Sage Sphere Multidisciplinary Studies

ISSN: 3091-1672

Vol. 3 Núm. 1 (2026)

SSMS-Vol.3. N1. 124

Marco de diagnóstico difuso FMARF para evaluar la preparación organizacional ante la Construcción 4: validación de contenido y estudio de caso

A fuzzy diagnostic framework FMARF to assess organisational readiness for Construction 4: content validation and case study

Autores:
David Alexander Calderón Arregui
Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina
dacalderon07@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-0332-3601

Pedro José Sánchez Caimán
Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia
pedro.sanchez@unimilitar.edu.co
https://orcid.org/0000-0001-5719-7164

Jaime Tinto Arandes
Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Ecuador
jtinto@ucacue.edu.ec
https://orcid.org/0000-0001-8507-6837

Autor de correspondencia: *David Alexander Calderón Arregui*, acalderon07@gmail.com

Enviado: 09-05-2026 **Revisado:** 12-09-2026
Aceptado: 30-10-2026 **Publicado:** 31-10-2026

Cómo citar este artículo:

Calderón Arregui, D. A., Sánchez Caimán, P. J., & Tinto Arandes, J. (2026). Marco de diagnóstico difuso FMARF para evaluar la preparación organizacional ante la Construcción 4: validación de contenido y estudio de caso. *Sage Sphere Multidisciplinary Studies*, *3*(1), 1-23.
https://doi.org/10.63688/jw62aa70

© 2026; Los autores. Este es un artículo en acceso abierto, distribuido bajo los términos de una licencia Creative Commons (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea correctamente citada.

ISSN: 3091-1672

Vol. 3 Núm. 1 (2026)

RESUMEN

Introducción: Los modelos ordinales de madurez no representan explícitamente los estados de transición. Se presenta el Marco de Diagnóstico Difuso de Preparación para la Adopción (FMARF), aplicado a la Construcción 4.0.

Metodología: Estudio de caso mixto, no experimental y descriptivo-correlacional en una constructora ecuatoriana. Se realizaron tres encuestas (n = 45, 35 y 31), entrevistas a tres informantes y observación. Cuatro jueces valoraron cinco instrumentos. Los datos se procesaron mediante inferencia difusa Mamdani, un sistema de 625 reglas y correlaciones de Spearman con corrección por comparaciones múltiples.

Resultados: Los jueces otorgaron valoraciones favorables en las 20 combinaciones instrumento-criterio (IA-IC = 1,00). Los índices agregados fueron T = 0,40, M = 0,29, F = 0,36 y B = 0,50, con capacidad integral de adopción CA-C4.0 = 0,40, en la frontera Bajo–Medio. De 120 pares tecnológicos posibles, 14 (11,7 %) cumplieron los criterios de robustez. Al reconstruir las entradas desde las escalas de 0 a 10, CA-C4.0 aumentó a 0,51 (IC del 95 %: 0,43–0,59; Medio), lo que evidencia sensibilidad a la construcción de los índices. Se observó una diferencia descriptiva entre reconocimiento del impulso directivo (α = 0,81) y acciones emprendidas (α = 0,30).

Conclusiones: El FMARF permite documentar un diagnóstico gradual, pero su validez se limita al contenido de los instrumentos y a un caso único. La ventaja respecto de las escalas ordinales no se contrastó empíricamente.

Palabras clave: Construcción 4.0; lógica difusa; preparación organizacional; validez de contenido; estudio de caso.

ABSTRACT

Introduction: Ordinal maturity models do not explicitly represent transitions between levels. This article presents the Fuzzy Mamdani Adoption Readiness Framework (FMARF) applied to Construction 4.0.

Methodology: A mixed-methods, non-experimental, descriptive-correlational case study in an Ecuadorian construction firm. Three surveys (n = 45, 35 and 31), interviews with three informants and observation were conducted. Four experts assessed five instruments. Data were processed using Mamdani fuzzy inference, a 625-rule system and Spearman correlations with multiple-testing correction.

Results: Experts gave favourable ratings to all 20 instrument-criterion combinations (IA-IC = 1.00). Aggregated indices were T = 0.40, M = 0.29, F = 0.36 and B = 0.50, giving an integrated adoption capacity of CA-C4.0 = 0.40 at the Low–Medium boundary. Of 120 possible technology pairs, 14 (11.7%) met the robustness criteria. Reconstructing inputs from the 0–10 scales increased CA-C4.0 to 0.51 (95% CI: 0.43–0.59; Medium), demonstrating sensitivity to index construction. A descriptive difference was observed between awareness of management support (α = 0.81) and actions undertaken (α = 0.30).

Conclusions: FMARF documents a gradual diagnostic procedure, but validity is limited to instrument content and a single case. Its advantage over ordinal scales has not been empirically tested.

Keywords: Construction 4.0; fuzzy logic; organisational readiness; content validity; case study.

Doi: https://doi.org/10.63688/jw62aa70

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

1. INTRODUCCIÓN

Evaluar la preparación de las empresas para adoptar tecnologías de Construcción 4.0 (C4.0) (1) contribuye a orientar su implementación. La adopción es gradual y multidimensional, especialmente en organizaciones de economías emergentes, donde coexisten restricciones de recursos y capacidades tecnológicas heterogéneas.

Las escalas ordinales de madurez asignan un nivel único y no muestran explícitamente las transiciones. El SMCeMM (2) propone dimensiones de evaluación con validez conceptual, pero no se identificó en la literatura consultada una validación psicométrica de sus instrumentos. Este estudio aborda tres necesidades: representar estados intermedios; diagnosticar un portafolio de 16 tecnologías desde seis dimensiones; y documentar la valoración de contenido en un caso de construcción latinoamericano. Estas necesidades se refieren a las fuentes examinadas y no prueban la inexistencia de otras propuestas.

Los modelos de madurez de la Industria 4.0 y la Construcción 4.0 se han ampliado desde 2015 (3), con aplicaciones frecuentes en manufactura (4,5). El SMCeMM (2), antecedido por una revisión de sus autores (6), comprende siete dimensiones de proceso y cinco niveles de madurez, definidos mediante Delphi modificado y foro de expertos. Otros referentes sectoriales incluyen el DCCMM, estudiado cualitativamente en ocho constructoras alemanas (7), y un marco estratégico de madurez digital para diseño y construcción (8). Los trabajos citados no documentan una evaluación equivalente de las 16 tecnologías y sus seis dimensiones en el contexto de este caso.

La inferencia difusa Mamdani (9) se ha aplicado a la madurez en operaciones y cadenas de suministro (10), a evaluaciones multicriterio (5,11) y a mapas cognitivos difusos (12), con fundamento teórico en Ross (13). Sus grados de pertenencia representan transiciones entre categorías sin asignar exclusivamente un nivel. El índice $\alpha \in [0; 1]$ permite describir estas pertenencias; no obstante, este estudio no compara empíricamente su precisión con la de una escala ordinal.

