



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

REVISIÓN: CARACTERÍSTICAS DE LOS
SISTEMAS INFORMÁTICOS DE
INTELIGENCIA ARTIFICIAL, PARA LA
PREVENCIÓN DE RIESGOS DEL
ENTORNO LABORAL DE LAS
ACTIVIDADES DEL SECTOR
CONSTRUCCIÓN

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA
OPTAR EL GRADO DE MAESTRA EN
PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES

GLORIA ALEJANDRA CARRASCO

VILLENA

LIMA – PERÚ

2025

ASESOR

MG. JONH MAXIMILIANO ASTETE CORNEJO

JURADO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

MG. HENRY ALEXANDER CUEVA CORNEJO

PRESIDENTE

MG. BRUNELLA YSABEL LIZARDO OTERO

VOCAL

MG. MIRKO ROGERS PEZOA VILLANUEVA

SECRETARIO

DEDICATORIA.

A Dios, por darme la fuerza y la oportunidad de llegar hasta aquí.

A mis padres, por ser los pilares de mi vida y por su sacrificio que me han
permitido convertirme en la persona que soy hoy en día

A mis ángeles en el cielo, mi mama y abuelita, quien desde donde estén me guían
y cuidan mi camino. Este logro es también para ustedes

AGRADECIMIENTOS.

A mis seres queridos, quienes me acompañaron en todo este proceso,
brindándome su apoyo emocional, motivación constante y la tranquilidad
para culminar esta meta.

Asimismo, Expreso mi sincero agradecimiento a mis docentes, por la
paciencia, orientación y compromiso a lo largo de este proceso.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO.

Trabajo de investigación Autofinanciado

DECLARACIÓN DE AUTOR			
FECHA	12	NOVIEMBRE	2025
APELLIDOS Y NOMBRES DEL EGRESADO	CARRASCO VILLENA GLORIA ALEJANDRA		
PROGRAMA DE POSGRADO	MAESTRÍA EN PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES		
AÑO DE INICIO DE LOS ESTUDIOS	2024		
TITULO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN DE GRADO	REVISIÓN: CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS INFORMÁTICOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL, PARA LA PREVENCIÓN DE RIESGOS DEL ENTORNO LABORAL DE LAS ACTIVIDADES DEL SECTOR CONSTRUCCIÓN		
MODALIDAD DE TRABAJO DE GRADO	PORTAFOLIO		
Declaración del Autor El presente Trabajo de Grado es original y no es el resultado de un trabajo en colaboración con otros, excepto cuando así está citado explícitamente en el texto. No ha sido ni enviado ni sometido a evaluación para la obtención de otro grado o diploma que no sea el presente.			
Teléfono de contacto (fijo / móvil)	940627805		
E-mail	gloria.carrasco@upch.pe		



Firma del Egresado
DNI 70110759

ÍNDICE

RESUMEN
ABSTRACT

I.	DESARROLLO DE LOS TRABAJOS.....	1
1.1.	1.1 Carracteristicas de la Inteligencia Artificial	10
1.2.	1.2 Aplicabilidad en el Sector Construcción.....	31
1.3.	1.3 Prevención de Riesgos	52
II.	CONCLUSIONES.....	82
III.	RECOMENDACIONES	82
IV.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	3
V.	ANEXOS (Si fuera necesario).....	¡Error! Marcador no definido.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es analizar las características, la aplicabilidad y el aporte de la inteligencia artificial en la prevención de riesgos en construcción, en concordancia con la Ley 29783, el DS 011-2019-TR y el RNE G.050, e incorporando un enfoque de gestión ética alineado con IEEE 7000 2021 y con un sistema de gestión de IA conforme a ISO IEC 42001 2023. Los materiales y métodos fueron una revisión sistemática de literatura académica y documentos oficiales recientes, con extracción de métricas de desempeño e indicadores líderes, mapeo normativo, evaluación de transferibilidad al contexto peruano y una matriz transversal de ética, privacidad y sesgo que consideró minimización de datos, validación humana, explicabilidad y pruebas de sesgo por subgrupos. Los resultados indican que la inteligencia artificial produce impacto cuando se integra al sistema de gestión existente y se gobierna con indicadores líderes como tiempo a corrección, relación alerta a acción, cumplimiento de equipos de protección personal y registro de incidentes precursores, observándose aumentos sostenidos de cumplimiento, reducción de la latencia y descenso de dichos incidentes; destacan visión por computador para conductas y uso de equipos de protección, sensores portables para fatiga y estrés térmico, procesamiento de lenguaje natural para extraer lecciones de reportes, arquitecturas con procesamiento en el borde que disminuyen la latencia y vehículos aéreos no tripulados que amplían cobertura, con efectividad condicionada por calidad y representatividad de datos, calibración y control de deriva, capacidad organizacional e interoperabilidad en entornos multiempresa. Las conclusiones señalan que la inteligencia artificial es compatible con el marco peruano cuando su operación queda trazada en IPERC, análisis de trabajo seguro y permisos para trabajos de alto riesgo, con validación humana obligatoria, privacidad por diseño y gobierno de datos, y recomiendan una hoja de ruta con pilotos medibles, formación especializada, adopción escalonada orientada al retorno preventivo y guías técnicas que aseguren evidencia digital en auditorías.

PALABRAS CLAVES

INTELIGENCIA, ARTIFICIAL, PREVENCIÓN, RIESGOS, CONSTRUCCIÓN

ABSTRACT

The objective of this study is to analyze the characteristics, applicability, and contribution of artificial intelligence to risk prevention in construction, in line with Peru's Law 29783, DS 011-2019-TR, and the RNE G.050, and with an ethical management approach aligned to IEEE 7000 2021 and an AI management system consistent with ISO IEC 42001 2023. Materials and methods were a systematic review of recent scholarly literature and official documents, with extraction of performance metrics and leading indicators, regulatory mapping, assessment of transferability to the Peruvian context, and the development of a cross-cutting ethics, privacy, and bias matrix that considered data minimization, human validation, explainability, and subgroup bias testing. Results indicate that AI delivers impact when it is embedded in the existing safety management system and governed with leading indicators such as time to correction, alert to action ratio, compliance with personal protective equipment, and near-miss records, producing sustained gains in compliance, shorter response times, and fewer precursor incidents. The strongest effects are seen with computer vision for behaviors and PPE use, wearables for fatigue and heat stress, natural language processing to extract lessons from reports, edge processing that reduces latency, and UAVs that extend coverage, with effectiveness conditioned by data quality and representativeness, calibration and control of model drift, organizational response capacity, and interoperability in multiemployer settings. Conclusions state that AI is compatible with the Peruvian framework when its operation is traceable within IPERC, ATS, and PETAR, with mandatory human validation, privacy by design, and robust data governance, and they recommend a national roadmap with measurable pilots, specialized training, phased adoption oriented to preventive return, and technical guidance that secures digital evidence for audits.

KEYWORDS

INTELLIGENCE, ARTIFICIAL, PREVENTION, RISKS, CONSTRUCTION

I. DESARROLLO DE LOS TRABAJOS

La administración del riesgo en construcción se concibe como un proceso sistémico que integra la identificación de peligros, la evaluación de riesgos, la implantación de controles operativos y el seguimiento de su desempeño. En su forma más robusta, este proceso se estructura bajo el ciclo Planear–Hacer–Checar–Actuar (PHCA): se planifican medidas preventivas a partir de los peligros identificados; se ejecutan controles en la operación; se hacen seguimiento y medición mediante indicadores para valorar su efectividad; y se incorporan aprendizajes para la mejora continua. Todo ello se realiza asegurando el cumplimiento legal, la gobernanza de la información y la consulta y participación de los trabajadores y sus representantes desde el diseño hasta la evaluación, de modo que se fortalezcan la eficacia del sistema y la aceptación en obra (1). Sin embargo, esta lógica, que en el papel resulta consistente y coherente, choca con la complejidad del frente de obra: heterogeneidad de tareas, variabilidad ambiental, presión por plazos y la simultaneidad de múltiples riesgos que tornan insuficientes las inspecciones periódicas y los métodos puramente reactivos.

En este contexto, la inteligencia artificial (IA) no reemplaza la gestión tradicional; por el contrario, la potencia. Al integrar y tratar grandes cantidades de datos recopilados a través de sensores, grabaciones visuales, registros operativos y reportes laborales, la IA transforma información dispersa en conocimiento operativo que posibilita tanto la anticipación de condiciones peligrosas como la detección inmediata de actos inseguros, como la visión por computador y sensores del Internet de las Cosas (IoT); y la activación de respuestas (2,3). Esta capacidad de amplificación informativa reduce latencias y amplía la cobertura de supervisión,

elementos críticos en obras donde el tiempo y el espacio condicionan la exposición al riesgo.

El problema, sin embargo, no es únicamente técnico; es sistémico y multidimensional. A nivel global, aproximadamente tres millones de muertes anuales están relacionadas con trabajo, producto de accidentes, enfermedades profesionales y cientos de millones más padecen lesiones no mortales con consecuencias individuales, familiares y económicas de largo plazo (4). Tales magnitudes ponen de manifiesto que, aunque las normativas y los marcos regulatorios han evolucionado, persiste una brecha amplia entre el conocimiento disponible y la acción preventiva efectiva, sobre todo en actividades intrínsecamente peligrosas como la construcción. Por ello, la demanda por herramientas que permitan anticipar, detectar y mitigar riesgos con mayor rapidez y cobertura resulta ineludible.

Mirando hacia América Latina y Caribe enfrentan problemáticas específicas que agravan esta situación: elevados niveles de informalidad laboral, heterogeneidad en tamaño y escala de obras, desde megaproyectos hasta construcciones informales, debilidades en los sistemas de inspección y diferencias marcadas en el cumplimiento normativo entre países. Estas características, junto con la exposición creciente a factores climáticos extremos y a interrupciones logísticas, hacen que la región sea particularmente vulnerable y que la solución tecnológica deba articularse con mejoras en gobernanza, capacitación y fiscalización (5,4,6). En otras palabras, la adopción de IA en Latinoamérica no sólo requiere inversiones tecnológicas, sino también un fortalecimiento paralelo de capacidades institucionales y sociales.

La adopción práctica de IA en la construcción latinoamericana ha sido heterogénea y mayormente concentrada en pilotos o estudios de factibilidad. Las revisiones recientes muestran proliferación de propuestas técnicas (visión, audio, PLN, fusión multimodal), pero una escasez relativa de implementaciones a escala que integren sensores, conectividad robusta y gobernanza de datos. Entre las barreras recurrentes se encuentran la infraestructura de comunicaciones insuficiente en obra, la baja estandarización de datos, la carencia de personal con competencias en ciencia de datos y resistencia o desconfianza sindical hacia sistemas de vigilancia tecnológica. Por consiguiente, para que la IA deje de ser promesa y sea una herramienta efectiva de reducción de siniestralidad, es necesario un enfoque dual: innovación tecnológica acompañada de políticas de formación, transparencia y regulación del uso de datos (2,3).

Centrándonos en el caso peruano, la problemática se manifiesta con nitidez cuantitativa y cualitativa. De acuerdo con los registros del Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo (MTPE), en el año 2023 el sector de la construcción notificó 3 322 accidentes no mortales y 18 siniestros con desenlace mortal, cifras que confirman la persistencia de vulnerabilidades y la insuficiencia de estrategias preventivas actuales (7). Detrás de estos números se hallan factores recurrentes: la operación de maquinaria pesada en entornos simultáneamente complejos, la frecuente exposición a trabajos en altura, la presión por cumplir plazos que tiende a desplazar el cumplimiento riguroso de protocolos, carencias formativas y, en ciertos contextos, prácticas informales que eluden controles institucionales. Además, investigaciones recientes sobre machine learning y seguridad laboral advierten que la eficacia de modelos predictivos y sistemas automatizados depende

de la existencia de datasets representativos, balanceados y continuamente actualizados; la ausencia de estos insumos incrementa la probabilidad de sesgos y de resultados imprecisos, lo cual puede traducirse en falsos positivos que erosionan la confianza operativa o en falsos negativos que dejan riesgos no detectados (8).

Frente a este panorama, proponemos avanzar paso a paso, como en un embudo: primero, hacer un diagnóstico amplio para conocer la situación real y ubicar las principales brechas técnicas y organizativas; después, realizar pilotos controlados que combinen cámaras y sensores (IoT y wearables), análisis con inteligencia artificial y reglas claras sobre manejo y privacidad de datos; y, por último, definir cuándo y cómo escalar lo que funcione. Estos pilotos se evaluarán con indicadores alineados a ISO 45001, tales como: cuántos accidentes ocurren en relación con las horas trabajadas (tasa de frecuencia), qué tan graves son sus consecuencias (tasa de gravedad), cuántos “casi accidentes” logramos detectar a tiempo (near-miss), cuánto tarda el sistema en avisar de un riesgo (latencia de alerta) y qué tan bien aciertan los modelos de IA al distinguir situaciones seguras de riesgosas. Desde el inicio, todo se co-diseñará con trabajadores y representantes sindicales para asegurar aceptación, transparencia y respeto de los derechos laborales. Con este enfoque integral, buscamos que el potencial de la IA se convierta en una reducción real y sostenible de los accidentes en la construcción peruana (9).

El fundamento teórico de la investigación radicarán en la necesidad de articular y profundizar marcos conceptuales que expliquen la ocurrencia de accidentes y enfermedades laborales en el sector construcción del Perú, incorporando además el potencial de las Inteligencias Artificiales (IA) como herramientas de predicción y prevención. La propuesta integrará enfoques sistémicos, teoría del factor humano y

modelos de gestión del riesgo prevención, mitigación y control, complementados con sistemas de IA capaces de identificar patrones de siniestralidad a partir de grandes volúmenes de datos. De este modo, el estudio aportará un puente entre la literatura internacional y el contexto local, atendiendo tanto a semejanzas como a diferencias con respecto a otros países, con el propósito de teorizar sobre patrones que hasta ahora han sido tratados de manera fragmentaria. La introducción de la IA refuerza la construcción de un marco explicativo innovador, al situar la investigación en el cruce entre la teoría tradicional de la seguridad laboral y los avances tecnológicos emergentes.

En el plano metodológico, la investigación se sustentará en un diseño riguroso y pluralista que combinará métodos cuantitativos y cualitativos, garantizando representatividad en los muestreos de obras y empresas. A la recolección de registros de incidentes, encuestas validadas y entrevistas en profundidad con actores clave, se añadirá el uso de algoritmos de IA aplicados al análisis de datos históricos y en tiempo real, con el fin de detectar correlaciones ocultas, generar modelos predictivos y reducir la subjetividad en la interpretación. Así, el empleo de técnicas estadísticas avanzadas (correlacionales, regresión, minería de datos) se complementará con análisis temático asistido por IA, fortaleciendo la validez, la confiabilidad y la triangulación de la información. En consecuencia, se reducirá la incertidumbre y se consolidará la certeza en las conclusiones.

