 7*, 43. https://doi.org/10.3390/infrastructures7030043

ISO. (2018). ISO 19650-1:2018 Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles. International Organization for Standardization.

Jaafar, M., Mokhtar Azizi, N. S., Mohamed Ghazali, F. E., Mohd Zain, M. Z., Mat Kilau, N., & Ibrahim, F. S. (2026). Technology usage, challenges and strategies for Construction 4.0 from the perspective of Malaysian contractors. *Journal of Facilities Management, 24*(2), 327–351. https://doi.org/10.1108/JFM-04-2024-0055

Jaiswal, S. V., Hunt, D. V. L., & Davies, R. J. (2024). Construction 4.0: A systematic review of its application in developing countries. *Applied Sciences, 14*(14), 6197. https://doi.org/10.3390/app14146197

Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Asegurar el futuro de la industria manufacturera alemana: recomendaciones para implementar la iniciativa estratégica Industrie 4.0, 678 p. In Informe final del grupo de trabajo Industrie 4.0. Acatech—Academia Nacional de Ciencias e Ingeniería.

Kozlovska, M., Klosova, D., & Strukova, Z. (2021). Impact of Industry 4.0 Platform on the Formation of Construction 4.0 Concept: A Literature Review. *Sustainability, 13*(5), 2683. https://doi.org/10.3390/su13052683

León-García, O. A., & Bermúdez-Segura, M. Y. (2021). Barreras y fuerzas impulsoras de la implementación de la Industria 4.0 en las organizaciones: un estado del arte. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación, 11*(3), 451–466. https://doi.org/10.19053/20278306.v11.n3.2021.13343

Li, R., & Zou, Z. (2023). Enhancing construction robot learning for collaborative and long-horizon tasks using generative adversarial imitation learning. *Advanced Engineering Informatics, 58*, 102140. https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102140

Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., Schmitt, K., Schmitz, E., & Schröter, M. (2015). *IMPULS – Industrie 4.0-Readiness*. VDMA's IMPULS-Stiftung.

Manzoor, B., Othman, I., Gardezi, S. S. S., Altan, H., & Abdalla, S. B. (2021). BIM-Based Research Framework for Sustainable Building Projects: A Strategy for Mitigating BIM Implementation Barriers. *Applied Sciences, 11*(12), 5397. https://doi.org/10.3390/app11125397

MINTEL. (2022). Rendición de cuentas MINTEL 2021. Informe de Rendición de Cuentas periodo 2021.

Newman, C., Edwards, D., Martek, I., Lai, J., Thwala, W. D., & Rillie, I. (2021). Industry 4.0 deployment in the construction industry: A bibliometric literature review and UK-based case study. *Smart and Sustainable Built Environment, 10*(4), 557–580. https://doi.org/10.1108/SASBE-02-2020-0016

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ, 372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Perera, C. S. R., Francis, V., & Gao, S. (2026). A conceptual framework for Industry 4.0 acceptance and adoption in the construction industry: A systematic review. *Construction Innovation, 26*(5), 1498–1522. https://doi.org/10.1108/CI-08-2024-0233

Pinto, P., Catorze, C., Guardão, L., Lima, L., Moutinho, J., Dias, J. P., Amândio, M., Martins, P., Silva, L., & Rodrigues, R. (2024). Digitalization of the Concreting Process in Construction. *Procedia Computer Science, 239*, 824–831. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.06.240

Rajbhandari, S., Devkota, N., Khanal, G., Mahato, S., & Paudel, U. R. (2022). Assessing the industrial readiness for adoption of industry 4.0 in Nepal: A structural equation model analysis. *Heliyon*, *8*, e08919. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08919

Sajjad, M., Hu, A., Waqar, A., Falqi, I. I., Alsulamy, S. H., Bageis, A. S., & Alshehri, A. M. (2023). Evaluation of the success of industry 4.0 digitalization practices for sustainable construction management: Chinese construction industry. *Buildings*, *13*(7), 1668. https://doi.org/10.3390/buildings13071668

Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016). A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia CIRP*, *52*, 161–166. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040

Senna, P. P., Barros, A. C., Bonnin Roca, J., & Azevedo, A. (2023). Development of a digital maturity model for Industry 4.0 based on the technology-organization-environment framework. *Computers & Industrial Engineering*, *185*, 109645. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109645

Shafei, H., Radzi, A. R., Algahtany, M., & Rahman, R. A. (2022). Construction 4.0 technologies and decision-making: A systematic review and gap analysis. *Buildings*, *12*(12), 2206. https://doi.org/10.3390/buildings12122206

Singh, A., Kumar, V., Verma, P., & Kandasamy, J. (2023). Identification and severity assessment of challenges in the adoption of industry 4.0 in Indian construction industry. *Asia Pacific Management Review*, *28*(3), 299–315. https://doi.org/10.1016/j.apmrv.2022.10.007

Siriwardhana, S., & Moehler, R. C. (2023). Enabling productivity goals through construction 4.0 skills: Theories, debates, definitions. *Journal of Cleaner Production*, *425*, 139011. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139011

Siriwardhana, S. D., Moehler, R. C., & Fang, Y. (2025). Construction 4.0 in Australia: Evaluating technological implementation, organisational adaptation and skills development. *Journal of Innovation & Knowledge*, *10*(6), 100822. https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100822

Teisserenc, B., & Sepasgozar, S. (2021). Adoption of blockchain technology through digital twins in the construction industry 4.0: A PESTELS approach. *Buildings*, *11*(12), 670. https://doi.org/10.3390/buildings11120670

van der Heijden, J. (2023). Construction 4.0 in a narrow and broad sense: A systematic and comprehensive literature review. *Building and Environment*, *244*, 110788. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110788

Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, *84*(2), 523–538. https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3

Van Tam, N., Toan, N. Q., & Van Phong, V. (2024). Investigating potential barriers to construction digitalization in emerging economies: A study in Vietnam. International Journal of Information Management Data Insights, 4(1), 100226. https://doi.org/10.1016/j.jjimei.2024.100226

Wang, K., & Guo, F. (2022). Towards sustainable development through the perspective of construction 4.0: Systematic literature review and bibliometric analysis. *Buildings*, *12*(10), 1708. https://doi.org/10.3390/buildings12101708

Yevu, S. K., Yu, A. T. W., & Darko, A. (2021). Digitalization of construction supply chain and procurement in the built environment: Emerging technologies and opportunities for sustainable processes. *Journal of Cleaner Production*, *322*, 129093. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129093