Entre los antecedentes, IMPULS (14) y Schumacher et al. (15) emplean evaluaciones de madurez en manufactura; el BIM Maturity Model (16) se centra en BIM y la norma ISO

Doi: https://doi.org/10.63688/jw62aa70

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

19650-1 (17) establece principios de gestión de información, sin constituir una escala de preparación organizacional.

Este artículo aborda estas brechas presentando el Marco de Diagnóstico Difuso de Preparación para la Adopción (FMARF): una metodología documentada paso a paso que integra instrumentos de encuesta estructurados, validación de contenido por juicio de expertos y un procesamiento difuso tipo Mamdani para generar índices normalizados continuos ($\alpha \in [0; 1]$) con su representación lingüística difusa sobre el portafolio tecnológico C4.0 y sus dimensiones organizacionales habilitadoras. El marco fue diseñado, validado en contenido por cuatro expertos y aplicado en una empresa constructora ecuatoriana (≈848 colaboradores; en adelante, la empresa objeto de estudio) durante noviembre–diciembre de 2025. Este artículo contribuye: (1) un procedimiento diagnóstico especificado paso a paso; (2) instrumentos cuya validez de contenido se valoró mediante el juicio de cuatro expertos, a nivel de instrumento-criterio; (3) un procesamiento difuso en dos capas con verificaciones de robustez muestral por dimensión y de sensibilidad paramétrica de la capa multivariable; y (4) un análisis relacional que distingue la evidencia robusta de la exploratoria mediante corrección por comparaciones múltiples.

2. METODOLOGÍA

2.1 Diseño de la investigación

La investigación adopta un diseño mixto con predominancia cuantitativa y complemento cualitativo (18). El componente cuantitativo provee medidas estructuradas de preparación para la adopción mediante tres instrumentos estandarizados procesados a través del sistema de inferencia difusa Mamdani. El componente cualitativo entrevistas semiestructuradas y observación no participante captura dimensiones contextuales y experienciales no representables mediante ítems estructurados (19). Ambos componentes se articulan mediante triangulación metodológica (20). El diseño es no experimental (21), y su alcance es descriptivo y correlacional. El caso de estudio es una empresa constructora ecuatoriana con capacidades tecnológicas heterogéneas, seleccionada para ilustrar el funcionamiento del marco, sin pretensión de representatividad estadística.

Este artículo no es una revisión sistemática. El marco conceptual se fundamentó en publicaciones sobre modelos de madurez, inferencia difusa, validez de contenido y pruebas

Doi: https://doi.org/10.63688/jw62aa70

múltiples, complementadas con búsquedas documentales dirigidas. No se reporta aquí un proceso de selección de estudios bajo PRISMA ni cifras de registros cuya trazabilidad no forme parte de la metodología del presente caso.

2.2 Instrumentos de medición

Encuesta I: Diagnóstico del uso de tecnologías avanzadas de la C4.0 (N = 45). La Encuesta I evalúa seis dimensiones analíticas D1: Familiarización (dicotómica), D2: Integración en Procesos (selección múltiple), D3: Uso de Herramientas y Plataformas (selección múltiple), D4: Beneficios Percibidos (selección múltiple), D5: Factores Limitantes (selección múltiple) y D6: Nivel de Implementación (escala de 11 puntos, 0–10, normalizada a [0; 1]) para cada una de las 16 tecnologías: BIM, IA/ML, IoT Industrial, Gemelos Digitales, Big Data/Analytics, Computación en la Nube, Simulación Digital, Robótica, Impresión/Escaneo 3D, Drones/UAVs, Automatización de Procesos, Sensores Inteligentes, Materiales Avanzados, Blockchain, RA/RV y Construcción Modular/Prefabricada. Cinco preguntas adicionales de valoración estratégica evalúan: nivel general de adopción, preparación para implementación a dos años, prioridad estratégica, relevancia de la transformación digital para la competitividad y grupos de tecnologías considerados prioritarios. Total: 101 preguntas (16 × 6 + 5). Administrada digitalmente mediante Microsoft Forms a N = 45 participantes elegibles identificados mediante muestreo por criterio (19).

Encuesta II: Madurez organizacional para la Construcción 4.0 (N = 35). La Encuesta II operacionaliza la arquitectura de siete dimensiones del marco SMCeMM de Das et al. (2): F1 Liderazgo y Estrategia, F2 Personas y Cultura, F3 Colaboración y Comunicación, F4 Estandarización y Automatización de Procesos, F5 Gestión de Datos, F6 Gestión del Cambio y F7 Innovación Tecnológica. Cada dimensión se mide mediante tres ítems en escala de 11 puntos (0–10) más ítems dicotómicos de reconocimiento, ítems de selección múltiple sobre prácticas y acciones, y preguntas de apertura. Cinco ítems globales de preparación complementan la evaluación dimensional. Total: 63 preguntas (26 en escala de 11 puntos y 37 dicotómicas, de selección múltiple o de apertura). Aplicada a N = 35 participantes con funciones de gestión, supervisión o estrategia.

Encuesta III: Barreras y fuerzas motrices (N = 31). La Encuesta III examina seis categorías de barreras (B1: Ciberseguridad/Legal, B2: Costos, B3: Talento Humano, B4: Cultura Organizacional, B5: Infraestructura Tecnológica, B6: Políticas Públicas) y

siete categorías de fuerzas impulsoras (F1: Infraestructura Digital Previa, F2: Compromiso de la Alta Dirección, F3: Eficiencia Operativa, F4: Competitividad, F5: Sostenibilidad Ambiental, F6: Competencias del Personal, F7: Políticas Gubernamentales). Cada categoría combina un ítem dicotómico de presencia, tres ítems de intensidad en escala de 11 puntos y preguntas de selección múltiple sobre mecanismos y acciones prioritarias. Total: 86 preguntas (40 de barreras y 46 de fuerzas impulsoras). Aplicada a N = 31 participantes con capacidad para evaluar factores contextuales a nivel sectorial.

Guion de entrevista semiestructurada y protocolo de observación. El guion de entrevista estructura cinco bloques temáticos: (i) perfil de experiencia con tecnologías C4.0, (ii) beneficios percibidos, (iii) barreras de implementación, (iv) estrategias de capacitación, inversión y gestión del cambio, y (v) perspectivas de evolución sectorial. Se seleccionaron 3 participantes mediante muestreo intencional con variación máxima (19). Un protocolo de observación directa no participante se aplicó en una visita a las instalaciones (24 de noviembre de 2025) para contrastar el uso declarado con el observable en campo.