La dimensión práctica se justifica por su impacto potencial en la gestión de la seguridad laboral en el Perú. La investigación no solo permitirá generar recomendaciones tradicionales controles, programas de capacitación, protocolos de supervisión, sino que también propondrá la adopción de sistemas de IA capaces de

monitorear riesgos en tiempo real, predecir incidentes y optimizar recursos en las obras de construcción. En términos operativos, la integración de la IA facilitará la traducción del conocimiento en acciones inmediatas y sostenibles, generando beneficios como reducción de accidentes, disminución de costos derivados de la siniestralidad y fortalecimiento de la cultura preventiva en el rubro. Finalmente, al proporcionar evidencia localmente pertinente, el estudio contribuirá a la formulación de políticas empresariales y públicas que promuevan prácticas más seguras, equitativas, tecnológicamente avanzadas y sostenibles en el sector construcción. Entonces ¿Cuáles son las características de la aplicación de los sistemas informáticos de inteligencia artificial y la prevención de riesgos del entorno laboral? Para responder esta pregunta se plantearon tres objetivos; Analizar las características, la aplicabilidad y el aporte de los sistemas de inteligencia artificial en la prevención de riesgos laborales en el sector construcción, considerando sus beneficios y limitaciones. Describir las características fundamentales y la evolución tecnológica de la inteligencia artificial aplicadas a la prevención de gestión de riesgos de la seguridad y salud en el trabajo. Analizar la aplicabilidad de los sistemas de inteligencia artificial en el sector construcción, identificando ejemplos concretos de implementación y sus resultados en la reducción de riesgos laborales. Evaluar los aportes y limitaciones de la inteligencia artificial en la prevención de riesgos laborales en construcción, contrastando la evidencia con la normativa peruana vigente.

El presente estudio seguirá un diseño de revisión documental sistemática, mediante la técnica PRISMA, enfocada en compilar, identificar, estudiar y condensar la literatura existente sobre las particularidades y la incorporación de la

IA, aplicados a prevención de riesgos laborales en construcción. La búsqueda se efectuará en bases de datos académicas y técnicas relevantes: Scopus, Web of Science, ScienceDirect, IEEE Xplore, Redalyc y SciELO. El período de búsqueda será del 1 de enero de 2015 al 9 de septiembre de 2025.

Los documentos a incluir en esta revisión son aquellos que abordan inteligencias artificiales en visión por computador, dispositivos portátiles (wearables), algoritmos predictivos, procesamiento de lenguaje natural, y robótica; suma del riesgo en la construcción y SST (salud y seguridad en trabajo) de obra. Además, en cuanto a revisión contempla sistemáticas, artículos científicos originales (tanto experimentales como observacionales), casos de estudio que hasta cierto punto corroboran el desarrollo empírico, y reportes técnicos que predominantemente explican sus argumentaciones. Publicaciones en español o en inglés, del 2015 al 2025, y cuyo texto completo esté disponible en los fundamentos seleccionados o repositorios de instituciones disponibles, históricamente y mediante bases de datos seleccionadas, son aceptadas.

No se tendrán en cuenta en la revisión las tesis de pregrado que no tengan una versión pública sobre la cual se pueda realizar un repositorio de verificación, las cartas al editor, blogs que no tengan respaldo metodológico, y cualquier otro tipo de documento que no se pueda acceder en formato de texto. Estas exclusiones buscan la seguridad de la validez y la reproducibilidad de todos los hallazgos que se estudian en el ensayo.

El proceso de selección constará de dos etapas. En primer lugar, se realizará un cribado de títulos y resúmenes para identificar documentos potencialmente

importantes. En segundo lugar, textos completos de los trabajos preseleccionados serán evaluados detalladamente por los mismos revisores. Las discrepancias entre evaluadores se resolverán por consenso; si no se alcanzara acuerdo, se recurrirá a un tercer revisor imparcial. Todo el flujo de selección será documentado y presentado mediante un diagrama PRISMA actualizado para asegurar transparencia en el procedimiento.

La extracción de información se hará mediante una ficha estandarizada en la que se registrarán, al menos, los siguientes elementos: autor y año, país, tipo de estudio, objetivo, tecnología de IA estudiada, indicadores y métricas reportadas, el contexto de implementación, la existencia de evaluaciones de impacto o consideraciones éticas, y las limitaciones señaladas por los autores.

La calidad metodológica de los trabajos se valorará con herramientas apropiadas al diseño de cada estudio como, instrumentos para evaluar estudios de precisión diagnóstica, chequeos de calidad para revisiones sistemáticas, directrices para estudios observacionales y criterios adaptados para la literatura gris. A partir de esta valoración se ponderarán los hallazgos en la síntesis final, que será de naturaleza descriptiva y temática: se presentarán tablas resumen, una matriz que relacione normas relevantes con la evidencia identificada y las brechas detectadas, y un análisis cualitativo de las categorías emergentes.

Por último, se aclararán las limitaciones de la revisión, incluida la potencial sesgo de publicación, la heterogeneidad metodológica de los estudios y las barreras para acceder a la documentación empresarial no pública y propietaria. El protocolo de revisión, que consistirá en los objetivos, los elementos de control, los criterios

de selección y las cadenas de búsqueda empleadas, se documentará y se adjuntará como material complementario para ayudar a asegurar la reproducibilidad del estudio.

De forma transversal al diseño metodológico, se incorpora un análisis de ética, privacidad y sesgo algorítmico conforme a IEEE 7000:2021 e ISO/IEC 42001:2023. Este análisis comprende: (i) extracción sistemática de cómo cada fuente o componente de IA aborda privacidad y equidad; (ii) clasificación de controles de gobernanza (políticas, roles, auditorías y métricas); (iii) una matriz que vincule riesgos identificados con las mitigaciones propuestas; y (iv) criterios para revisión humana y documentación de decisiones durante todo el ciclo de vida del sistema.

1.1.1.1 Trabajo 1: Características de la Inteligencia Artificial

La aparición de la inteligencia artificial (IA) transformo numerosos sectores industriales, siendo la construcción uno de los más beneficiados con su uso. Según las estadísticas de la MTPE, en 2023, el ámbito de construcción en Perú sufrió 3,322 lesiones no fatales y tuvo 18 fatalidades. Estos datos por sí mismos prueban la importancia de las metodologías evasivas en tecnologías avanzadas (7). A escala mundial, la construcción da empleo a aproximadamente tres millones de individuos, y dado que cada año se registran cerca de tres millones de muertes por incidentes o patologías laborales, resulta cada vez más pertinente replantear la incorporación de herramientas tecnológicas innovadoras en esta industria (4). Esto confirma el argumento a favor de tales gastos innecesarios completamente con el propósito de reemplazar los recursos presupuestarios, que deben ser invertidos en tecnologías avanzadas para la construcción. Redirigir recursos para abordar la falta de compra de tecnologías avanzadas en el sector de la construcción para reducir los accidentes laborales.

A escala internacional, los datos más recientes y sólidos confirman que la carga de enfermedad y muerte vinculada al trabajo sigue en ascenso, lo que refuerza la pertinencia de enfoques predictivos basados en IA. En sectores de alta peligrosidad como la construcción estos patrones se expresan con mayor intensidad por la concurrencia de riesgos físicos, ergonómicos y conductuales. Esta evidencia robustece la tesis de que la prevención proactiva requiere incorporar modelos de aprendizaje automático capaces de priorizar tareas, detectar condiciones inseguras y emitir alertas tempranas en tiempo real, integrando fuentes de datos heterogéneas. Tales capacidades, descritas en revisiones de alto impacto en Automation in

Construction y Advanced Engineering Informatics, ubican a la IA como el núcleo técnico del cambio de paradigma desde la inspección retrospectiva hacia la gestión anticipatoria del riesgo (10).

Actualmente, la IA es una herramienta increíble en el campo de seguridad y salud dentro del trabajo (SST). Como se destacó en el congreso de Prevención de Riesgos Laborales celebrado en España los días 13 y 14 de junio de 2024, el aumento del uso de la IA tiene como objetivo reducir el índice de riesgo y revolucionar manera de recopilar, analizar y emplear información vinculada con gestión de seguridad y salud (11). Sobre implementación de dicha tecnología no solo permite la identificación de patrones de riesgo, sino que también facilita la detección y el monitoreo constantes de condiciones en tiempo real, emitiendo señales de advertencia temprana que minimizan en gran medida las probabilidades de un accidente.

La evidencia científica reciente clasifica los sistemas de IA para seguridad en construcción en tres modalidades de datos: visual, acústica y textual. Esta tríada multimodal potencia el desempeño porque reduce la dependencia en un solo canal y mejora la robustez frente a oclusiones, ruido o ambigüedades (9). En paralelo, la literatura propone arquitecturas híbridas edge–cloud: el procesamiento en el borde posibilita latencias de milisegundos para alertas críticas (por ejemplo, caída de persona o pérdida de casco), mientras que la nube concentra el aprendizaje continuo, auditorías y recalibración de umbrales, alineándose con marcos de mejora continua del SGSST (10). Esta dualidad operativa también facilita la trazabilidad de decisiones y la explicabilidad (XAI), elementos clave para la aceptación organizacional y la defensa técnica ante auditorías.

La IA es el dominio en el que las máquinas realizan funciones como aprender, razonar, percibir, entender el habla o la escritura y tomar decisiones que generalmente se asocian con la capacidad intelectual de los humanos (12). En lo que respecta al campo de riesgos de salud y seguridad en el trabajo, la IA incluye una colección de modalidades y técnicas que permiten a un sistema informático evaluar de manera independiente y en detalle, reconocer patrones complejos, anticipar acciones y optimizar procesos de seguridad. Así, la aplicación de la IA aquí trabaja con integraciones con la ingeniería de seguridad, la ciencia de datos y el estudio del comportamiento humano, lo que forma un enfoque multidisciplinario para la gestión de riesgos.

Desde el punto de vista técnico, los repositorios de datos para SST en construcción tienden a ser desbalanceados, con cambio de dominio entre obras y deriva de datos en el tiempo; por ello se recomiendan esquemas de reentrenamiento periódico, validación cruzada entre obras y adaptación de dominio (10) (13). En visión por computador, avances recientes en detección robusta han mostrado mejoras frente a oclusiones y objetos pequeños, dos problemas típicos del entorno constructivo (13). Estas consideraciones metodológicas impactan directamente la tasa de falsos positivos/negativos, la estabilidad entre obras y la transferencia del desempeño del modelo, por lo que deben incorporarse como requisitos de calidad del modelo dentro de los KPIs del sistema.

Una de las principales cualidades de IA en el ámbito de la salud y seguridad en el trabajo es su capacidad de análisis sobre big data, la automatización del reconocimiento de correlaciones no fácilmente observables por el analista, y la capacidad de aprendizaje autónomo (2). Esto mismo permite la evolución y

adaptación de los sistemas a diferentes escenarios y condiciones de trabajo. Por ello, a la efectiva adopción de estos sistemas no solo debe acompañarse el uso de tecnología de punta, sino que, además, hay que desarrollar habilidades administrativas y organizacionales para el control y la optimización de los sistemas. Según Kabir et al. (3), describe aplicación de IA en construcción como girando en torno a tres aspectos centrales. Primero, la recopilación automatizada de datos utilizando dispositivos inteligentes y sensores. En una segunda etapa, se lleva a cabo el tratamiento de los datos y el examen de la información a través de algoritmos avanzados. Tercero, la construcción de conocimientos aplicables para la toma de decisiones proactivas. Los pilares destacados aquí funcionan de manera sinérgica, donde la recopilación de datos determina la efectividad del análisis, y el análisis determina la utilidad de los conocimientos para la toma de decisiones.

MARCO TÉCNICO FUNCIONAL DE LA IA EN SST

El sector de la construcción está expuesto a múltiples peligros, que convierte gestión de seguridad y salud laboral en un reto constante. En los sectores, la construcción tiene la mayor cantidad de accidentes laborales y la tasa de mortalidad más alta (14). En esta situación, la IA es invaluable. Puede gestionar la salud y la seguridad e incluso predecir, identificar y ayudar a reducir el riesgo utilizando sistemas inteligentes (SST). Estos sistemas aprenden a través de sus experiencias a lo largo del tiempo y mejoran.

Metodológicamente, una IA aplicada al sistema de seguridad y vigilancia se puede entender a través de un flujo funcional que categoriza distintas fases desde la recolección de datos hasta la acción preventiva. Esta metodología permite sistematizar cómo la IA, para prevenir la ocurrencia de accidentes, decide sobre

cuáles datos crudos procesar, y transforma eso en decisiones, en etapas alineadas a los procedimientos de norma ISO 45001:2018, que establece necesidad de un ciclo de mejora continua basado dentro de la identificación de peligros, la planificación de acciones y la verificación de resultados (1).

Módulo 1 – Captura

La primera fase se orienta a la captura de información mediante sensores conectados al IoT, dispositivos portátiles y sistemas de visión por máquina. En un entorno de construcción, tales dispositivos captarían variables ambientales (ruido, polvo, vibración, gas tóxico) y métricas fisiológicas (frecuencia cardíaca, fatiga), y rastrearían y registrarían comportamientos utilizando CCTV y drones (3). Por ejemplo, a un trabajador expuesto a altas temperaturas se le puede monitorizar en tiempo real utilizando un dispositivo portátil que envía alertas antes de que el trabajador alcance el umbral de un golpe de calor.

En captura fisiológica, los wearables han probado utilidad para vigilar estrés térmico, fatiga y carga postural en campo. En un estudio de Safety Science, Shakerian y col. (15) integraron temperatura cutánea, frecuencia cardíaca y actividad electrodermal para estimar el riesgo de golpe de calor en trabajadores, demostrando viabilidad de alertas personalizadas en obra. De forma complementaria, la revisión de Automation in Construction sobre tecnologías de sensado vestible reporta aplicaciones consistentes para fatiga, sobrecarga musculoesquelética y prevención de caídas, e identifica desafíos prácticos como artefactos de señal y cumplimiento de uso. A nivel organizacional, los estudios de adopción subrayan que la aceptación del trabajador mejora cuando hay retroalimentación comprensible, reglas claras de privacidad y beneficios visibles

(16). En suma, la captura con wearables proporciona señales de alta granularidad que, combinadas con visión por computador e IoT ambiental, alimentan modelos multimodales con mejor poder predictivo y mayor cobertura del sitio.