2.3 Validación de contenido por juicio de expertos

Se convocó un panel de cuatro jueces expertos (J1–J4) que cumplieron los criterios de inclusión: (i) formación de posgrado en ingeniería, construcción, gestión tecnológica o disciplinas afines; (ii) experiencia comprobada en investigación o implementación de tecnologías C4.0; (iii) producción académica documentada; y (iv) experiencia mínima de cinco años en el sector (22,23). Cada juez evaluó los cinco instrumentos (tres encuestas, guion de entrevista y guía de observación) según cuatro criterios suficiencia, claridad, coherencia y relevancia en una escala ordinal de cuatro puntos (1 = no cumple; 2 = cumplimiento bajo; 3 = cumple con recomendaciones; 4 = cumple plenamente). La unidad de valoración fue la combinación instrumento-criterio (veinte combinaciones) y no cada ítem individual. Para cada combinación se calculó la proporción de jueces con valoración favorable, N_e/N, donde N_e es el número de jueces que asignan 3 o 4 y N = 4 (en adelante, índice de acuerdo a nivel instrumento-criterio, IA-IC); su promedio sintetiza cada instrumento. Siguiendo la lógica del I-CVI (22), pero sin evaluar ítems individuales, los criterios de decisión fueron: IA-IC = 1,00, combinación retenida; IA-IC = 0,75, revisión obligatoria según los comentarios cualitativos; IA-IC ≤ 0,50, reformulación sustantiva o eliminación. Este procedimiento adapta la lógica del I-CVI a la valoración global

de instrumentos; los autores han reportado procedimientos de validación de contenido de escalas en otro contexto (24,25).

2.4 Diseño muestral, recolección de datos y consideraciones éticas

La población de referencia es el personal de la empresa objeto de estudio, una constructora ecuatoriana de aproximadamente 848 colaboradores y más de 45 años de trayectoria. Se aplicó muestreo por criterio (18,19) a los tres instrumentos, dado que las encuestas requieren conocimiento previo o experiencia directa con tecnologías digitales de la construcción para una respuesta válida. Los criterios de inclusión fueron: (i) ser trabajador activo durante noviembre–diciembre de 2025; (ii) haber recibido formación o participado en proyectos donde se utilizaran tecnologías C4.0; (iii) desempeñar funciones con exposición operativa o decisional a procesos de transformación digital; y (iv) manifestar disposición voluntaria a participar. Se excluyó al personal sin conocimiento o experiencia previa en tecnologías digitales aplicadas a la construcción, al personal en inducción con menos de tres meses de vinculación y los formularios incompletos no recuperables. Las tres encuestas se administraron mediante Microsoft Forms en formato digital anónimo, con formularios separados y sin identificador común entre ellos; por ello cada encuesta se procesó como base independiente (N = 45, 35 y 31) y la integración entre instrumentos se realiza a nivel de constructos y patrones agregados, no de participantes. Este diseño limita la representatividad estadística y se reconoce como limitación.

Consideraciones éticas. El estudio se desarrolló conforme a los principios de la Declaración de Helsinki y del Informe Belmont, con aprobación del Comité de Ética en Investigación de la Universidad Nacional de Cuyo. La participación fue voluntaria y con consentimiento informado, las respuestas fueron anónimas y la identidad de la organización se mantiene reservada mediante un acuerdo de confidencialidad.

2.5 Procesamiento difuso

El procesamiento comprendió la normalización de respuestas, un clasificador difuso de entrada única y una capa multivariable MGTAC-FIS, correspondiente al Modelo de Gestión para la Adopción de Tecnologías Avanzadas de la Construcción 4.0 (MGTAC-4.0).

Etapa 1: Normalización de los índices de entrada

Para ítems dicotómicos y opciones de selección múltiple, $\alpha_i = FR_i/N_i$, donde FR_i es la frecuencia de selección y N_i el número de participantes con respuesta válida; en

selección múltiple cada opción se interpreta como una prevalencia independiente, por lo que la suma puede superar 1. Para ítems en escala de 11 puntos (0–10), $\alpha_i = \bar{x}_i/10$. Los índices dimensionales α_D se obtienen como media ponderada de las salidas defuzzificadas α_i^* de los ítems con ponderación igualitaria ($w_i = 1$), decisión deliberada que evita introducir ponderaciones subjetivas posteriores al levantamiento de datos. Como α_i^* coincide con α_i en el intervalo [0,30; 0,70] (Etapa 4), α_D difiere de la media de los α_i solo por el efecto de ítems con $\alpha < 0,30$ o $\alpha > 0,70$. Los ítems de prevalencia (FR_i/N_i) y de intensidad ($\bar{x}_i/10$) no son magnitudes equivalentes; su promedio se interpreta como un índice descriptivo de presencia e intensidad, no como una medida de un solo rasgo.

Etapa 2: Fuzzificación

Cada valor α se evalúa mediante cinco funciones de membresía híbridas sobre el universo de discurso [0; 1]. La estructura de cinco conjuntos permite la activación simultánea de conjuntos adyacentes con distintos grados de membresía μ, representando explícitamente los estados de adopción transicionales. La Tabla 1 especifica los parámetros de cada función.

Tabla 1.

Funciones de membresía Mamdani para la evaluación de adopción C4.0 en el FMARF

Conjunto Lingüístico	Función y Parámetros	α de Pico	Rango Activo	Clasificación
Muy Bajo	Trapezoidal: trap(0; 0; 0,10; 0,30)	0,00–0,10	[0,00; 0,30]	$\alpha < 0,20$
Bajo	Triangular: tri(0,10; 0,30; 0,50)	0,30	[0,10; 0,50]	$0,20 \leq \alpha < 0,40$
Medio	Triangular: tri(0,30; 0,50; 0,70)	0,50	[0,30; 0,70]	$0,40 \leq \alpha < 0,60$
Alto	Triangular: tri(0,50; 0,70; 0,90)	0,70	[0,50; 0,90]	$0,60 \leq \alpha < 0,80$
Muy Alto	Trapezoidal: trap(0,70; 0,90; 1,0; 1,0)	0,90–1,00	[0,70; 1,00]	$\alpha \geq 0,80$

Nota. Elaboración propia. Las zonas de transición en los límites habilitan la membresía parcial simultánea en conjuntos adyacentes.

Etapa 3: Reglas, implicación y agregación

La base de reglas del clasificador de entrada única consta de cinco reglas de correspondencia directa (Muy Bajo → Muy Bajo, …, Muy Alto → Muy Alto); la fuerza de

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

activación de cada regla es el grado de pertenencia del índice de entrada al conjunto antecedente. La implicación emplea el operador mínimo y la agregación el máximo (9). Al tratarse de un clasificador de entrada única, las reglas no combinan antecedentes mediante operadores lógicos ni infieren relaciones entre constructos; su aporte consiste en representar la gradualidad de los estados diagnósticos y preservar las pertenencias secundarias. Dado que las reglas son de identidad, el clasificador no extrae información adicional a la contenida en α: los grados de pertenencia son una función lineal a trozos de α.

Etapa 4: Defuzzificación

El índice numérico representativo se obtiene mediante el método del centroide: $z^* = \int z \cdot \mu(z)dz / \int \mu(z)dz$. Con las funciones de la Tabla 1, z^* coincide con α en el intervalo [0,30; 0,70] y se desvía en los extremos por la forma de los conjuntos: $z^* = 0{,}108$ para $\alpha = 0$, 0,226 para $\alpha = 0{,}20$, 0,774 para $\alpha = 0{,}80$ y 0,892 para $\alpha = 1{,}00$, de modo que z^* se comprime hacia [0,108; 0,892] (13,26). La calificación lingüística final se determina por el conjunto con mayor μ activado (equivale a los umbrales 0,20, 0,40, 0,60 y 0,80 de la Tabla 1; en los umbrales, con $\mu = 0{,}50$ en dos conjuntos, el resultado se reporta como categoría de frontera); las membresías residuales de los conjuntos secundarios activos se reportan para describir las zonas de transición interdimensional. Los resultados se reportan con el índice normalizado α y sus grados de pertenencia μ; z^* se calcula con fines de representación y de agregación dimensional. Al aplicarlo a los 24 índices dimensionales del caso, la categoría del clasificador coincidió en los 24 con la obtenida por umbrales nítidos (0,20, 0,40, 0,60, 0,80); su aporte diferencial se limita a informar la pertenencia secundaria, que en 17 de los 24 índices fue ≥ 0,20.

Capa de integración multivariable (MGTAC-FIS)

Como segunda capa, complementaria al clasificador de entrada única, se implementó un sistema Mamdani multivariable (MGTAC-FIS) que integra a nivel organizacional cuatro constructos: adopción tecnológica (T), madurez organizacional (M), fuerzas impulsoras (F) y severidad de barreras (B), esta última sin invertir. Con cuatro entradas y cinco conjuntos por entrada, el espacio de antecedentes comprende $5^4 = 625$ reglas, generadas programáticamente mediante una función lineal ponderada de los cuatro antecedentes y un techo para la categoría Muy Alta (véase más adelante). El diseño persigue monotonicidad (más T, M o F no reduce el consecuente; más B no lo aumenta), trazabilidad y una

Doi: https://doi.org/10.63688/jw62aa70

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

restricción de no compensación únicamente para el nivel Muy Alto. La conjunción de antecedentes y la implicación emplean el mínimo, la agregación el máximo y la defuzzificación el centroide sobre un universo discretizado en 1001 puntos. La salida, la Capacidad Integral de Adopción (CA-C4.0), es una estimación sistémica a nivel de caso, no una medida individual. La verificación sobre las 625 combinaciones no registró violaciones de monotonicidad en los consecuentes de las reglas (esta propiedad no garantiza monotonicidad estricta de la salida defuzzificada); la base de reglas se concibe como una propuesta inicial, calibrada con ejemplos ilustrativos, y no ha sido validada por un panel de especialistas.

Generación de los consecuentes. Cada antecedente se codifica con enteros t, m, f, b ∈ {0,4} (Muy Bajo a Muy Alto). El consecuente de cada regla se obtiene de $s = \text{clip}(W_0 + W_T \cdot t/4 + W_M \cdot m/4 + W_F \cdot f/4 + W_B \cdot b/4;\ 0,\ 1)$, con $W_0 = 0{,}2076$, $W_T = 0{,}4343$, $W_M = 0{,}2038$, $W_F = 0{,}2000$ y $W_B = -0{,}2671$, y nivel = $\lfloor 4s + 0{,}5 \rfloor$. Los pesos se calibraron por mínimos cuadrados con restricción de signo (W_T, W_M, $W_F \geq 0$; $W_B \leq 0$), lo que garantiza por construcción la monotonicidad de los consecuentes, contra diez ejemplos ilustrativos de los que se reproducen nueve. Como corrección de techo, un consecuente Muy Alto solo se conserva si M ≥ Alto y B ≤ Bajo; en otro caso se reclasifica a Alto (afecta a 5 de las 625 reglas). La distribución resultante de consecuentes es 22 Muy Bajo, 165 Bajo, 263 Medio, 160 Alto y 15 Muy Alto. Con estos parámetros, el sistema puede reconstruirse íntegramente. En consecuencia, el MGTAC-FIS debe interpretarse como una agregación difusa con pesos calibrados y no como un sistema experto validado: sobre 300 combinaciones aleatorias de entradas uniformes en [0; 1], la salida reproduce la combinación lineal de las entradas con correlación de 0,976 (error absoluto medio 0,030), y en un entorno de ±0,10 alrededor del caso la salida depende sobre todo de T (r = 0,89), mientras que M, F y B apenas la modifican.

2.6 Evaluación de robustez y análisis estadístico

La estabilidad muestral del clasificador se evaluó con 5000 remuestras bootstrap de los participantes de cada instrumento, recalculando α por dimensión (intervalos percentiles al 95 % y porcentaje de iteraciones que conservan la categoría lingüística). La sensibilidad a los parámetros de pertenencia del MGTAC-FIS se evaluó con 500 simulaciones Monte Carlo que perturban ±0,03 cada vértice de las funciones, con las entradas T, M, F y B fijas; el intervalo resultante expresa sensibilidad paramétrica y no incertidumbre muestral.

Doi: https://doi.org/10.63688/jw62aa70

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

Para evaluar la sensibilidad de CA-C4.0 a la construcción de las entradas, se reconstruyeron T, M, F y B desde las escalas 0–10 de cada instrumento y se remuestrearon 5000 veces los participantes (semilla 2026), propagando cada remuestra por el MGTAC-FIS.

La consistencia interna se estimó para las 21 escalas dimensionales de ítems en escala 0–10 de las encuestas II y III con el alfa de Cronbach sobre casos completos (intervalos bootstrap de 2000 remuestras de participantes; semilla 2026) y con el omega total de McDonald de un factor (ejes principales) solo cuando $n \geq 15$. Se excluyeron las dimensiones de un ítem y los ítems dicotómicos y de selección múltiple, que no forman escalas sumativas.

La estructura relacional se examinó con el coeficiente de Spearman (27,28), calculado en SPSS v. 29 sobre las respuestas válidas de cada par; el enrutamiento condicional de los instrumentos genera una ausencia estructural de datos (29) y, por tanto, un n variable por par. Los pares intra-instrumento se sometieron a corrección FDR de Benjamini-Hochberg (30) por familia de comparaciones e intervalos bootstrap al 95 %, y se clasificaron como robustos ($q < 0,05$, $n \geq 15$ e IC 95 % que excluye cero), inestables (n insuficiente para sostener inferencia) o no interpretables ($n < 8$). El análisis inter-instrumento, sin identificador común de participante, se mantuvo como exploratorio y fuera del núcleo inferencial. Los umbrales $n < 8$ y $n \geq 15$ son criterios convencionales de precisión mínima, no resultados de un cálculo de potencia. Las familias de comparaciones fueron los 120 pares tecnológicos y los 28 pares de dimensiones en madurez y en fuerzas impulsoras; los intervalos son percentiles de 5000 remuestras bootstrap de los pares válidos de cada comparación. Como análisis de sensibilidad ante la dependencia entre pruebas, que comparten variables, se aplicaron además la corrección de Benjamini–Yekutieli (31) y la de Holm–Bonferroni.

2.7 Análisis cualitativo

Las transcripciones de las sesiones y las notas de observación se analizaron mediante análisis temático (32), combinando códigos deductivos derivados de las dimensiones del SMCeMM y categorías inductivas emergentes de los relatos. La reflexividad se reconoce como condición del estudio.