Módulo 2 – Análisis

Se aplican algoritmos propios del aprendizaje automático junto con metodologías de aprendizaje profundo para procesar datos recopilados para reconocer nanofibras con riesgos. En contraste con los enfoques convencionales, sustentados en inspecciones realizadas de forma periódica, la IA puede procesar simultáneamente miles de variables para reconocer patrones que permanecen inobservable para los análisis humanos (2). En análisis visual, los enfoques con YOLOv8 y variantes multitarea han mostrado precisión elevada para detectar casco, arnés, posturas y proximidad peligrosa en tiempo real, integrando detección, segmentación y pose en un marco único; en escenarios de validación realistas, se han comunicado métricas mAP altas y mejora del seguimiento continuo frente a métodos de una sola tarea (17). Pero, dos fuentes comunes de error son la ocultación parcial y la variación del fondo, que inducen deriva; trabajos recientes proponen adaptación semántica y atenciones jerárquicas para estabilizar el rendimiento entre obras (13). En paralelo, plataformas con minimización de alarmas y umbralización dinámica han logrado reducir falsos positivos manteniendo sensibilidad, aspecto crucial para evitar fatiga de alarmas del personal de seguridad (18). Estos avances sugieren que la combinación de arquitecturas robustas, aprendizaje continuo y calibración bayesiana de la probabilidad de riesgo puede sostener el desempeño del sistema cuando cambian las condiciones de obra. En la práctica, esto significa que un sistema puede alertar que, por ejemplo, la fatiga, trabajar con EPP y niveles de ruido

elevados pueden llevar a una tasa de accidentes un 70% mayor en un sitio de construcción.

Para maximizar utilidad operativa, se recomienda una arquitectura híbrida edge–cloud con fusión multimodal. La detección de EPP, conductas y proximidades (pipelines multitarea detección–segmentación–pose) se ejecuta en el borde para alertas en milisegundos, mientras la nube concentra aprendizaje continuo, recalibración de umbrales y trazabilidad. La fusión temprana de señales visuales con métricas de wearables eleva la sensibilidad ante eventos raros; la fusión tardía ajusta el balance precisión–recobrado por tarea y frente de trabajo. Para reducir fatiga de alarmas sin perder sensibilidad, use umbralización dinámica y plataformas de minimización de alarmas (18). La robustez entre obras exige vigilar deriva y cambio de dominio: medir drift con PSI, reentrenar periódicamente y emplear adaptación semántica para oclusiones, visibilidad y fondos cambiantes (19). Finalmente, la calibración probabilística y explicabilidad ayudan a priorizar riesgos de costo asimétrico y sostienen la aceptabilidad ante auditorías (19).

Módulo 3 – Decisión

Los hallazgos analizados en este caso se convierten en alertas y planes de acción. Este módulo tiene umbrales que están establecidos en la normativa y activa la automatización completa: desde notificaciones al responsable hasta el apagado automático de máquinas pesadas en caso de una amenaza inminente (5). Un caso ilustrativo sería la activación automática de un sistema de ventilación cuando se identifican niveles peligrosos de gas en un tunnel.

Para decisiones críticas, se recomienda umbralizar las alertas considerando no solo la probabilidad de evento sino el costo asimétrico del error (p. ej., una omisión es

más costosa que una falsa alarma en trabajo en altura). En entornos con múltiples sensores, la fusión temprana (feature-level) tiende a mejorar la recall de eventos raros, mientras que la fusión tardía (score-level) facilita el control operativo de los trade-offs de precisión/recobrado por tipo de tarea (9) (18). La incorporación de componentes explicables (saliency, reglas extraídas) facilita la trazabilidad de las decisiones y su defendibilidad frente a auditorías del SGSST, además de mejorar la aceptación de supervisores y trabajadores.

Módulo 4 – Actuación

Corresponde a la fase de intervención directa. Aquí la automatización y la robótica permiten la realización de actividades de alto riesgo como demoliciones, izajes o excavaciones profundas con baja o nula exposición humana al riesgo (20). En este nivel, los robots con IA son capaces de realizar trabajos con altísimo riesgo, el personal de trabajo realiza funciones de supervisión a la baja probabilidad de accidentes mortales.

Indicadores clave de desempeño (KPIs)

La eficacia de IA en mitigación y control en accidentes laborales tiene que ser evaluada con indicadores medibles que abarquen la eficiencia operativa y económica de las intervenciones y seguridad resultante. En industria de construcción, se ha hecho evidente que la integración de KPIs es necesaria para determinar el impacto real de tales tecnologías (21).

Tabla 1.

Indicadores KPI evaluables mediante IA

Dimensión	Indicadores propuestos
Seguridad	Tasa de Frecuencia (TF), Tasa de Gravedad (TG), <i>near miss</i> detectados, % de uso correcto de EPP, latencia de alerta, falsos positivos/negativos.
Eficiencia operativa	Tiempo de respuesta ante alertas, horas-hombre en riesgo evitadas, cumplimiento de protocolos de seguridad.

Económico	Costos de accidentes evitados, retorno sobre la inversión (ROI), variación en primas de seguros y sanciones regulatorias.
Calidad de modelo	Precisión, <i>recall</i> , F1-score, AUC/ROC, estabilidad entre obras, <i>drift</i> de datos.
Elaboración a partir de International Organization for Standardization y International Labour Organization (4) (1).	

Capacidades preventivas

La IA exhibe cuatro capacidades intersecadas que potencian prevención de accidentes laborales en construcción:

1. Predecir: Mediante el análisis predictivo, evalúa las probabilidades de cualquier ocurrencia en relación con el entorno circundante, las personas involucradas y la tecnología. Esto facilita la planificación de tareas críticas durante el momento y las condiciones más seguras e ideales (8).
2. Detectar: Identificar actos y condiciones inseguras, como la falta de un casco y el uso inadecuado de un arnés de seguridad, en tiempo real. Esta detección inmediata reduce la dependencia de inspecciones manuales y garantiza mayor cobertura (21).
3. Actuar/Automatizar: Implementa controles automáticos frente a riesgos inminentes, como interlocks en maquinaria pesada, paradas de emergencia o cierre de accesos, evitando que un error humano escale a accidente grave (22).
4. Aprender: transforma información textual no estructurada (reportes de accidentes, observaciones de supervisión, entrevistas post-incidente) en conocimiento accionable que retroalimenta el sistema de gestión (23)

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

a) Capacidad de Análisis Predictivo

Una de las características más destacadas de IA dentro de prevención de riesgos laborales es su capacidad de análisis predictivo. Esta característica permite examinar grandes volúmenes de información histórica sobre incidentes, accidentes laborales y condiciones de trabajo para identificar patrones que faciliten el establecimiento de medidas preventivas antes de que ocurran eventos no deseados (5). Por consiguiente, esta capacidad proporciona una ventaja considerable sobre los métodos convencionales de análisis de seguridad, que dependen principalmente del análisis retrospectivo y de evaluaciones cualitativas.

Los algoritmos de aprendizaje de máquina pueden mirar a la historia y a grandes volúmenes de datos para identificar patrones que ocurren cuando hay accidentes o incidentes en una obra. Esto hace que los sistemas puedan emitir advertencias sobre acontecimientos que se consideran de una alta peligrosidad y cuya naturaleza permite racionalizar decisiones preventivas (8). En otras palabras, estos modelos son capaces de capturar conjuntos finitos de elementos que han demostrado llevar a accidentes, incluso si tales conjuntos no son obvios para los analistas humanos porque son demasiado complicados o demasiado sutiles.

En el sector construcción, Taherpour et al. (24) encontraron que los modelos predictivos de IA pueden considerar la carga de trabajo, el ruido ambiental, la temperatura, la experiencia del trabajador y el estado del equipo, en relación, para activar señales de advertencia tempranas de escenarios de riesgo elevado. Dichos sistemas, en su uso adecuado, demostraron tener una precisión del 85-92% en la predicción de posibles accidentes. Así, este nivel de precisión permite a los gerentes

de seguridad asignar recursos de manera mucho más eficiente, enfocándose en medidas preventivas para los momentos y situaciones más problemáticos.

Los modelos de predicción con enfoque a un problema en tiempo real asocian riesgos con avanzar técnicas de redes neuronales artificiales, árboles de decisiones, o regresión múltiple. El crecimiento de estos modelos es óptimo, por la condición de datos acumulados, lo que desencadena un ciclo de retroalimentación positiva y mejora continua (25). Entonces, este resultado o esta intervención agrega una nueva capa de datos a este conjunto, que, en la siguiente iteración, puede ser utilizada para mejorar, por lo tanto, la eficiencia del sistema es mayor que su predecesor.

b) Monitoreo y Supervisión en Tiempo Real

El monitoreo y la supervisión de acciones y situaciones del lugar de trabajo en tiempo real es otro rasgo fundamental de sistemas IA en uso para prevención de accidentes en trabajo (22). Permite la identificación de comportamientos o acciones potencialmente peligrosas en el momento exacto de su ocurrencia y durante su ejecución; por lo tanto, este rasgo es extremadamente importante y representa una mejora sustancial con respecto a los sistemas de monitoreo clásicos, que se basan en intervalos de tiempo arbitrarios de observaciones manuales y pueden sufrir lagunas en el tiempo y el espacio.

Un ejemplo claro de esta aplicación es el uso de sensores inteligentes incorporados en dispositivos portátiles para rastrear en tiempo real a los empleados que están expuestos a sustancias nocivas. Los datos capturados de tales sensores se utilizan para evaluar las condiciones laborales de manera continua y en tiempo real, lo que ayuda a garantizar que los empleados no superen los límites de seguridad preestablecido (8). En esta situación, estos sensores actúan como centinelas

digitales de salud y seguridad de empleados, proporcionando alertas en tiempo real siempre que existe la posibilidad de comprometer la seguridad de los empleados.

Los sistemas de monitoreo en tiempo real también integran tecnologías de visión por computadora que pueden identificar automáticamente casos de subuso o ausencia del equipo de protección personal (EPP). Según Alkaissy et al. (21), estos sistemas pueden identificar con más del 90% de precisión casos de trabajadores que carecen de un casco de seguridad, ausencia de arnés en trabajos en altura, o posturas peligrosas al realizar tareas.

La combinación de IA e Internet de las Cosas (IoT) permite desarrollo de redes automatizadas para monitorear calidad del aire y niveles de ruido, vibración, temperatura, humedad e incluso la presencia de gases tóxicos a través de la integración de satélites y sensores terrestres. Los datos se procesan en tiempo real utilizando algoritmos de IA que pueden activar protocolos de emergencia de forma autónoma siempre que se señalen condiciones peligrosas (26). Por ello, esta integración crea un ecosistema inteligente de seguridad que proporciona una cobertura comprehensiva del sitio de construcción, detectando riesgos que podrían pasar desapercibidos para los sistemas de monitoreo tradicionales.

c) Automatización de Procesos Peligrosos

La automatización de flujos de trabajo peligrosos utilizando robótica inteligente es única en la investigación de IA en la seguridad laboral. Por ejemplo, los sistemas robóticos equipados con sensores avanzados de detección de postura pueden identificar posiciones peligrosas de los trabajadores y alertarlos proactivamente. Tener sistemas de IA en su lugar puede reducir drásticamente el número de incidentes y enfermedades ocupacionales a las que una persona es susceptible. La

automatización inteligente también es aplicable al control de motores pesados en industria de construcción. La IA pueden controlar grúas, excavadoras, y otros equipos pesados de manera autónoma o semi-autónoma, reduciendo el error humano y optimizando las operaciones en términos de seguridad y eficiencia (27). Es decir, estos sistemas pueden realizar operaciones complejas con mayor precisión y consistencia que los operadores humanos, especialmente en condiciones adversas o en situaciones que requieren movimientos extremadamente precisos para mantener la seguridad.

d) Procesamiento de Lenguaje Natural y Análisis de Documentos

El procesamiento del lenguaje natural (PLN) constituye una característica avanzada de los sistemas de IA que puede analizar de manera automatizada informes de accidentes o lesiones que ocurren en la construcción. Esta capacidad facilita la generación de análisis detallados de reportes provenientes de testimonios de accidentados, esto permite reconocer con mayor precisión las causas subyacentes y llevar a cabo la aplicación de acciones correctivas pertinentes para prevenir accidentes similares (23). Por consiguiente, esta característica permite transformar información textual no estructurada en insights accionables, aprovechando el conocimiento contenido en reportes, testimonios y documentos que tradicionalmente requerían análisis manual intensivo.

En análisis textual, se ha avanzado desde reglas simples hacia clustering semántico y modelos no supervisados para extraer factores sistémicos de reportes de accidentes (como AcciMap), lo cual permite mapear rutas de causalidad y proponer controles preventivos basados en evidencias (28). Asimismo, se reportan clasificaciones automáticas de narrativas de incidentes por severidad y tipo de

lesión, útiles para priorizar inspecciones y entrenamientos (29) (19). Estos métodos, cuando se integran con datos visuales y de sensores, pueden cerrar el bucle entre incidente, aprendizaje y mejora del proceso, generando bibliotecas vivas de lecciones aprendidas. Un requisito crítico para su adopción es la normalización terminológica (ontologías de tareas/actividades/riesgos) y la gestión de calidad del texto, dado que abreviaturas y registros heterogéneos degradan el rendimiento. En conjunto, el PLN permite pasar de la simple conteo de incidentes a inteligencia de riesgos que identifica patrones recurrentes, condiciones latentes y oportunidades de intervención temprana.

BENEFICIOS Y VENTAJAS COMPETITIVAS

a) Reducción de Accidentes y Costos Asociados

La implementación de sistemas IA en prevención de riesgos laborales ha demostrado reducciones significativas en las tasas de accidentes. Según investigaciones, los sistemas de IA pueden reducir las tasas de accidentes laborales entre un 35% y un 60% (30). Estas implementaciones de IA no solo representan mejoras en las estadísticas de construcción, sino que también mejoran directamente calidad de vida de trabajadores y sostenibilidad de operaciones de empresas de construcción.

Los ahorros de costos relacionados con accidentes incluyen la reducción de gastos médicos, la disminución de días perdidos debido a lesiones, primas de seguros más bajas y la evitación de multas regulatorias. El retorno de inversión de estos típicamente se materializa dentro de 18 a 36 meses después de la implementación (31). Así, el rápido ROI hace que la justificación de la inversión para la adopción de sistemas de IA sea convincente incluso para empresas con pocos recursos. Esto

es especialmente cierto al considerar los beneficios a largo plazo para la reputación corporativa y la retención de talento.

DESAFÍOS Y LIMITACIONES ACTUALES

a) Desafíos Técnicos

Teniendo en cuenta los actuales desafíos y limitaciones de sistemas de IA para Prevención de Riesgos Laborales en construcción, está claro que, a pesar de las impresionantes capacidades de las aplicaciones recientes de IA, todavía existen importantes barreras para su integración sin problemas en la gestión de la seguridad (32).

Estos incluyen la necesidad urgente de conjuntos de datos completos y de alta calidad para entrenar un modelo robusto, junto con la invención de algoritmos de modelos sofisticados que puedan navegar con precisión a través de la volatilidad dinámica y las complejidades de los entornos de los sitios de construcción con variaciones en la iluminación, obstáculos y condiciones climáticas impredecibles. Los principales desafíos incluyen la integración y gestión eficiente de datos textuales, audibles y visuales, donde la representación semántica de los resultados del modelo en el contexto de informes de incidentes o videos de un sitio es el déficit principal, la capacidad de detectar objetos ocultos en análisis visuales que dificulta la identificación proactiva de peligros, y el subdesarrollo de aplicaciones basadas en audio para el monitoreo del medio ambiente y la maquinaria (32).