Doi: https://doi.org/10.63688/jw62aa70

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

3. RESULTADOS

3.1 Acuerdo de jueces sobre los instrumentos

Los cuatro jueces asignaron puntuaciones de 3 o 4 en las veinte combinaciones instrumento-criterio, por lo que el índice IA-IC fue 1,00 en todos los casos. El acuerdo abarcó las tres encuestas, el guion de entrevista y la guía de observación; no constituye validación individual de los ítems. Las observaciones menores de redacción y estandarización recogidas en las fichas de valoración se incorporaron a los instrumentos. La validez de constructo no se evaluó.

3.2 Índices difusos agregados y capacidad integral de adopción

La Tabla 3 presenta los índices agregados por constructo y la salida del MGTAC-FIS. Los cuatro índices se sitúan en o por debajo del vértice 0,50 del universo: la adopción tecnológica (T = 0,40) se ubica en la frontera Bajo–Medio, la madurez organizacional (M = 0,29) y las fuerzas impulsoras (F = 0,36) en el nivel Bajo, y la severidad de barreras (B = 0,50) en el nivel Medio. El MGTAC-FIS activó ocho reglas (según las reglas activadas) y produjo CA-C4.0 = 0,40 con pertenencias iguales a Bajo y Medio ($\mu = 0,50$ en cada una): una condición de frontera. En el análisis de sensibilidad paramétrica, la salida tuvo media 0,4005 (DE = 0,0105; percentiles 2,5–97,5: 0,380–0,421) y la categoría dominante osciló entre Bajo (238/500) y Medio (262/500), sin desplazarse hacia categorías extremas; por situarse CA-C4.0 en el punto de empate entre ambos conjuntos, la etiqueta lingüística es inestable y debe leerse junto con el valor numérico. En esta simulación las entradas se mantuvieron fijas; la variación conjunta de las entradas (DE = 0,0272) amplía el rango, pero tampoco constituye un intervalo de confianza muestral.

T, M, F y B son los índices agregados de cada constructo adoptados como entradas del MGTAC-FIS (Tabla 2). Los valores adoptados no cuentan con intervalo de confianza; como referencia, la Tabla 2 presenta valores alternativos calculados a partir de las escalas 0–10 de los instrumentos.

Doi: https://doi.org/10.63688/jw62aa70

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

Tabla 2.

Origen y construcción de las entradas T, M, F y B del MGTAC-FIS y valores alternativos desde las escalas 0–10

Entrada	Adoptado	Origen (instrumento; n)	Regla de construcción	Alternativa desde escalas 0–10 [IC 95 %]
T	0,40	Encuesta I; 45	Índice agregado de implementación (D1–D6)	0,47 [0,39–0,56] (nivel de implementación, 16 tecnologías)
M	0,29	Encuesta II; 35	Índice agregado de preparación organizacional	0,58 [0,52–0,64] (preparación global, Encuesta II, n = 35)
F	0,36	Encuesta III; 31	Índice agregado de fuerzas habilitadoras	0,62 [0,56–0,68] (índice global de fuerzas)
B	0,50	Encuesta III; 31	Índice agregado de barreras	0,50 [0,41–0,58] (el mismo valor)

Nota. Elaboración propia. Alternativas: media de ítems 0–10 normalizada a [0, 1]; IC 95 % = percentiles 2,5–97,5 de 5000 remuestras de participantes (semilla 2026; Encuesta III remuestreada conjuntamente para F y B). Los valores adoptados no cuentan con intervalo.

Tabla 3.

Índices agregados por constructo y salida del MGTAC-FIS

Constructo	Instrumento (n)	α	Nivel difuso	μ
Adopción tecnológica (T)	Encuesta I (45)	0,40	Bajo–Medio	$\mu_B = 0{,}50$; $\mu_M = 0{,}50$
Madurez organizacional (M)	Encuesta II (35)	0,29	Bajo	$\mu_B = 0{,}95$; $\mu_{MB} = 0{,}05$
Fuerzas impulsoras (F)	Encuesta III (31)	0,36	Bajo	$\mu_B = 0{,}70$; $\mu_M = 0{,}30$
Severidad de barreras (B)	Encuesta III (31)	0,50	Medio	$\mu_M = 1{,}00$
CA-C4.0 (MGTAC-FIS)	Integración agregada	0,40	Bajo–Medio	$\mu_B = 0{,}50$; $\mu_M = 0{,}50$

Nota. Elaboración propia. α = índice normalizado; μ = grado de pertenencia; B = severidad de barreras (no invertida). Los índices agregados no cuentan con intervalo de confianza propio.

En la combinación de entrada del caso se activaron ocho reglas; la agregación produjo pertenencias de 0,50 tanto para Bajo como para Medio y un centroide CA-C4.0 = 0,40. En el remuestreo por dimensión, la categoría lingüística original se conservó en el 54,8–94,6 % de las remuestras en madurez, 53,4–96,2 % en tecnologías, 63,7–99,9 % en fuerzas impulsoras y 57,3–98,5 % en barreras; la menor estabilidad se concentra en las dimensiones

Doi: https://doi.org/10.63688/jw62aa70

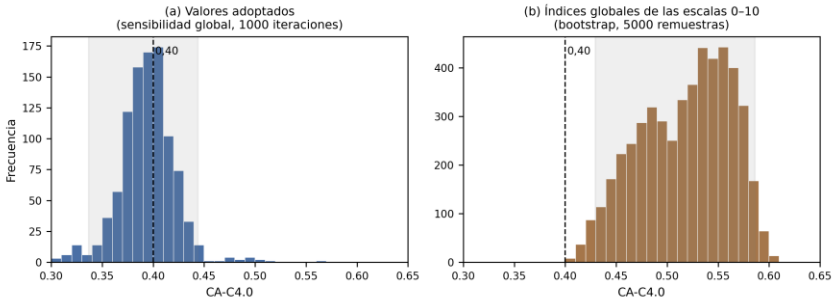
ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

con n reducido por el enrutamiento condicional. No se calculó un intervalo para los valores adoptados de T, M, F y B ni para CA-C4.0, que dependen de respuestas abiertas codificadas (Tabla 2). Adicionalmente, se evaluó la sensibilidad global de CA-C4.0 con 1000 iteraciones de simulación (Python; generador pseudoaleatorio de NumPy, semilla 2026) que perturbaron de forma simultánea y con distribución uniforme las entradas T, M, F y B (±0,03, acotadas a [0, 1]), cada vértice de las funciones de pertenencia (±0,03), los cinco pesos de la función de consecuentes (±10 %) y el 2 % de los consecuentes (±1 nivel): la media combinada fue 0,3946 (DE = 0,0272; percentiles 2,5–97,5: 0,337–0,444) y la categoría dominante se repartió aproximadamente a partes iguales entre Bajo y Medio. No se comparó el efecto de formas funcionales alternativas ni de esquemas de ponderación distintos, lo que constituye una línea de fortalecimiento metodológico.

Para acotar el efecto de la construcción de las entradas, se reconstruyeron T, M, F y B desde las escalas 0–10 y se propagó cada remuestra por el MGTAC-FIS. Con los índices globales de cada instrumento (T = 0,47; M = 0,58; F = 0,62; B = 0,50), CA-C4.0 fue 0,51 [0,43–0,59], con categoría Medio en el 99,7 % de las remuestras. Con la media de las dimensiones escalares (T = 0,47; M = 0,58; F = 0,70; B = 0,62), CA-C4.0 fue 0,46 [0,41–0,57], con Medio en el 98,7 %. Sustituir solo M deja CA-C4.0 en 0,40 y sustituir solo F, en 0,41; sustituir ambos lo eleva a 0,50. La Figura 1 compara ambas distribuciones. La clasificación de frontera Bajo–Medio del caso adoptado depende, por tanto, de cómo se construyen M y F, y no debe leerse como un estado robusto del caso.

Figura 1.

Distribución de CA-C4.0 con los valores adoptados y con los índices globales de las escalas 0–10



Nota. Elaboración propia. (a) Sensibilidad global del caso adoptado (T = 0,40; M = 0,29; F = 0,36; B = 0,50), 1000 iteraciones: media 0,3946; 58,7 % de las iteraciones bajo 0,40. (b) Bootstrap

Doi: https://doi.org/10.63688/jw62aa70

de participantes (5000 remuestras) con los índices globales de las escalas 0–10 (T = 0,47; M = 0,58; F = 0,62; B = 0,50): estimación puntual 0,51; 99,7 % en Medio. La línea discontinua marca 0,40 y la banda gris, los percentiles 2,5–97,5.

La consistencia interna de las 21 escalas dimensionales fue alta: el alfa de Cronbach tuvo mediana 0,94 (rango 0,73–0,99), con 15 escalas ≥ 0,90 y 20 ≥ 0,80; la excepción fue Formación del personal (B3; 0,73). El omega total, estimable en 13 escalas con n ≥ 15, osciló entre 0,78 y 0,98. Los tamaños de casos completos variaron entre 8 y 35 y los intervalos son amplios cuando n es reducido (p. ej., B3: 0,17–0,94; B1: 0,46–0,99); no se estimó intervalo con n < 10 (madurez D6, n = 8; fuerzas F7, n = 9). Se trata de escalas de tres ítems contiguos, por lo que valores muy altos pueden reflejar redundancia de contenido o estilo de respuesta y no equivalen a validez de constructo. Los resultados por escala están disponibles previa solicitud al autor de correspondencia.

3.3 Estructura relacional: correlaciones de Spearman con corrección por comparaciones múltiples

De los 120 pares posibles entre las 16 tecnologías, 75 (62,5 %) fueron nominalmente significativos (p < 0,05), pero solo 14 (11,7 %) resultaron robustos tras la corrección (Tabla 4); se concentran en un clúster de fabricación digital y despliegue en campo (impresión/escaneo 3D, drones, automatización, RA/RV y construcción modular), con BIM y computación en la nube como plataformas de respaldo transversal. En la madurez organizacional, el liderazgo (D1) se asocia de forma robusta con Personas y Cultura (D2) y con la preparación organizacional global (D8), mientras que sus asociaciones con D3–D7 (ρ = 0,655–0,817) se clasifican como inestables por n = 10–14. Con q < 0,05 resultaron 66 de los 120 pares tecnológicos y 14 cumplieron además n ≥ 15 e IC que excluye cero. Este análisis describe asociaciones monotónicas y no constituye por sí mismo evidencia de validez convergente psicométrica ni de causalidad. Dos de los 120 pares no fueron estimables, por lo que la familia efectiva comprendió 118 pruebas. Con la corrección de Benjamini–Yekutieli, 32 pares alcanzaron q < 0,05 y 10 de los 14 pares robustos se mantuvieron (se pierden Nube–Automatización, BIM–Impresión 3D, BIM–Drones y BIM–Construcción modular); con la de Holm–Bonferroni se mantuvieron 9. Los nueve pares que resisten las tres correcciones son BIM–computación en la nube, IA–computación en la nube, computación en la nube–drones, impresión 3D–automatización, impresión 3D–RA/RV, impresión 3D–

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

construcción modular, drones–automatización, drones–construcción modular y automatización–construcción modular.

Tabla 4.

Pares seleccionados del análisis de Spearman y su nivel de evidencia tras corrección FDR e intervalos bootstrap

Par de variables	ρ (Spearman)	p / q (BH)	n	IC 95 % bootstrap	Nivel de evidencia
Drones ↔ Automatización	0,951	< 0,001 / < 0,001	17	[0,83; 0,99]	Robusto
BIM ↔ Computación en la nube	0,799	< 0,001 / < 0,001	28	[0,64; 0,89]	Robusto (ancla del clúster; par de mayor n)
D1 Liderazgo ↔ D2 Personas y Cultura	0,819	< 0,001 / 0,001	15	[0,49; 0,95]	Robusto
D1 Liderazgo ↔ D8 Preparación organizacional	0,824	< 0,001 / < 0,001	27	[0,63; 0,93]	Robusto
D1 Liderazgo ↔ D3–D7	0,655–0,817	0,001–0,011 / 0,002–0,013	10–14	límites inferiores 0,07–0,43	Inestable (n < 15)
D6 Cambio ↔ D7 Innovación	0,958	< 0,001 / 0,001	8	[0,73; 1,00]	Inestable (n < 15)
D2 Personas ↔ D6 Cambio	0,847	0,016 / 0,019	7	[0,32; 1,00]	No interpretable (n < 8)
F2 Compromiso directivo ↔ F4 Competitividad	0,464	0,052 / 0,059	18	[−0,08; 0,84]	Sin evidencia estadística

Nota. Elaboración propia. Los pares nominalmente significativos con n reducido no se interpretan como evidencia confirmatoria. Los valores p y q se calcularon en las familias descritas en la metodología (BH); IC = percentiles 2,5–97,5 del bootstrap de los pares válidos.

3.4 Desacoples entre reconocimiento y ejecución

El diagnóstico muestra desacoples entre reconocimiento y ejecución. Primero, la familiarización con las tecnologías es media (α = 0,44), pero la integración en procesos (α = 0,20) y el uso de herramientas y plataformas específicas (α = 0,18) son muy bajos. Segundo, el conocimiento del impulso estratégico de la alta dirección alcanza α = 0,81 (Muy alto),

Doi: https://doi.org/10.63688/jw62aa70

mientras que las acciones directivas efectivamente emprendidas se ubican en α = 0,30 (Bajo): una brecha Δα = 0,51, la mayor del diagnóstico (se compara con el umbral orientativo de 0,45 adoptado en el análisis; la diferencia se calcula sobre ítems de naturaleza distinta y sin intervalo de confianza). Tercero, el costo se perfila como una barrera de alta intensidad (α = 0,686). Estos patrones son descriptivos y situados; no implican causalidad ni son generalizables más allá del caso.