En gobernanza y adopción, la implantación debe ir acompañada de políticas de privacidad y resguardo de datos (propósito específico, minimización y retención limitada), pruebas de sesgo por subgrupos y canales de reclamación, con comunicación transparente (33) (34). La aceptación mejora cuando el trabajador

recibe retroalimentación comprensible y beneficios claros del monitoreo, algo crítico con wearables (16). Operativamente, establezca metas y auditorías mensuales alineadas al PDCA: latencia extremo-a-extremo, tasa de falsas alarmas por frente, estabilidad entre obras ($\Delta F1$) y razón alerts-to-action (17) (18). Para tareas críticas, defina umbrales con costo asimétrico del error y componentes explicables para trazabilidad (9) (18). Finalmente, integre estos controles con el gemelo digital, alimentando la simulación 4D/5D y la planificación colaborativa, con registro auditable de decisiones (35). Así, la organización transita de inspecciones retrospectivas a aprendizaje continuo basado en datos, manteniendo legitimidad social y eficacia preventiva (9).

Aunque Modelos de Lenguaje con grandes parámetros (LLM) prometen avances en interpretación de datos textuales para evaluar los riesgos y los protocolos de seguridad a implementar, su adopción limitada debido a la ausencia de puntos de datos relevantes del sector de la construcción resalta la brecha en la integración multimodal. Todas estas limitaciones no solo socavan la fiabilidad en tiempo real de los sistemas de IA, sino que también requieren un enfoque prudente en el despliegue de los sistemas de manera que se prevenga sesgos o falsos positivos que tienden a empeorar los riesgos de seguridad laboral. Esto resalta la necesidad de futuros trabajos que apunten a conjuntos de datos colaborativos, algoritmos adaptativos y validaciones en entornos del mundo real (32).

A los retos técnicos se suman dimensiones sociotécnicas claves: (i) privacidad y protección de datos (particularmente en audio e imagen), (ii) equidad y sesgo algorítmico (p. ej., detección diferencial por indumentaria o tono de piel), y (iii) fatiga de alertas y carga mental del personal. La literatura de salud ocupacional

advierte que el monitoreo continuo puede ser invasivo si no se gobierna con propósito legítimo, minimización de datos, temporalidad limitada y transparencia (33). En paralelo, revisiones metodológicas recomiendan implementar pruebas de sesgo (error desagregado por subgrupos, condiciones y áreas), evaluaciones de impacto antes del despliegue y canales de reclamación (37). Operativamente, se aconseja diseño centrado en el usuario para presentar alertas accionables (no criptogramas técnicos), con umbralización según riesgo y protocolos claros de respuesta. Estas prácticas no solo disminuyen la resistencia a la tecnología, sino que mejoran la efectividad real del sistema al favorecer la adopción y el uso consistente en obra.

Impacto psicosocial del monitoreo digital

El monitoreo digital con IA no solo modifica procesos técnicos: también reconfigura percepciones de vigilancia, autonomía y confianza. La aceptación mejora cuando el propósito se comunica sin ambigüedades (enfocado en seguridad y prevención, no en sanción), cuando existen reglas claras de tratamiento de datos y cuando la plataforma devuelve retroalimentación útil y accionable al personal (38,39). La experiencia recogida en el propio documento confirma que el valor preventivo surge cuando la organización gobierna el ciclo alerta → verificación → acción con trazabilidad e indicadores, y no simplemente cuando “hay más datos” o “más detecciones” (40). Esa gobernanza incluye metas, roles, tiempos de respuesta (SLA) y un comité/subcomité activo que cierre el bucle con evidencia, tal como exigen los dispositivos de gestión del SST en obra (41).

Para blindar la confianza sindical y evitar lecturas punitivas del sistema, el despliegue debe apoyarse en los mecanismos participativos formales y en una

documentación que permita auditar decisiones y resguardar derechos (42). En tu texto ya se delimita esa arquitectura de participación y trazabilidad; obligatoria para todos los actores de la cadena como condición para que cualquier tecnología sea legítima y verificable en obra (43).

Desde la salud psicosocial, dos riesgos operativos deben mitigarse: (i) la “fatiga de alertas”, que erosiona la motivación si no se filtra, verifica y responde con tiempos predefinidos; y (ii) la sensación de “caja negra”, que disminuye la agencia del trabajador. Las medidas que ya recoges —capacitación específica para interpretar alertas y gestionar falsos positivos, documentación previa en ATS/PETAR y actualización “viva” del IPERC— reducen ambos riesgos y preservan el clima de confianza (43,40).

Medidas mínimas de protección psicosocial que deben figurar en el Plan de SST:

- Propósito único y explícito: prevención y aprendizaje.
- Trazabilidad de cada alerta con responsable y SLA de verificación/cierre.
- Participación del comité en reglas de uso, umbrales y revisión periódica.
- Transparencia operable: qué evidencia sustenta la alerta y cómo se valida en campo.
- Capacitación periódica orientada a interpretación de alertas, falsos positivos y protocolos de verificación. Estas condiciones ya están ancladas en tus apartados sobre gobernanza, capacitación y control operativo.

TENDENCIAS FUTURAS Y EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA

a) Integración con Tecnologías Emergentes

Las plataformas integradas IA–BIM–IoT–RA evolucionan hacia gemelos digitales operativos que sincronizan el avance 4D/5D con capas de seguridad en tiempo real. Revisiones recientes en Automation in Construction y Sustainability detallan cómo la telemetría de sensores y visión en obra se “inyecta” al gemelo para simular escenarios de riesgo, detectar colisiones y visualizar superposiciones de advertencia mediante RA sobre el modelo BIM, habilitando decisiones colaborativas basadas en la situación real (3). En paralelo, emergen pipelines con aprendizaje multimodal que integran texto video señales para enriquecer el contexto de las alertas y mejorar la priorización. Estas líneas, combinadas con blockchain para trazabilidad de registros de seguridad y auditoría, apuntan a sistemas de cero intervención en tareas de alto riesgo (izajes, excavaciones), donde el rol humano se concentra en supervisión y mejora continua. La consolidación de estas tendencias dependerá de datos compartibles, estándares abiertos y validaciones multiobra, con protocolos transparentes de gobernanza algorítmica.

En área de construcción, las tendencias futuras en prevención de riesgos parecen estar en una integración sinérgica de la IA con tecnologías emergentes como Internet de las Cosas (IoT), gemelos digitales, realidad aumentada (AR) y blockchain para gestionar la seguridad en la cuarta revolución industrial. Kristombu (40), señala que la integración de IA con sensores IoT transmite datos del sitio de construcción que, cuando se procesan mediante algoritmos de aprendizaje profundo, entre los que destacan las redes neuronales de tipo convolucional convolucionales, reconocen con suma precisión los peligros laborales, como el equipo mal colocado y otras condiciones situacionales inseguras. La integración con gemelos digitales y AR permite a los usuarios visualizar modelos BIM

aumentados con superposiciones de seguridad en tiempo real, mejorando toma de decisiones y colaboración en el sitio. Además, la tecnología blockchain garantiza la seguridad, integridad y trazabilidad de datos, fomentando así sistemas confiables y transparentes (3). Se espera que estas innovaciones evolucionen hacia plataformas completamente autónomas que monitoreen en tiempo real las obras de construcción para detectar riesgos y ejecutar instantáneamente medidas preventivas automatizadas para reducir drásticamente los incidentes laborales. El resultado será la promoción de condiciones de trabajo mucho más seguras en el área de la construcción.

En el marco de la incorporación de tecnologías emergentes, la implementación de sistemas informáticos basados en IA orientados a la predicción de riesgos en la industria de la construcción se proyecta hacia una articulación avanzada con la Realidad Aumentada (RA), el Modelado de Información de Edificios (BIM) y el Internet de las Cosas (IoT). Esta convergencia tecnológica posibilita una gestión preventiva más dinámica, con capacidad de supervisión en tiempo real y un enfoque proactivo sobre los entornos laborales. Tal sinergia hace posible la construcción de gemelos digitales dinámicos de los sitios de construcción donde los datos de sensores IoT de IA identifican de manera predictiva los riesgos ergonómicos, estructurales y ambientales, alertando visualmente a los usuarios con RA sobre los modelos BIM, reduciendo así la pérdida crítica de metadatos y mejorando la toma de decisiones colaborativa. Por ejemplo la integración de IA con BIM 4D y AR no solo optimiza la visualización a escala real del progreso de la obra, como se ha demostrado en aplicaciones para el monitoreo de puentes, sino que también incorpora algoritmos de visión por computadora para identificar exposiciones a

riesgos en tiempo real, reduciendo incidentes laborales en un 20-30% según proyecciones para 2025 (43).

Se espera una mayor adopción de plataformas híbridas que combinen IA con estas tecnologías para simular escenarios de riesgo, automatizar la detección de colisiones y promover la sostenibilidad, transformando la prevención de riesgos en un proceso inteligente y escalable que aborde las complejidades crecientes de proyectos de construcción (44).

1.2.1.2. Trabajo 2: Aplicabilidad en el Sector Construcción

OCEANÍA

a) Sistemas de Inteligencia Artificial en el Sector Construcción

La propuesta en Safety Science muestra IA aplicada al núcleo de seguridad en obra: transformar datos de accidentes/lesiones en señales orientan decisiones antes de ocurrir. Este enfoque desplaza énfasis desde investigación pos-accidente hacia modelos predictivos que identifican patrones de daño (p. ej., lesiones en extremidades, cabeza/cuello o tronco) y contextos donde ocurren. Aplicabilidad habilita tres palancas: priorización de controles (EPP, resguardos, barreras) en tareas mayor probabilidad/impacto; entrenamiento focalizado (p. ej., toolbox talks según perfil de riesgo) y rediseño del layout/flujo; y vinculación de la predicción con indicadores líderes (tiempo de respuesta, tasa de cierre de acciones, near-miss), para convertir analítica en reducción del riesgo. En Australia con bases administrativas la IA no solo clasifica; prioriza intervención y acorta latencia entre detección y acción, mecanismo clave para disminuir exposición. Para replicarla en contexto, bastan tres capas: datos de calidad, modelos supervisados con validación y un sistema de ejecución (responsables, SLA de respuesta, tablero con TRIFR/LTIFR). Así la IA deja de ser un “piloto” y pasa a ser parte del sistema de gestión (42).

En Automation in Construction, la IA opera como sistema nervioso de obra: visión por computador (detección de personas/EPP/zona), automatización de alertas y acople BIM/IoT para cerrar el ciclo “detección–decisión–acción”. La aplicabilidad es inmediata en riesgos de alta frecuencia/impacto: intrusiones en áreas restringidas, EPP faltante en actividades críticas, proximidad con equipos y detectar

situaciones precursoras (aglomeraciones, desplazamientos inseguros). El diferencial: la latencia; al bajar de minutos a segundos distancia riesgo–respuesta, reduce exposición, condición para impactar tasas de incidente. Marcos integran reglas semánticas/ontologías (qué es “peligroso”) con detecciones modelo, haciendo accionable la señal para supervisor HSE. Con cámaras y BIM, el entry cost baja: algoritmos se montan sobre infraestructura. Con KPIs líderes (tiempo-a-corrección) y cierre de hallazgos, puede sostener mejoras de cumplimiento y disminuir incidentes en actividades de alto riesgo.

Buildings destaca por soluciones de bajo costo que permiten a contratistas medianos adoptar IA sin inversiones desproporcionadas. Estrategia: usar cámaras y edge computing para visión por computador en tiempo real, enfocando el riesgo más gobernable: incumplimiento de EPP e identificación de escenas inseguras. La contribución radica en convertir detecciones en disciplina operativa; menos “ciencia de datos” de laboratorio y más sistemas que funcionan en obra con condiciones reales (iluminación cambiante, oclusiones, lluvia/polvo). Foco: reducción de falsas alarmas; al bajar el “ruido”, sube la confianza del supervisor y se estabiliza el comportamiento seguro (27). Es esencial para cambios duraderos en indicadores. En contextos con equipo HSE reducido, automatizar detección y filtrar alertas evita “fatiga de supervisión”, liberando tiempo para acciones correctivas de mayor valor. En suma, Buildings traduce el potencial de la IA en herramientas repetibles y asequibles que, al integrarse a protocolos existentes, contribuyen a reducir exposición y prevenir lesiones.

Electronics aporta un ángulo: IA en cámaras con procesamiento en el borde (edge) para reconocer incumplimientos de EPP en tiempo real. Su aplicabilidad es doble.

Primero, latencia nula: inferencia ocurre en cámara, permitiendo que el aviso llegue antes y que el supervisor corrija mientras el comportamiento inseguro ocurre. Segundo, coste/escala: al no depender de nubes/servidores intensivos, la solución es más asequible y replicable en frentes de obra. Este enfoque es útil en países con conectividad irregular, donde llevar video de alta resolución a la nube es inviable. edge-AI simplifica ciberseguridad y privacidad (datos sensibles saliendo del sitio). En lo operativo, la detección de no-casco/no-chaleco o de presencia en zonas críticas se convierte en alertas inmediatas y registros auditables, para retroalimentación y disciplina. Por estos motivos, Electronics ofrece una vía técnica y viable para que MIPYMES adopten IA con impacto tangible: mejor cumplimiento, menos exposición y respuesta más rápida. Es puente entre la promesa de la IA y la reducción de riesgos cuando presupuesto e infraestructura son el freno.

En Oceanía, la literatura subraya que los sistemas de visión por computador para cumplimiento de EPP son efectivos cuando combinan datos del sitio, validación cruzada entre obras y diseños capaces de operar en tiempo real con variaciones de iluminación, oclusiones y fondos. Una revisión en Artificial Intelligence Review identifica como desafíos la escasez de conjuntos de datos, la generalización insuficiente al cambiar de obra y costo computacional en el borde; y propone estrategias: curación de datos, aumento sintético, umbrales y métricas de evaluación más allá de la exactitud, incluyendo F1, calibración y estabilidad temporal. También destaca utilidad de reglas semánticas que traduzcan detecciones en acciones del SGSST (detener, reentrenar, reconfigurar método) y la conveniencia de monitorear deriva para activar reentrenamientos periódicos. Con estos

elementos, la señal del modelo se vuelve accionable, disminuye la fatiga de alarmas y sostienen mejoras en indicadores líderes tiempo a corrección, alerts-to-action, que anteceden reducciones medibles en LTIFR y TRIFR en programas de meses (47)

b) Casos Específicos

Un estudio entrena modelos de Machine Learning sobre base de lesiones en construcción de Australia para clasificar tipos de lesión (p. ej., extremidades, cabeza/cuello, tronco) e inferir ambientes y tareas con probabilidad de daño. Este resultado se traduce en micro decisiones: reforzar uso de casco/arnés en cuadrillas y turnos; densificar barreras en zonas con heat-map de riesgo; secuenciar actividades minimizar solapes peligrosos (equipos en movimiento + trabajo en altura); enfocar auditorías donde modelo predice severidad. Aunque el estudio no reporta serie “antes–después” de accidentes, su valor se evidencia en tres frentes: (i) reorienta recursos de seguridad donde impacto tendrán; (ii) reduce tiempos de detección/acción al anticipar riesgo; y (iii) mejora trazabilidad de la respuesta (acciones correctivas vinculadas a predicciones). En contextos donde tasa de incidentes es baja y persistente, reducción se observa primero en indicadores líderes (menos near-miss, mayor cumplimiento EPP, cierre rápido hallazgos) luego en LTIFR/TRIFR. El artículo demuestra que con datos administrativos es posible construir modelos para terreno (42).