3.5 Hallazgos cualitativos

El corpus comprendió dos sesiones con tres informantes (un directivo de alta dirección, E1-AD, y dos profesionales de Producción e Infraestructura Metálica, E2/E3-OP) y una observación directa (24 de noviembre de 2025); por su tamaño, los hallazgos se interpretan como evidencia situada y no como saturación teórica. El análisis distinguió cinco temas: (1) adopción tecnológica segmentada e interoperabilidad insuficiente; (2) liderazgo estratégico con brechas de formalización operativa; (3) cultura favorable a la innovación con apropiación desigual del cambio; (4) disponibilidad de datos con capacidad analítica limitada; y (5) coexistencia de capacidades instaladas, barreras y necesidades operativas. La observación corroboró el uso de herramientas de modelado en las oficinas técnicas junto con la ausencia de enlace automático con el sistema de planificación de recursos y la persistencia de planos impresos en la comunicación con producción. Los temas se utilizaron como unidades de triangulación con los índices difusos, por ejemplo con la brecha liderazgo–ejecución. El componente cualitativo cumple una función de contextualización complementaria y no de integración plena, y los temas se ofrecen como evidencia situada.

4. DISCUSIÓN

Los resultados se leen frente a dos líneas de la literatura. Los modelos de madurez para la construcción el SMCeMM (2), el DCCMM (7) y el marco estratégico de madurez digital de diseño y construcción (8) asignan niveles discretos y se apoyan en validación conceptual o cualitativa; el FMARF aporta una escala continua con pertenencias secundarias y una valoración de contenido documentada, aunque sin una validación psicométrica equivalente. Los enfoques difusos aplicados a la madurez digital (5,10-12) emplean la lógica difusa sobre modelos existentes, ya sea para la inferencia o para la ponderación multicriterio; trabajos recientes en construcción incorporan un índice de digitalización difuso para proyectos (33) y

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

una evaluación de madurez digital basada en ontología y procesos (34), sin documentar la validación de contenido de los instrumentos; la contribución del presente estudio es un procedimiento diagnóstico trazable para organizaciones constructoras en un contexto latinoamericano, y no un nuevo modelo de madurez. Esto es coherente con las revisiones que señalan la heterogeneidad de los modelos de madurez y su escasa validación empírica (3,4).

El FMARF realiza tres contribuciones metodológicas. Primera, complementa la clasificación categórica con índices normalizados continuos y grados de pertenencia que conservan las pertenencias secundarias. En el caso, la capacidad integral de adopción (CA-C4.0 = 0,40) se ubica exactamente en la frontera Bajo–Medio, y la diferencia entre indicadores de reconocimiento y ejecución ($\Delta\alpha = 0{,}51$, calculada con ítems de distinta naturaleza) sugiere, de forma descriptiva, que la habilitación a nivel de ejecución merece atención prioritaria frente a las campañas de concienciación. La representación difusa aporta una lectura gradual de estos resultados; no se ha contrastado que mejore la precisión diagnóstica respecto de un índice normalizado con umbrales rígidos, comparación que constituye una prioridad de investigación.

Segunda, el marco documenta su procedimiento de valoración de contenido (acuerdo unánime de cuatro jueces en las veinte combinaciones instrumento-criterio) y sus verificaciones de robustez: bootstrap de 5000 remuestras por instrumento sobre los índices por dimensión y sensibilidad paramétrica Monte Carlo de la capa multivariable. Esta documentación facilita la comparación entre estudios; la replicación completa del MGTAC-FIS requiere disponer de la base de reglas y de los parámetros de generación. Debe subrayarse, sin embargo, que la validación se realizó a nivel instrumento-criterio y no ítem por ítem, que un panel de cuatro jueces con acuerdo unánime discrimina poco entre combinaciones, que no se evaluó la validez de constructo y que la fiabilidad interna se estimó solo para las escalas dimensionales de ítems en escala 0–10.

Tercera, el análisis relacional con corrección FDR e intervalos bootstrap evita sobreinterpretar la significación nominal: solo el 11,7 % de los pares tecnológicos resultó robusto, y las asociaciones del liderazgo con varias dimensiones de madurez se clasifican como inestables por tamaño muestral. Este tratamiento conservador es en sí mismo una contribución, pues convierte los patrones exploratorios en hipótesis de diseño y no en evidencia confirmatoria.

Doi: https://doi.org/10.63688/jw62aa70

Las limitaciones comprenden un caso único, muestras reducidas (n = 45, 35 y 31), ausencia de identificadores comunes entre encuestas, muestreo por criterio que excluye al personal sin exposición tecnológica previa y un componente cualitativo de tres informantes. Los parámetros difusos se definieron por criterio metodológico y la base de 625 reglas, ajustada con ejemplos de calibración ilustrativos, no ha sido validada por especialistas. La fiabilidad interna se calculó únicamente para determinadas escalas de ítems 0–10; no para todos los índices agregados. Los valores originales T, M, F y B carecen de intervalos propios y no se propagó su incertidumbre muestral a la salida inicial CA-C4.0; sí se estimaron intervalos al reconstruir las entradas desde las escalas 0–10. La clasificación de frontera es sensible a la definición de M y F (Tabla 2).

5. CONCLUSIONES

El objetivo documentar el diseño, la validación de contenido y la aplicación del FMARF se cumplió dentro del alcance descrito. El marco integra tres encuestas, entrevistas y observación; cuatro jueces valoraron los instrumentos con acuerdo unánime a nivel instrumento-criterio (IA-IC = 1,00 en las veinte combinaciones); y el procesamiento difuso en dos capas generó índices continuos con sus pertenencias secundarias. En el caso, los índices T = 0,40, M = 0,29, F = 0,36 y B = 0,50 dieron una capacidad integral de adopción CA-C4.0 = 0,40, en la frontera Bajo–Medio; con entradas reconstruidas desde las escalas 0–10, CA-C4.0 fue 0,51 (Medio), de modo que esa clasificación depende de la construcción de M y F. Solo 14 de 120 pares tecnológicos (11,7 %) resultaron robustos tras la corrección FDR, y el mayor desacople se observó entre el conocimiento del impulso directivo ($\alpha = 0,81$) y las acciones emprendidas ($\alpha = 0,30$).

El procedimiento permite presentar índices y pertenencias secundarias y diferenciar asociaciones robustas de exploratorias. El análisis de sensibilidad de las entradas alternativas muestra que una clasificación de frontera no debe interpretarse aisladamente. En este caso, los indicadores descriptivos sugieren priorizar la integración en procesos y la formalización de acciones directivas, sin atribuir causalidad a sus diferencias.

La aplicación se limita a un caso y a la validez de contenido a nivel de instrumento. Se requieren muestras mayores para analizar validez de constructo y fiabilidad de los índices,

una evaluación experta de las 625 reglas, contraste del clasificador frente a escalas ordinales y una regla uniforme de construcción de T, M, F y B con propagación de incertidumbre.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Forcael E, Ferrari I, Opazo-Vega A, Pulido-Arcas JA. Construction 4.0: a literature review. Sustainability. 2020;12(22):9755. https://doi.org/10.3390/su12229755

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

3. Flamini M, Naldi M. Maturity of Industry 4.0: a systematic literature review of assessment campaigns. J Open Innov Technol Mark Complex. 2022;8(1):51. https://doi.org/10.3390/joitmc8010051

4. Elhusseiny HM, Crispim J. A review of Industry 4.0 maturity models: theoretical comparison in the smart manufacturing sector. Procedia Comput Sci. 2024;232:1869-1878. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.009

5. Elibal K, Özceylan E. Comparing Industry 4.0 maturity models in the perspective of TQM principles using fuzzy MCDM methods. Technol Forecast Soc Change. 2022;175:121379. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121379

6. Das P, Perera S, Senaratne S, Osei-Kyei R. Paving the way for Industry 4.0 maturity of construction enterprises: a state-of-the-art review. Eng Constr Archit Manag. 2023;30(10):4665-4694. https://doi.org/10.1108/ECAM-11-2021-1001

7. Jäkel JI, Fischerkeller F, Oberhoff T, Klemt-Albert K. Development of a maturity model for the digital transformation of companies in the context of Construction Industry 4.0. J Inf Technol Constr. 2024;29:778-809. https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.034

8. Perera S, Jin X, Das P, Gunasekara K, Samaratunga M. A strategic framework for digital maturity of design and construction through a systematic review and application. J Ind Inf Integr. 2023;31:100413. https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100413

9. Mamdani EH, Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. Int J Man Mach Stud. 1975;7(1):1-13. https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2

10. Caiado RGG, Scavarda LF, Gavião LO, Ivson P, de Mattos Nascimento DL, Garza-Reyes JA. A fuzzy rule-based Industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management. Int J Prod Econ. 2021;231:107883. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107883

11. Nebati EE, Ayvaz B, Kusakci AO. Digital transformation in the defense industry: a maturity model combining SF-AHP and SF-TODIM approaches. Appl Soft Comput. 2023;132:109896. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109896

12. Erkan EF, Uygun Ö, Demir Hİ. Assessing digital transformation using fuzzy cognitive mapping supported by artificial intelligence techniques. Appl Soft Comput. 2024;166:112199. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112199

13. Ross TJ. Fuzzy logic with engineering applications. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons; 2010. https://doi.org/10.1002/9781119994374

14. Lichtblau K, Stich V, Bertenrath R, Blum M, Bleider M, Millack A, et al. IMPULS – Industrie 4.0-Readiness. Aachen: IMPULS-Stiftung; 2015. https://impuls-stiftung.de/wp-content/uploads/2022/05/Industrie-4.0-Readiness-english.pdf

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

16. Bew M, Richards M. BIM maturity model. Presentado en: Construct IT Autumn Members' Meeting; 2008; Brighton, Reino Unido. http://bim-level2.org/globalassets/pdfs/bim-maturity-model.pdf

17. International Organization for Standardization. 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. Geneva: ISO; 2018. https://www.iso.org/es/contents/data/standard/06/80/68078.html

18. Creswell JW, Creswell JD. Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. 5th ed. Thousand Oaks: SAGE Publications; 2018. https://www.sagepub.com/shop/buy-a-book/research-design-5-255675

19. Patton MQ. Qualitative research and evaluation methods. 3rd ed. Thousand Oaks: SAGE Publications; 2002. https://search.worldcat.org/title/1251401598

20. Denzin NK. The research act: a theoretical introduction to sociological methods. 2nd ed. New York: McGraw-Hill; 1978. https://books.google.com/books/about/The_Research_Act.html?id=gfS1AAAAIAAJ

21. Hernández Sampieri R, Fernández Collado C, Baptista Lucio P. Metodología de la investigación. 6a ed. México: McGraw-Hill Education; 2014. https://bibliotecadigital.uce.edu.ec/s/l-d/item/970

22. Lynn MR. Determination and quantification of content validity. Nurs Res. 1986;35(6):382-386. https://doi.org/10.1097/00006199-198611000-00017

23. Haynes SN, Richard DCS, Kubany ES. Content validity in psychological assessment: a functional approach to concepts and methods. Psychol Assess. 1995;7(3):238-247. https://doi.org/10.1037/1040-3590.7.3.238

24. Calderón Arregui DA, Godoy Mena MJ, Marrero Fernández A. Validating a leadership style scale in a military higher education institution: implications for research and practice. Killkana Soc. 2023;7(3):61-76. https://killkana.ucacue.edu.ec/index.php/killkana_social/article/view/1423

25. Calderón Arregui DA, Godoy Mena MJ, Marrero Fernández A. Validation of an organizational climate scale in a military higher education institution: implications for research and practice. Chakiñan. 2024;(22):128-144. https://doi.org/10.37135/chk.002.22.08

26. Zadeh LA. Fuzzy sets. Inf Control. 1965;8(3):338-353. https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X

27. Conover WJ. Practical nonparametric statistics. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons; 1999. https://www.wiley-vch.de/en/areas-interest/mathematics-statistics/practical-nonparametric-statistics-978-0-471-16068-7

28. Field A. Discovering statistics using IBM SPSS statistics. 5th ed. London: SAGE Publications; 2018. https://edge.sagepub.com/field5e

29. Little RJA, Rubin DB. Statistical analysis with missing data. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons; 2019. https://doi.org/10.1002/9781119482260

30. Benjamini Y, Hochberg Y. Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. J R Stat Soc Series B Stat Methodol. 1995;57(1):289-300. https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x

31. Benjamini Y, Yekutieli D. The control of the false discovery rate in multiple testing under dependency. Ann Stat. 2001;29(4):1165-1188. https://doi.org/10.1214/aos/1013699998

32. Braun V, Clarke V. Using thematic analysis in psychology. Qual Res Psychol. 2006;3(2):77-101. https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa

33. Mohammed A, AlSalamah Y, Ghaithan A, Shash A, Alshibani A. Fuzzy-based model for developing a digitalization index for evaluating construction project digitalization levels in Saudi Arabia. Constr Innov. 2025:1-38. https://doi.org/10.1108/CI-12-2024-0402

34. Heidenwolf O, Antal K, Szabó I. Applying BPMN and ontology to measure digital maturity in Construction 4.0: a case study. In: Proceedings of the 58th Hawaii International Conference on System Sciences; 2025 Jan 7-10; Waikoloa, Hawaii, USA. Honolulu: University of Hawai'i at Manoa; 2025. p. 5901-5910. https://doi.org/10.24251/HICSS.2025.707

CONFLICTO DE INTERESES

No existe.

FINANCIAMIENTO

No aplica.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: David Alexander Calderón Arregui y Jaime Tinto Arandes.
Metodología: David Alexander Calderón Arregui, Pedro José Sánchez Caimán y Jaime Tinto Arandes.
Investigación: David Alexander Calderón Arregui.
Redacción – borrador original: David Alexander Calderón Arregui.
Redacción – revisión y edición: David Alexander Calderón Arregui, Pedro José Sánchez Caimán y Jaime Tinto Arandes.