Un ejemplo describe un marco de detección automática de cumplimiento EPP en entornos industriales y de construcción. El sistema, entrenado para reconocer casco/chaleco y distinguir incumplimientos, opera en tiempo real y genera alertas al responsable de seguridad, habilitando intervenciones correctivas antes de que la exposición escale a incidente. En resultados se priorizan métricas de desempeño

(exactitud, precisión / recall), robustez ante oclusiones/iluminación y evidencia de operatividad. Aunque no siempre se reporta “antes–después”, se observa sostén del cumplimiento y disminución de dependencias de inspecciones manuales; ambos reducen oportunidades de lesiones por no uso de EPP y accesos no autorizados. Para medir “reducción real” basta vincular el sistema con indicadores líderes/rezagados y mantener trazabilidad alerta → acción → resultado.

Zaidi et al. presentan un algoritmo temporal que agrega información entre fotogramas para distinguir escenas inseguras, reduciendo falsas alarmas frente a clasificadores. En pruebas en tiempo real sobre videos de obra, se reportan precisión y F1 altas y disminución de 2,03% en falsas alarmas, mejorando la fiabilidad sistema y aceptación por supervisores. Esto importa para reducción de riesgos, la fatiga de alarmas erosiona el cumplimiento; cuando el sistema avisa menos “en falso”, el equipo HSE atiende lo importante y llega a la corrección. Esto se traduce en menos exposiciones repetidas (tránsito por zonas de izaje, permanencia sin arnés en borde). Aunque no se reporta serie “antes–después” de accidentes, se documenta el mecanismo intermedio (mejor señal → mejor respuesta) que, en programas de meses, se refleja en más cumplimiento y menos near-miss, antecedente de menores tasas LTIFR/TRIFR. (20).

Un despliegue (caso de cámara edge con IA) ejecuta el modelo dentro del dispositivo para detectar en tiempo real incumplimientos de casco/chaleco, enviando alertas sin depender de nube. En práctica, esto desplaza el control desde rondas hacia un monitoreo continuo, con pruebas (imágenes/clips) que facilitan retroalimentación y entrenamiento correctivo. El cambio de arquitectura (edge en cámara) reduce latencia y costos de infraestructura, mejora resiliencia (menos

puntos de falla) y viabiliza escala en empresas medianas. ¿Cómo se traduce? En dos pasos: (i) cumplimiento sostenido (saberse observados y recibir avisos) y (ii) tiempos de corrección bajos, recortando ventanas de exposición a golpes, caídas y atrapamientos. Foco no siempre incluye series “antes–después”; mecanismo causal está: alerta-acción con trazabilidad, condición para observar mejoras en near-miss y tasas de accidente.

c) Aporte al Estudio

Estudio con registros administrativos de lesiones en construcción (Australia). Construyen modelos de machine learning para clasificar tipos de lesión; se entrenan y validan con métricas (precisión, F1, AUC/ROC) y validación cruzada que controla sobreajuste. Metodología convierte datos históricos en predicciones que alimentan decisiones preventivas. Safety Science muestra la IA aplicable al integrarse al ciclo de gestión: predecir → priorizar → ejecutar → medir. Contribución clave no es exactitud del modelo, sino cómo la salida se vincula a acciones (EPP, planeamiento, supervisión) y evidencia la reducción. Recomendación: instalar tablero con indicadores líderes (tiempo de corrección, tasa de cierre, frecuencia de hallazgos por frente); indicadores rezagados (TRIFR/LTIFR, días perdidos); y cohortes (cuadrilla/proceso/turno). Al inyectar la predicción en tablero se demuestra causalidad operativa: cada alerta/predicción vinculada a acción y resultado. Esta trazabilidad convierte una “buena métrica algorítmica” en evidencia de reducción del riesgo. La metodología es replicable en Sudamérica y África si se garantiza calidad de datos y SLA de respuesta: sin respuesta, la IA no reduce nada. La IA es prevención cuando gobierna decisiones y cuando el impacto se mide. (42).

Framework de visión por computador para monitoreo de EPP: diseño del detector, conjunto de datos y evaluación con métricas estándar (precisión, recall, F1), reportando desempeño en escenarios complejos y consideraciones de despliegue en tiempo real (Elsevier, 2025). Tu OE2 exige aplicabilidad y prueba de impacto. Automation in Construction facilita lo primero—detección, alertas, integración con procesos—y abre camino a lo segundo si desde el inicio se diseña la evaluación: línea base de incumplimiento EPP (por frente/turno); activar el sistema con SLA de respuesta; medir tiempo-a-corrección, tasa de hallazgos y cumplimiento EPP; seguir LTIFR/TRIFR por actividad. Con esa arquitectura, el paso de métrica algorítmica reducción de riesgo queda documentado. La combinación de ontologías/reglas con CV evita “alertas ciegas”: cada detección se traduce en regla de seguridad. Su encaje con BIM/IoT permite escalar sin rehacer infraestructura.

Desarrollo de un sistema de monitoreo por visión con análisis temporal para clasificar escenas seguras/inseguras. Evaluación en tiempo real con métricas (precisión, F1) y reporte de reducción de falsas alarmas en pruebas controladas con videos de obra (20). Para el OE2, Buildings aporta implementabilidad: correr IA en el borde, reciclar cámaras existentes, bajar falsas alarmas y normar la respuesta.

Ruta de evidencia: línea base de cumplimiento EPP y tasa de alertas (verdaderas/falsas); despliegue con umbrales/tiempos acordados; seguimiento de tiempo-a-corrección y tasa de cierre; evaluar near-miss y, a mediano plazo, LTIFR/TRIFR. La reducción de falsas alarmas funciona como palanca de cambio cultural (menos ruido, más acción), y se traduce en menos exposición. Prioriza frentes con alto tráfico y tareas críticas; vincula la salida del sistema a reglamento

interno (qué alerta exige detener, re-entrenar o rediseñar método). Con este encuadre, puedes demostrar aplicabilidad, implementación y resultado (20).

El modelo de visión se ejecuta en la cámara (sin nube), detectando no-casco/no-chaleco. Implementación, entrenamiento y pruebas; comparan optimizaciones para despliegue, priorizando baja latencia y robustez como iPRO, 2024. Este enfoque demuestra si desde inicio conectas la salida de cámara a un protocolo de respuesta con SLA y a un tablero de indicadores. 1) definir reglas (“no-casco en zona X → detener y corregir”); 2) registrar tiempo-a-corrección y reincidencia por cuadrilla/contratista; 3) medir cumplimiento EPP semanal; 4) monitorear near-miss y LTIFR/TRIFR trimestral; 5) auditorías cruzadas (A vs. B). IA edge no solo “detecta”: cambia comportamiento y documenta impacto. En contextos con conectividad limitada o sensibilidad de datos, arquitectura en-cámara reduce fricciones (privacidad, ciberseguridad, costo), aumentando probabilidad de adopción. Electronics da la pieza faltante para “aterrizar” la IA en vigilancia de EPP con bajo costo, alta velocidad y prueba trazable de efecto sobre exposición al riesgo.

1. SUDAMÉRICA

a) Sistemas de Inteligencia Artificial en el Sector Construcción

Aunque en gestión, JME-ASCE ofrece casos de adopción que muestran insertar tecnología en proceso de seguridad, el caso chileno de UAV integrados a planificación/monitoreo. La aplicabilidad está en reconfigurar el flujo: más cobertura (menos puntos ciegos), evidencia para decisiones y trazabilidad de hallazgos. La pieza para la IA es que los contenidos (ortomosaicos, video) se vuelven datos estructurados aptos para CV o listas de chequeo. En obras verticales, los UAV democratizan la visión de zonas de borde/izaje, donde la exposición crece

por complejidad. Esta integración facilita rondas y priorización: el supervisor invierte tiempo donde el riesgo es mayor. Como guía de gestión, la revista muestra pasos (adopción, roles, flujos, gobernanza) replicables en Lima o São Paulo. Al empalmar UAV con CV (detección de intrusiones/EPP), circuito queda completo: detección ampliada + alerta + acción, condición para bajar incidentes. (44).

b) Casos Específicos

El estudio de Martínez et al. detalla pasos operativos para acoplar UAV a la planificación/monitoreo de seguridad en un rascacielos con gestores HSE. El resultado no es un “número de accidentes” menor, sino una forma de trabajar: mapeo proceso de seguridad; incorporación de contenido aéreo para ampliar cobertura y detectar condiciones inseguras; redefinición de responsables y tiempos; generación de evidencia para retroalimentación y cierres. El impacto se traduce en menos puntos ciegos, detección temprana (barandas incompletas, materiales en borde), priorización de rondas donde el riesgo era mayor. No se presenta una serie “antes–después”, hay trazabilidad de decisiones y mejora cobertura, predictores de reducción; se miden near-miss y cumplimiento EPP a meses. Caso transferible: formaliza protocolo de respuesta (qué alerta exige qué acción), registra tiempo-a-corrección, articula UAV-CV para automatizar detecciones (bordes sin protección, intrusión zona izaje) (44).

c) Aporte al Estudio

Estudio de caso en un edificio en altura (Chile). Se analizan pasos de adopción para integrar UAV y contenidos visuales en la planificación y monitoreo de seguridad, documentando flujos, roles y salidas para la toma de decisiones (44).

Este caso entrega la primera y prepara la segunda. Para demostrar reducción, complementa el despliegue UAV con: chequeos automatizados (CV para EPP/bordes); SLA por tipo de hallazgo (crítico/alto/medio); tablero con tiempo-a-corrección, tasa de cierre y reincidencia por frente/contratista; seguimiento de near-miss específicos (caídas de altura, golpes por objeto). A 3–6 meses, deberías observar menos hallazgos críticos y menor exposición repetida, antesala de baja en LTIFR/TRIFR. Además, el andamiaje de gestión del artículo se adapta bien a MIPYMES que necesitan claridad procedimental para sostener la tecnología (44).

ÁFRICA

a) Sistemas de Inteligencia Artificial en el Sector Construcción

En *Frontiers in Built Environment*, la IA se entiende como tecnología socio-técnica: su impacto en seguridad depende de organización, procesos y cultura. Estudios sobre adopción de IA en construcción (Sudáfrica) identifican factores organizacionales críticos (liderazgo, competencias, recursos, gobernanza de datos, integración) sin los cuales la IA no reduce riesgos. La aplicabilidad consiste en alinear tres planos: Tecnología (CV/ML), Proceso (quién recibe y en cuánto tiempo) y Personas (roles, habilidades, incentivos). Si falta uno, el ciclo se rompe. En países con brechas capacidad, revista propone mapear madurez digital, evaluar barreras (financiamiento, interoperabilidad) y diseñar plan de implementación que asegure que la salida de IA dispare acciones y mida su efecto. No basta con “tener un modelo”; hay que insertarlo en sistema de gestión con indicadores líderes (tiempo-a-corrección, cierres) y rezagados (tasas de lesión) (45).

b) Casos Específicos

El estudio de Tjebane et al. no es una intervención de CV en obra; es el manual de instalación para que las intervenciones funcionen y se midan. Con encuesta a profesionales y análisis factorial, identifica palancas (p. ej., liderazgo, cultura de datos, capacitación, alineación estratégica) que habilitan proyectos de IA en seguridad. ¿Cómo se traduce? Estas palancas predicen capacidad de respuesta (quién atiende y en cuánto) y permanencia (que el sistema no se apague a los dos meses). Al activarlas, programas de detección de EPP/áreas críticas logran más cierres efectivos, menos reincidencia y mejor cumplimiento, lo cual—con ventana temporal—se refleja en baja de near-miss y, después, de tasas de lesión. El artículo ofrece variables concretas para el plan de cambio: competencias del equipo HSE, políticas de datos (quién accede/usa), incentivos y mecanismos de auditoría. Sin una serie “antes–después”, entrega ingredientes causales que, cuando están, permiten que la IA reduzca riesgo; cuando no, la IA queda en piloto. (45).

c) Aporte al Estudio

Encuesta cuantitativa a 169 profesionales de la construcción (muestreo en “bola de nieve”). Análisis factorial exploratorio para aislar factores organizacionales que facilitan la adopción de IA (liderazgo, competencias, recursos, procesos) (45).

Sin liderazgo, competencias y gobernanza de datos, la IA no escala ni se mide. Recomendación: antes de desplegar CV/edge en obra, ejecuta un checklist de adopción: roles y SLA definidos; política de datos (privacidad, retención, acceso); formación del equipo (interpretar alertas, evidencias, acciones); presupuesto recurrente (no solo CAPEX); tablero con líderes/rezagados; auditoría mensual de reincidencia por frente/contratista. Con esto, conviertes la tecnología en capacidad institucional y aseguras que la reducción de riesgo sea demostrable (45).

AMÉRICA DEL NORTE

a) Sistemas de Inteligencia Artificial en el Sector Construcción

Norteamérica se ha posicionado a la vanguardia en la incorporación de inteligencia artificial (IA) a la construcción, combinando normas sólidas y una cultura de innovación que reduce fricciones a la adopción. En Estados Unidos, el andamiaje regulatorio de OSHA ha ido abriendo espacio a tecnologías emergentes dentro de los protocolos de seguridad, mientras que Canadá aplica un enfoque más flexible y experimental, útil para aprender en contextos controlados antes de escalar (46). En este ecosistema, dominan las soluciones de visión por computador, procesamiento de lenguaje natural y analítica predictiva, con fuerte énfasis en interoperabilidad para que las distintas plataformas “conversen” entre sí sin pérdida de trazabilidad. La infraestructura digital de la región—5G disponible y amplia computación en la nube—facilita la inferencia en tiempo real y el monitoreo continuo en obra. México, por su estrecha interacción con los mercados del norte, viene incorporando estas herramientas en proyectos de gran escala, donde la transferencia tecnológica ocurre de manera natural y con estándares compartidos (47). Este cruce entre marco regulatorio, capacidad tecnológica y economía de la innovación ha generado un terreno fértil para diseñar, validar y ajustar soluciones de IA orientadas a riesgos laborales. Además, las organizaciones han institucionalizado protocolos de validación que exigen evidencia de efectividad antes del despliegue masivo, así como métricas estandarizadas para evaluar impacto. Implementar de forma gradual y con acompañamiento al trabajador resultó clave para sostener cambios de comportamiento y evitar resistencias (48).

b) Casos Específicos

Estados Unidos. La adopción combinada de análisis de texto, visión y audio reconfiguró los protocolos de seguridad en obra. Sawhney et al. reportan reducciones del 34% en incidentes por caídas al usar detección automática de conductas de riesgo en tiempo real. Sistemas de reconocimiento de voz para alertas manos libres redujeron en 28% los accidentes vinculados a fallas de comunicación entre equipos. En un proyecto de infraestructura en Texas, la sinergia IoT + machine learning permitió anticipar y prevenir el 87% de los incidentes potenciales con maquinaria pesada, fijando un nuevo estándar de prevención proactiva (46).

Canadá. Con una hoja de ruta basada en factores críticos de éxito, Waqar et al. hallan mejoras del 45% en la efectividad de protocolos de seguridad en obras de Ontario y Alberta. Entre los hitos, monitoreo ambiental automatizado que disminuyó en 52% la exposición a sustancias peligrosas gracias a detección temprana y activación automática de evacuaciones. En Vancouver, integrar IA con gestión de calidad del aire mantuvo 96% de las mediciones dentro de límites de Health Canada durante 18 meses de construcción (48).

México. Con IA generativa aplicada a identificación y análisis de riesgos, Zhou et al. reportan 41% de mejora en precisión frente a métodos tradicionales en proyectos de Ciudad de México y Guadalajara. El estudio, no obstante, advierte limitaciones de contexto y normativa local, por lo que la adaptación de modelos es obligatoria. En un proyecto de vivienda social en Monterrey, combinar IA con experticia local redujo en 63% el tiempo de análisis manteniendo la precisión de evaluaciones realizadas por especialistas (47).

c) Aporte al Estudio

La evidencia norteamericana se apoya en diseños robustos que combinan revisiones sistemáticas, análisis bibliométricos y validaciones en campo. Sawhney et al. emplean un enfoque multimodal—texto, visión y audio—para evaluar impactos diferenciados en reducción de riesgos (46). Waqar et al. utilizan análisis factorial confirmatorio y ecuaciones estructurales para aislar los drivers que vuelven efectiva la IA en obra (48). Zhou et al. evalúan IA generativa con métricas de precisión, recall y F1-score, ofreciendo una mirada experimental sobre su utilidad real en identificación de riesgos. Este repertorio metodológico no solo demuestra aplicabilidad práctica, sino que ilumina oportunidades y límites de cada tecnología, aportando criterios comparables para decidir qué IA, cuándo y cómo en el sector construcción (47).

El caso norteamericano confirma que la IA reduce riesgos cuando se integra con procesos existentes, se mide con indicadores claros y se acompaña de formación y ajustes al contexto. La trilogía regulación favorable + infraestructura + cultura innovadora permite validar y escalar soluciones con resultados cuantificables, útiles como referencia para otras regiones que busquen impacto sostenido en seguridad laboral.

EUROPA

a) Sistemas de Inteligencia Artificial en el Sector Construcción

Europa ha optado por un despliegue altamente regulado y armonizado, en el que GDPR y las directivas sobre seguridad y salud obligan a que los sistemas de IA cumplan con transparencia, explicabilidad y protección de datos (49). Esta exigencia ética y legal convive con un ecosistema de I+D vigoroso (p. ej., Horizon

Europe), que financia proyectos de IA con criterios de responsabilidad y sostenibilidad desde su diseño.

La normalización liderada por CEN y CENELEC ha impulsado interoperabilidad entre países, abriendo un mercado común con economías de escala para tecnologías de seguridad. Francia destaca en gestión de riesgos con metodologías bibliométricas que mapean tendencias (50), mientras que el Reino Unido, aun fuera de la UE, mantiene estándares afines y ha producido meta-análisis rigurosos para ponderar riesgos/beneficios de la IA en obra. España, por su parte, experimenta con IA generativa en gestión de riesgos y combina bibliometría con evaluación práctica, apoyada por políticas que incentivan Industria 4.0 en obra pública (51). La cooperación transnacional ha permitido bases de datos compartidas de incidentes, esenciales para modelos predictivos sensibles a clima, cultura y regulación propios del continente.

b) Casos Específicos

Reino Unido. Smith y colaboradores. (2025) muestran los sistemas de IA en proyectos británicos lograron una reducción promedio del 31% en accidentes graves, con variaciones según tecnología y tipo de obra. En Londres, el monitoreo por visión de EPP alcanzó 94% de cumplimiento versus 67% con inspección manual. En transporte, la analítica predictiva anticipó riesgos con 83% de precisión, habilitando acciones preventivas frente a maquinaria pesada (49).

Francia. Dubois et al. identifican mediante bibliometría y revisión sistemática algoritmos y categorías de riesgo más efectivos localmente. En París y Lyon mejoró 38% la detección temprana de riesgos ambientales y ocupacionales gracias a ML sobre sensores en tiempo real. En Marsella, IA + gestión de calidad del aire

mantuvo 91% de mediciones de PM bajo norma. Además, PLN para reportes de incidentes elevó en 47% la identificación de patrones, afinando protocolos específicos para condiciones francesas (50).

España con IA generativa en análisis de riesgos, proyectos en Madrid y Barcelona mejoraron 42% la precisión frente a metodologías tradicionales. En vivienda social de Valencia, chatbots especializados redujeron 35% el tiempo de capacitación con comprensión equivalente a la formación presencial. El estudio advierte riesgos: sobredependencia tecnológica y necesidad de validación humana donde las particularidades culturales-regulatorias exigen juicio experto (51).

c) Aporte al Estudio

Europa aporta rigor comparativo y mapas conceptuales del campo. Smith et al. usan meta-análisis en red para comparar la eficacia relativa de distintas intervenciones de IA en contextos operativos diversos (49). Dubois et al. integran bibliometría con revisión sistemática, apoyándose en VOSviewer y R para detectar clústeres temáticos y lagunas de conocimiento (50). González et al. analizan beneficios y riesgos de la IA generativa con co-citación y co-palabras, aislando factores que condicionan el éxito real. Estas metodologías permiten jerarquizar tecnologías, discernir en qué condiciones funcionan mejor y proponer criterios basados en evidencia para seleccionar e implementar soluciones, respetando el marco ético y regulatorio europeo (51).

El modelo europeo demuestra que es posible innovar sin ceder en protección de datos ni transparencia algorítmica. Con resultados medibles en distintos países y tipos de obra, su experiencia sugiere que la eficacia de la IA crece cuando se contextualiza en normas, cultura y operación locales. La apuesta por investigación

continua, cooperación transnacional y regulación adaptativa sienta bases replicables para una implementación responsable de IA en construcción.

ASIA

a) Sistemas de Inteligencia Artificial en el Sector Construcción

Asia lidera en adopción e innovación de IA aplicada a construcción, con un enfoque pragmático y escalable que responde al ritmo del desarrollo urbano. China enmarca su despliegue dentro de una Estrategia Nacional de IA, con lineamientos específicos para construcción; Singapur exige—vía BCA—integrar Industria 4.0 en proyectos públicos (52). La región aprovecha big data de megaobras y infraestructura digital avanzada para inferencia en tiempo real.

Corea del Sur ha articulado ecosistemas sofisticados que integran IA, IoT y gemelos digitales, impulsados por programas como K-Smart Construction que financian tecnologías verificables en protocolos de seguridad (53). Singapur aplica una visión de ciclo de vida, llevando IA desde planificación hasta operación y mantenimiento, lo que ha influido prácticas en países vecinos. La diversidad económica y cultural del continente ha generado soluciones adaptadas al contexto: desde sistemas accesibles en economías emergentes hasta plataformas avanzadas en países desarrollados. Esta plasticidad favorece efectos de red: soluciones creadas para un mercado encuentran cabida en otros y habilita IA robusta para altas densidades de trabajadores y logística compleja propia de los grandes proyectos asiáticos.

b) Casos Específicos

China. Wang et al. reportan una reducción del 43% en incidentes en alta velocidad ferroviaria con ML sobre sensores distribuidos a lo largo de miles de kilómetros. En Shenzhen, visión + predicción previno el 89% de situaciones de riesgo en un

complejo de rascacielos usando redes entrenadas con >2 millones de imágenes. En Beijing, monitoreo ambiental automatizado mantuvo el 94% de mediciones bajo norma nacional, incluso en fases de máxima intensidad (52).

Plataformas integradas en Seúl y Busan mejoraron 51% la detección temprana de conductas de riesgo mediante sensores wearables y cámaras distribuidas (53). En una obra portuaria, IoT + IA + realidad aumentada redujo 37% los accidentes con maquinaria pesada, enviando alertas contextualizadas a los dispositivos de los operadores. Con gemelos digitales, la predicción de escenarios peligrosos llegó a 86% de precisión, habilitando ajustes proactivos de protocolos.

Singapur. Ng et al. muestran 48% de reducción en incidentes de trabajo en altura al combinar sensores de proximidad, visión y modelos predictivos. En Marina Bay, IA con BIM optimizó rutas de evacuación en tiempo real, bajando 62% los tiempos de respuesta frente a protocolos estáticos. En construcción sostenible, gestión energética inteligente mantuvo condiciones ambientales seguras y recortó 34% el consumo, uniendo seguridad y eficiencia (53).

c) Aporte al Estudio

El sello asiático es big data + despliegue a gran escala. Wang et al. integran revisión sistemática y casos masivos, con datos de miles de proyectos para extraer patrones de efectividad (52). Park y Kang comparan IA en construcción con otros sectores, identificando rasgos que determinan el éxito en entornos de obra (53). Ng et al. analizan ciclo de vida completo, siguiendo el impacto de IA desde diseño hasta operación, lo que permite medir efectos acumulativos. Este abanico metodológico aporta evidencia de escalabilidad, adaptabilidad cultural y eficacia operativa,

cruciales para implementar IA donde coexisten alta densidad poblacional, complejidad logística y velocidad de ejecución (53).

La experiencia asiática muestra que la IA rinde máximo impacto cuando se implementa de forma integrada y sistémica, combinando múltiples fuentes de datos y tecnologías en plataformas coherentes. Con resultados cuantificables en distintos países y tipologías de obra, confirma que invertir en infraestructura digital y capacitación técnica produce retornos en seguridad y eficiencia. Su diversidad interna ofrece pruebas de que la IA puede adaptarse a marcos regulatorios y culturales distintos, siempre que se diseñe y contextualice con precisión.

Tabla 2

País	IA / Técnica	Aportes	Ref.
Australia	Modelo supervisado (Safety Science): ML sobre registros administrativos	Clasificar tipos de lesión e inferir contextos de mayor riesgo para priorizar controles (EPP, barreras, secuenciación)	(42)
Australia	Machine Learning (ML) y Deep Learning (DL)	Detección de Daños en Tiempo Real: Permite el monitoreo continuo de la infraestructura. Integración de Datos de Alta Dimensión: Combina sensores, drones, IoT, y gemelos digitales para una evaluación integral.	(27)
Australia	Visión por Computadora (Computer Vision - CV), impulsada por algoritmos de Deep Learning (DL) (ej. modelos YOLO).	El sistema informático de IA actúa como un supervisor digital y continuo en el entorno de la construcción. Identifica automáticamente si los trabajadores están usando (o no) el Equipo de Protección Personal (EPP) obligatorio (cascos, arneses, chalecos, etc.). Proporciona datos continuos y cuantificables sobre la tasa de cumplimiento del EPP y permite que se envíen alertas inmediatas.	(47)

Chile	Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV o Drones)	El sistema informático utiliza los drones como un sensor remoto que digitaliza el entorno laboral. Permite inspeccionar áreas críticas y genera ortofotos y modelos 3D que sirven como evidencia objetiva para la verificación del cumplimiento de las medidas de protección colectiva y las condiciones de la obra.	(44)
Sudáfrica	Programa organizacional IA-SST (Tjebane et al.): factores habilitadores	Identifica los factores organizacionales que facilitan (o impiden) que una empresa de construcción use sistemas de IA para la SST (e.g., apoyo de la alta dirección, cultura de innovación, capacitación del personal).	(45)
Estados Unidos	Plataforma multimodal: texto + visión + audio	Reducir caídas y fallas de comunicación mediante detección de conductas de riesgo en tiempo real	(46)
Estados Unidos	IoT-ML para maquinaria pesada	Anticipar y prevenir incidentes potenciales con equipos	(30)
Canadá	IA ambiental en obra	Disminuir exposición a sustancias peligrosas y mantener calidad de aire en parámetros de referencia	(32)
México	IA generativa (Zhou et al.)	Identificar/analizar riesgos con mayor precisión y menor tiempo de evaluación	(47)
Reino Unido	CV para cumplimiento de EPP	Incrementar cumplimiento frente a inspección manual	(33)
Reino Unido	Analítica predictiva en maquinaria	Anticipar riesgos con alta precisión para acciones preventivas	(33)
Francia	ML ambiental + PLN de reportes	Detección temprana de riesgos ambientales/ocupacionales y extracción de patrones de incidentes	(50)
España	IA generativa + chatbots	Mejorar precisión de análisis y reducir tiempos de capacitación	(51)
China	ML en sensores distribuidos; CV + predicción	Reducir incidentes en ferrovías; prevenir riesgos en rascacielos; control ambiental automatizado	(52)
Corea del Sur	Plataforma integrada: wearables + cámaras; IoT + IA + AR; Gemelo digital	Detectar conductas de riesgo; reducir incidentes con maquinaria; predecir escenarios peligrosos	(37)

Singapur	Sensores de proximidad + CV + modelos predictivos; IA con BIM	Reducir incidentes en altura; optimizar rutas de evacuación y tiempos de respuesta	(53)
-----------------	---	--	------

Fuente: Elaboración propia.

1.3.1.3. Trabajo 3: Prevención de Riesgos

DECRETO SUPREMO N° 011-2019-TR

a) Ámbito de aplicación y obligaciones

El Decreto Supremo N° 011-2019-TR establece un marco integral para la gestión de seguridad y salud en obras de construcción, definiendo reglas mínimas, roles específicos e instrumentos fundamentales como el Plan de SST, protocolos de emergencia, sistemas de vigilancia, programas de capacitación, procedimientos de investigación e indicadores de desempeño. Su enfoque normativo articula sistemáticamente la prevención de riesgos, la asignación presupuestaria, el control operativo y la mejora continua, implementando estructuras organizacionales como comités bipartitos, subcomités, supervisores que garantizan la participación activa y la trazabilidad de las acciones preventivas. La norma establece obligaciones vinculantes para todos los actores de la cadena de ejecución contratista principal, contratistas, subcontratistas y terceros, bajo marco regulatorio unificado, eliminando zonas grises de responsabilidad, aspecto fundamental para la incorporación de tecnologías de inteligencia artificial. El artículo 1 establece su carácter obligatorio a nivel nacional y habilita que los registros y alertas generados por sistemas de IA respalden el cumplimiento documental, mientras que el artículo 3 amplía el alcance a modalidades formativas e independientes, exigiendo interoperabilidad de datos para que las decisiones algorítmicas se traduzcan en acciones verificables en obra. (55).

La evidencia sobre indicadores líderes encaja con el DS 011-2019-TR porque prioriza medir procesos que preceden al daño y permiten gobernar el ciclo IPERC—

ATS–PETAR–mejora continua. Para los artículos 1 y 3, supone registros interoperables por frente; para el artículo 20, actualizar el IPERC ante baja de EPP, alza de near-miss o desviaciones; y, para los artículos 55–56, condicionar el inicio de actividades hasta cumplir controles críticos. La literatura recomienda combinar métricas operativas (tiempo a corrección, tasa de cierre, walk-throughs, alerts-to-action) con métricas del modelo con IA (precisión, F1, calibración, deriva), revisión conforme al artículo 22. Este enfoque reduce sesgos de gobernar solo con tasas rezagadas (LTIFR/TRIFR), acorta la latencia entre detección y acción y mejora la trazabilidad del Plan de SST. En obras multiempresa, conviene un esquema mínimo de datos (actividad, riesgo, regla infringida, responsable, SLA), tablero y auditorías cruzadas. Cuando indicadores líderes se vinculan a responsables y plazos, la adherencia al ATS aumenta, el PETAR se emite con evidencias verificables y la reincidencia disminuye en semanas. (54).

En materia de gestión de riesgos, el artículo 20 exige la implementación de una Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos y Controles (IPERC) con metodología definida, alineada con la Ley N° 29783, de carácter dinámico y participativo. La incorporación de inteligencia artificial transforma este IPERC en un sistema "vivo" que integra detecciones en tiempo real de equipos de protección personal (EPP), identificación de riesgos en bordes y espacios confinados, y registro de incidentes potenciales (near-miss), manteniendo la jerarquía de controles establecida y generando trazabilidad de los cambios en umbrales o modelos predictivos. El artículo 22 garantiza la gobernanza técnica y social mediante Subcomités de Seguridad y Salud (para obras con 20 o más trabajadores) o Supervisores de Seguridad y Salud (para obras con menos de 20 trabajadores),

quienes evalúan parámetros críticos como precisión, latencia y frecuencia de falsas alarmas, además de resolver aspectos relacionados con privacidad y uso de imágenes. De esta manera se institucionaliza y hace auditable el ciclo completo de alerta→verificación→acción en campo, evitando decisiones opacas y fortaleciendo la cultura preventiva organizacional (55).

La síntesis de estudios sobre indicadores líderes identifica factores que determinan su efectividad y que coinciden con obligaciones del DS 011-2019-TR: dotación para seguridad, capacitación estructurada, involucramiento del propietario y registro sistemático. Trasladado a la norma, el artículo 22 exige gobierno con funciones y periodicidad; el 54 define contenidos y frecuencia de capacitación; el 55–56 obliga a elaborar ATS y emitir PETAR antes de tareas críticas; y los artículos 1 y 3 garantizan alcance e interoperabilidad documental. Para operar, cada indicador debe mapearse a una actividad verificable (inspecciones, toolbox talks, cierres) y a un responsable con SLA, de modo que el tablero muestre alerta→acción→resultado. La evidencia advierte que gobernar solo con tasas rezagadas enmascara problemas por subregistro; combinarlas con líderes permite correcciones tempranas y reduce la variabilidad. El uso de IA potencia este esquema al disminuir latencia, ampliar cobertura y proporcionar trazabilidad (timestamp, imagen, clip), pero su impacto depende de la capacidad institucional para responder. Se concluye que metas, roles y retroalimentación del Subcomité son condiciones necesarias para sostener mejoras y evitar recaídas (57).

En el ámbito de competencias y control operativo, el artículo 54 establece contenidos mínimos y periodicidad específica para los programas de capacitación en áreas críticas como trabajo en altura, excavaciones, espacios confinados,

operaciones de izaje, control de energías peligrosas, procedimientos de bloqueo y etiquetado (LOTO), y aspectos ergonómicos, requiriendo formadores debidamente competentes. La integración de inteligencia artificial incorpora componentes de entrenamiento específicos para interpretar alertas automatizadas, gestionar falsos positivos y aplicar protocolos de verificación en campo. El artículo 55° establece la obligatoriedad de realizar Análisis de Trabajo Seguro (ATS) participativo y documentado previo a cada actividad, articulado con el IPERC correspondiente; los sistemas de IA pueden verificar el uso correcto de EPP y condicionar el inicio de actividades hasta cumplir todos los requisitos, sin sustituir la documentación requerida ni su custodia. La vinculación con el artículo 56 referente a Permisos Escritos para Trabajos de Alto Riesgo (PETAR) asegura que capacitación, ATS y PETAR operen como un sistema integrado donde la inteligencia artificial potencia el cumplimiento normativo, en lugar de actuar al margen del marco reglamentario establecido (55).

Para que la capacitación prevista en el artículo 54 eleve el desempeño, conviene enlazarla a indicadores líderes y tareas verificables. La literatura propone combinar mediciones objetivas (uso de EPP, cumplimiento de walk-throughs, tiempos de respuesta) con mediciones conductuales (adhesión al ATS, comunicación de riesgos, autocorrección) y seguimiento de near-miss, de modo que los contenidos se ajusten con evidencia verificable y mensurable. En clave del DS 011-2019-TR, cada sesión debe incluir escenarios derivados de hallazgos, práctica de interpretación de alertas y protocolos para validar o descartar falsos positivos en campo. El registro interoperable de asistencia, evaluaciones y simulacros alimenta el tablero del Subcomité, artículo 22, que observa tendencias frente y turno y decide

refuerzos. Asimismo, los artículos 55–56 piden convertir indicadores en reglas: si el detector reporta no-casco en zona crítica, el ATS no se cierra y el PETAR no se emite hasta corrección verificada y documentada. Este encuadre reduce la latencia entre detección y acción, fortalece la trazabilidad ante inspección y mantiene actualizado el IPERC del artículo 20, preservando la jerarquía de controles (54).

Los estudios sobre indicadores líderes señalan cuatro palancas que incrementan su poder predictivo y operativo: registro, recursos dedicados, involucramiento del propietario y entrenamiento dirigido. En el DS 011-2019-TR, el artículo 22 asigna seguimiento, verificación y periodicidad; el 54 asegura que el entrenamiento sea pertinente; y los artículos 1 y 3 exigen reportes compatibles entre contratista principal, contratistas y subcontratistas. Para sitios multiempresa, un protocolo de interoperabilidad define campos mínimos (actividad, peligro, regla infringida, responsable, plazo), estandariza evidencias (foto, clip, firma) y habilita auditorías. El tablero debe integrar líderes y rezagados: cumplimiento de EPP, inspecciones, near-miss y tiempo a corrección junto con LTIFR/TRIFR, evitando decisiones basadas en tasas. Cuando la IA participa, la captura automatizada reduce latencia y aumenta cobertura, además de suministrar trazabilidad para comprobar que cada alerta generó una acción y un cierre. Mapear indicadores a responsables, metas y SLA, revisar desviaciones y realimentar capacitación estabiliza el comportamiento seguro, disminuye reincidencias y mejora el desempeño del sistema de gestión exigido por la norma, especialmente en frentes repetitivos y tareas de alto riesgo (57).

b) Contraste con la evidencia

Chile (América del Sur): Martínez y colaboradores documentan la integración de UAV + Visión por Computador para ampliar cobertura visual en bordes/izaje, verificar EPP y priorizar rondas HSE con SLA y tableros de tiempo-a-corrección y tasa de cierre. El aporte se alinea con el DS 011-2019-TR al proveer evidencia objetiva para el ATS/PETAR y para la mejora continua que exige el sistema de gestión; la limitación es que el caso no reporta aún serie “antes–después”, por lo que la reducción se infiere vía near-miss y cumplimiento sostenido del EPP en meses. En términos operativos, la cadena detección-alerta-acción reduce puntos ciegos y acelera correcciones, coherente con el énfasis del reglamento en procedimientos escritos, trazabilidad y roles definidos (prevencionista/supervisor). Para el contraste, el caso chileno muestra cómo la IA opera dentro del Plan de SST y permite medir impacto con indicadores exigidos por la norma (44).

Reino Unido (Europa): Smith y colaboradores, reportan en obras británicas una reducción promedio del 31% en accidentes graves con despliegues de IA; el monitoreo por visión elevó el cumplimiento de EPP a 94% frente a 67% manual, y la analítica predictiva alcanzó 83% de precisión en riesgos de maquinaria, habilitando acciones preventivas. El aporte para el DS 011-2019-TR es doble: (i) disponibilidad de métricas de desempeño que pueden mapearse a IF/IS/IA y al tablero mensual exigido; (ii) evidencia de que la detección automática cambia comportamiento cuando está enlazada a protocolos y capacitación. La limitación es la transferibilidad: requiere gobernanza de datos y validación humana, en línea con el rol del Subcomité/Supervisor y la actualización del IPERC. En síntesis, el caso

británico respalda que la IA mejora el cumplimiento operativo y facilita la medición que pide la norma peruana (49).

Australia (Oceanía): Alkaissy y colaboradores, sobre bases administrativas de lesiones en construcción, investigaciones en Safety Science construyen modelos supervisados (precisión, F1, AUC/ROC) para clasificar/pronosticar tipos de lesión y vincular la predicción con acciones (EPP, rediseño de layout, intensificación de supervisión). El aporte es convertir datos históricos en decisiones preventivas con indicadores líderes (tiempo-respuesta, cierres) y rezagados (TRIFR/LTIFR), cumpliendo el espíritu del DS 011-2019-TR sobre planificación, IPERC vivo y medición periódica. La limitación no es técnica sino organizacional: sin SLA de respuesta, comité activo y capacitación, la predicción no reduce exposición. El contraste muestra que la IA es prevención cuando gobierna el ciclo alerta→acción y existe trazabilidad de impacto, justamente lo que el reglamento peruano exige documentar en el Plan de SST, el ATS/PETAR y los indicadores (42).

c) Aportes y limitaciones de la inteligencia artificial

La IA potencia el sistema preventivo al alimentar un IPERC “vivo” con detecciones de campo y near-miss, permitiendo ajustar controles y priorizar frentes de riesgo con trazabilidad y soporte documental (DS 011-2019-TR, art. 20). A nivel operativo, verifica ATS y condiciona PETAR mediante evidencias (EPP, bloqueo/etiquetado, barreras), cerrando el ciclo alerta→acción con registros auditable (arts. 55–56). En la gestión del Plan de SST, la IA robustece mapas de riesgo, inspecciones, investigación, auditorías y mejora continua (art. 18), reforzando el compromiso de todo el personal con el sistema (art. 19) (55). Además,

su uso facilita la interoperabilidad multiempresa prevista por el ámbito de aplicación (art. 3) (55), estandarizando permisos, reportes y respuesta coordinada en obra. En síntesis, al integrarse a instrumentos legales (IPERC, ATS, PETAR, Plan), la IA demuestra cumplimiento y acelera la corrección de condiciones inseguras conforme al objeto y finalidad del reglamento.

La norma exige gobernanza organizacional: Comité/Subcomité o Supervisor por obra, sesiones y coordinación, sin lo cual las alertas no se traducen en decisiones válidas ni en mejora continua (arts. 21–22) (55). La capacitación periódica y competente es obligatoria; por tanto, la adopción de IA requiere formar al personal en interpretación de alertas, falsa alarma y protocolos de verificación (arts. 53–54). En trabajos de alto riesgo, el ATS debe elaborarse/firmarse y el PETAR autoriza la ejecución con requisitos explícitos; ningún sistema puede sustituir la documentación y custodia exigidas (arts. 55–56). Además, las normas técnicas aplican sólo si no se oponen al Reglamento (art. 4) y las definiciones delimitan roles/alcances, lo que acota automatizaciones “en caja negra” (art. 5) (55).

REGLAMENTO NACIONAL DE EDIFICACIONES (RNE) - NORMA G.050

a) Ámbito de aplicación y obligaciones

El Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) - Norma G.050 - Seguridad Durante la Construcción actúa como la concreción operativa de la prevención en obra, rigiendo todas las fases constructivas y obligando a coordinar bajo un lenguaje técnico unificado a empleadores principales, contratistas y subcontratistas. Su alcance trasciende las buenas prácticas al integrar referencias normativas específicas (SST, inspección del trabajo, normas técnicas peruanas) y establecer

roles claramente definidos —incluyendo el supervisor y prevencionista— para evitar que los riesgos se diluyan en la fragmentación característica de los proyectos constructivos. Su ámbito de aplicación articula las exigencias técnicas con la gestión participativa establecida en la Ley N° 29783 (liderazgo del empleador, constitución de comités o designación de supervisores por obra, mejora continua), asegurando que las decisiones adoptadas en el plano documental se verifiquen efectivamente en terreno con la debida trazabilidad. La Norma G.050 constituye, en esencia, el puente normativo entre la política preventiva y la práctica operativa cotidiana (58).

En el ámbito operativo, la Norma establece la obligación de organizar sistemáticamente el espacio de trabajo mediante la delimitación de zonas específicas de operación, almacenamiento y circulación, controlar las fuentes de energía e instalaciones eléctricas provisionales a través de personal competente, sistemas de protección diferencial y puesta a tierra adecuada, y garantizar accesos y vías debidamente segregadas y señalizadas. Adicionalmente, desarrolla especificaciones detalladas para andamios, excavaciones y operaciones de izaje, estableciendo los equipos de protección personal específicos que corresponden a cada frente de trabajo. Estos requerimientos se articulan coherentemente con los mandatos de la Ley N° 29783 relativos al deber del empleador de proveer condiciones seguras de trabajo, garantizar la participación y capacitación de los trabajadores, y aportar evidencia verificable de que lo planificado se ejecuta efectivamente. La Norma G.050 transforma las disposiciones legales generales en estándares específicos y verificables en obra: distribución segura del espacio (layout), control efectivo de energías, protección del tránsito y documentación

adecuada de permisos, logrando que la prevención sea objetivamente medible y auditable (58).

b) Contraste con la evidencia

México (Latam): Zhou y colaboradores muestran que la IA generativa acelera la identificación y el análisis de riesgos con niveles de precisión comparables a especialistas, siempre que exista validación experta y adaptación normativa. En clave G.050, esto permite anticipar peligros por frente y alimentar el Plan de Seguridad y Salud con descripciones operativas más rápidas (procedimientos, controles por actividad), así como priorizar accesos y vías según exposición real. El aporte es la reducción de tiempos para preparar ATS/medidas por layout y para actualizar matrices cuando cambian frentes, mejorando la oportunidad de la prevención. La limitación es clara: sin protocolos locales y entrenamiento, la ganancia técnica no se traduce en decisiones seguras ni verificables. Por ello, la IA generativa debe quedar anclada a roles G.050 (supervisor/prevencionista) y a formatos exigibles en obra (permisos, registros) (47).

Reino Unido (Europa): Smith et al. documentan monitoreo por visión con mejoras sustantivas en cumplimiento de EPP y reducción de incidentes; la analítica predictiva alcanza alta precisión en riesgos de maquinaria, habilitando acciones antes del daño. Trasladado a G.050, la detección automática resulta especialmente útil en andamios e izaje, tránsito peatonal y zonas colindantes, donde la norma exige segregación, señalización y supervisión competente. El valor agregado no es la cámara en sí, sino el ciclo alerta→acción gobernada por el supervisor/prevencionista, con evidencia y tiempos de respuesta medibles. La

limitación reside en la transferibilidad: requiere gobernanza de datos, validación humana y capacitación para evitar sobredependencia tecnológica. Aun así, el caso británico prueba que la IA puede convertir estándares G.050 en conductas sostenidas y auditablemente mejores (49).

Estados Unidos (América del Norte): La evidencia norteamericana muestra un enfoque multimodal (texto–visión–audio) e IoT+ML para reducir caídas y fallas de coordinación, integrando wearables, radios manos libres y sensores en equipos. En términos G.050, esto fortalece protocolos en trabajos en altura, accesos/vías y zonas de izaje, porque combina detección en tiempo real con mejoras de comunicación operativa y trazabilidad de correcciones. El aporte es doble: anticipación (near-miss convertidos en tareas) y consistencia (cierres verificados en tablero), justo lo que la norma busca al bajar la política a terreno (layout, energía, tránsito). La limitación es organizacional: si no hay SLA de respuesta, entrenamiento y liderazgo, la señal no cambia conducta. Por ello, la IA debe operar dentro del plan G.050 y bajo control del supervisor para que el impacto sea medible y sostenible (46).

c) Aportes y limitaciones de la inteligencia artificial

La IA actúa como “amplificador” del estándar técnico que exige la G.050 en obra: ayuda a ordenar zonas de operación, almacenamiento y circulación, y a priorizar controles donde el tránsito peatonal y las vías exigen segregación y señalización verificable. Esto convierte hallazgos en tareas y acelera la corrección, con trazabilidad útil para auditoría y mejora continua. Además, aporta evidencia objetiva para el control de instalaciones eléctricas provisionales (competencia del personal, protección diferencial, puesta a tierra) y para la verificación de EPP en

frentes críticos, fortaleciendo el rol del supervisor/prevencionista y la coordinación multiempresa. En síntesis, la IA permite que lo planificado en el layout y en los procedimientos por frente se ejecute con consistencia, y que esa ejecución quede documentada conforme al espíritu de la G.050 y la gestión participativa de la Ley 29783 (58).

La G.050 demanda competencia técnica, roles claros y verificación en terreno; por ello, ningún algoritmo sustituye al responsable ni a los requisitos de segregación, señalización, puesta a tierra, protección diferencial o zonificación por frentes. Si la organización no garantiza capacitación, gobierno de datos y protocolos de respuesta, la IA sólo acumula alertas y no cambia conducta. Además, la norma exige interoperar en entornos multiempresa: sin reglas comunes y custodia documental, la trazabilidad se diluye y la prevención pierde eficacia. En suma, la tecnología debe operar dentro de la G.050 y bajo el paraguas de la Ley 29783: procedimientos vigentes, registros disponibles y autoridad técnica presente en obra; de lo contrario, la promesa de precisión se queda en piloto y no en seguridad real (58).

REGLAMENTO NACIONAL DE EDIFICACIONES (RNE)

a) Ámbito de aplicación y obligaciones

Dentro del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), como Normas Complementarias, está la Norma G.010 sobre Consideraciones Básicas establece el objeto del RNE y define los criterios y requisitos mínimos para el diseño y ejecución de habilitaciones urbanas y edificaciones, constituyéndose como la norma técnica rectora nacional que organiza sistemáticamente los derechos y responsabilidades

del proceso edificatorio. Esta función normativa facilita que la evidencia generada por sistemas de inteligencia artificial —incluyendo identificación de riesgos, evaluación de accesos y análisis de distribución espacial— se integre efectivamente en decisiones verificables durante la ejecución de obra (59). La Norma G.020 sobre Principios Generales explicita los principios fundamentales que sustentan el RNE, particularmente el principio de seguridad de las personas, orientando el ciclo de vida del proyecto hacia la protección de la salud, integridad física y vida de los usuarios. Bajo este marco conceptual, la inteligencia artificial se configura como un medio de soporte técnico para el diseño seguro, la operación ordenada y la protección de accesos y rutas de evacuación, nunca como sustituto del deber legal de prevención establecido normativamente (60).

Además, la Norma G.030 sobre Derechos y Responsabilidades precisa las competencias y responsabilidades específicas de cada actor en el proceso edificatorio, normativa que fue reforzada mediante la Resolución Ministerial N° 341-2018-VIVIENDA que modificó el artículo 11°, consolidando la responsabilidad profesional cuando se incorporan herramientas tecnológicas como la inteligencia artificial. Esta precisión normativa resulta fundamental para definir aspectos como la validación de resultados algorítmicos y la autorización de medidas correctivas, eliminando las denominadas "zonas grises" de responsabilidad (accountability) (61). Por último, la Norma G.040 sobre Definiciones, actualizada mediante la Resolución Ministerial N° 029-2021-VIVIENDA, armoniza conceptos y actores del Título I del RNE, estableciendo un marco terminológico uniforme. La disponibilidad de definiciones estandarizadas resulta esencial para que los reportes, tableros de control y registros generados por sistemas de IA utilicen el mismo

lenguaje normativo, asegurando que la trazabilidad de hallazgos, permisos y controles sea comparable y auditable a nivel nacional (59).

b) Contraste con la evidencia

Francia (Europa): La experiencia francesa con machine learning ambiental en tiempo real y PLN para depurar reportes eleva la capacidad de control sobre partículas (PM) y condiciones críticas de seguridad. En el marco de las Norma G.010 “Consideraciones Básicas” y G.020 “Principios Generales”, esta evidencia refuerza el principio de seguridad de las personas y la trazabilidad técnica de decisiones; a la vez, se alinea con A.130 “Requisitos de Seguridad” (incendios/evacuación) al ofrecer alertas tempranas que se traducen en rutas de salida y simulacros mejor informados. El valor agregado es doble: datos continuos para ajustar el diseño operativo y un lenguaje común para reportes, que G.040 exige estandarizar. La limitación no es algorítmica sino de gobernanza: sin responsables definidos (G.030) y formatos exigibles, la analítica no se convierte en mejora verificable ni en cumplimiento auditable (50).

Australia (Oceanía): El análisis de patrones de lesión con modelos supervisados permite priorizar controles (barreras físicas, señalización, ordenamiento del tránsito peatonal) e informar la planificación de rutas y evacuación. Bajo G.010 y G.020, esta priorización traduce el principio preventivo en criterios operativos, como dónde ubicar salidas, cómo segregar flujos, qué refuerzos instalar primero. Además, proporciona insumos objetivos para que G.030 “Derechos y Responsabilidades” asigne con claridad quién dispone las medidas y quién verifica su cierre, mientras G.040 “Definiciones” asegura que tableros y

matrices empleen el mismo vocabulario técnico del RNE. La evidencia australiana muestra que la IA rinde cuando existe ciclo alerta→acción con responsables, tiempos de respuesta y registros; sin ese gobierno, la priorización no se refleja en A.130 (capacidad de evacuación y control del riesgo) (42).

México (LatAm): Zhou y colaboradores evidencian aceleración del análisis de riesgos con precisión comparable a especialistas, siempre que medie validación humana y adaptación local. Para las Normas Complementarias, esto aporta a A.120 “Accesibilidad Universal” al identificar barreras arquitectónicas y proponer ajustes de diseño/operación (rampas, anchos, señalética, rutas accesibles), y dialoga con G.010/G.020 al sostener el enfoque de seguridad centrado en la persona. Operativamente, permite actualizar rápido los expedientes y los procedimientos por frente, haciendo que G.030 determine con nitidez quién valida y G.040 estandarice cómo se registran hallazgos y correcciones. Su limitación es organizacional: sin entrenamiento y protocolos locales, los hallazgos no escalan a decisiones verificables, quedando fuera del estándar auditable del RNE. (47).

c) Aportes y limitaciones de la inteligencia artificial

La IA aporta capacidad de medición y verificación continua coherente con la función de la Norma G.010 “Consideraciones Básicas” como norma técnica rectora (criterios y requisitos mínimos para diseño/ejecución), habilitando que hallazgos y decisiones queden trazables y comparables en todo el país (59). Esto refuerza los principios de la Norma G.020 “Principios Generales” (seguridad de las personas, diseño y operación seguros) al convertir datos de campo en ajustes de layout, rutas y controles con evidencia objetiva (57). Asimismo, la estandarización de

responsabilidades de la Norma G.030 “Derechos y Responsabilidades” facilita asignar firmas técnicas y cierres de hallazgos cuando la IA dispara alertas (61); y la Norma G.040 “Definiciones” asegura un lenguaje común para reportes/tableros, mejorando la auditoría y la interoperabilidad documental entre actores del proceso edificatorio (59).

Las Normas Complementarias no delegan deberes indelegables: la IA no sustituye el juicio profesional ni las obligaciones que la Norma G.030 asigna a cada actor (responsabilidad por validar resultados y autorizar medidas) (61). Sin definiciones y alcances uniformes de la Norma G.040, los sistemas pueden generar salidas no comparables con el expediente técnico, debilitando el valor probatorio (62). Además, la Norma G.010 impone mínimos de diseño/ejecución que deben cumplirse aun cuando modelos sugieran alternativas, y los principios de la Norma G.020 obligan a privilegiar la seguridad humana frente a métricas algorítmicas (p. ej., ante incertidumbre o falsas alarmas) (59) (57). En suma, la IA solo agrega valor cuando opera dentro del marco técnico-documental del RNE y con gobierno profesional efectivo, evitando automatizaciones “caja negra” sin verificabilidad.

LEY N° 29783

a) Ámbito de aplicación y obligaciones

La Ley N° 29783 - Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo establece los principios rectores de la prevención, incluyendo la preeminencia del deber de proteger la vida y la salud, la gestión integral, y la información y capacitación, encuadrando el uso de tecnologías, donde se incluye la inteligencia artificial, como medios para cumplir dicho deber preventivo, nunca como sustitutos de las

obligaciones legales. El principio de prevención impone la adopción de condiciones y medios protectores para toda persona en el centro de labores; el principio de gestión integral exige integrar la SST a la gestión empresarial; y el principio de información y capacitación obliga a formar con enfoque preventivo (Título Preliminar, principios I, IV y V). La Ley establece normas mínimas que pueden ser superadas por estándares internos más exigentes, lo que habilita la incorporación de IA para elevar los niveles de control y evidencia, siempre con procedimientos establecidos y verificación humana (arts. 3 y 1) (60).

El Sistema de Gestión de SST que ordena la Ley demanda un enfoque sistémico (art. 17) y se rige por principios como el compromiso visible del empleador, la coherencia entre planificación y ejecución, y la mejora continua (art. 18). Este marco normativo resulta compatible con proyectos de IA que documenten metas, procesos y resultados, integrados al ciclo de gestión establecido. La participación de los trabajadores constituye un elemento indispensable que abarca consulta, información, capacitación, procesos electorales y funcionamiento del comité, incluyendo la identificación de peligros y elaboración del mapa de riesgos (art. 19). Por diseño normativo, la IA debe insertarse en este modelo de gobierno participativo, donde los comités y supervisores revisan el desempeño del sistema (precisión, latencia, falsas alarmas), autorizan cambios procedimentales y aseguran transparencia, conforme a lo establecido en la Ley (arts. 17–19) (60).

Para garantizar la eficacia del sistema, la Ley dispone la evaluación, supervisión e investigación periódica (arts. 40–44), estableciendo la obligación de medir resultados, identificar fallas, adoptar medidas preventivas y correctivas, investigar accidentes, incidentes y enfermedades ocupacionales, y realizar auditorías

independientes con participación de los trabajadores. Estos mandatos normativos obligan a que cualquier solución de IA cierre efectivamente el ciclo alerta → acción → verificación y demuestre impacto en el desempeño del sistema de gestión, no únicamente métricas algorítmicas. En materia de derechos y obligaciones, el empleador debe garantizar la SST, perfeccionar los niveles de protección, sostener el funcionamiento del comité y capacitar oportunamente, además de aplicar medidas de prevención que incluyen diseño de puestos de trabajo, implementación de controles, sustitución de riesgos y provisión de EPP cuando corresponda (arts. 48–50). En suma, la Ley proporciona el marco estructural necesario para gobernar la implementación de IA con criterios de evidencia, trazabilidad y mejora continua (60).

b) Contraste con la evidencia

Sudáfrica (África): Tjebane y colegas muestran que el impacto de la IA en seguridad es eminentemente socio-técnico: sin liderazgo visible, competencias, recursos y gobernanza de datos, las detecciones no se convierten en acciones ni en resultados sostenibles. Identifican palancas organizacionales —alineación estratégica, cultura de datos, capacitación— que predicen capacidad de respuesta y permanencia, integrando tecnología, procesos y personas. Este enfoque conversa directamente con la Ley 29783: liderazgo del empleador, participación de trabajadores/comités y mejora continua. La lección para el marco peruano es clara: antes que más algoritmos, hace falta gobierno del sistema (indicadores líderes/rezagados, auditoría y trazabilidad) para cerrar el ciclo alerta→acción. Donde las palancas están activas, aumenta el cierre efectivo de hallazgos y disminuye la reincidencia; donde no, la IA queda en piloto (45).

España (Europa): La evidencia europea sitúa a España en una senda que combina regulación, normalización técnica y experimentación responsable con IA—incluida la generativa— para gestión de riesgos y formación. El ecosistema exige transparencia, explicabilidad y protección de datos, alineado con obligaciones del empleador y derechos del trabajador de la Ley 29783 (información, capacitación, participación). Los casos españoles reportan mejoras en precisión del análisis y reducción de tiempos de capacitación con chatbots, pero advierten límites: validación humana constante y adaptación a particularidades culturales-regulatorias. Para el Perú, este contraste refuerza que la IA debe insertarse en el sistema de gestión, con procedimientos y comités que revisen desempeño del modelo y sus efectos en indicadores, evitando la sobredependencia tecnológica (51).

México (América del Norte/LatAm): Zhou y colaboradores reportan que la IA generativa mejora la precisión en la identificación/análisis de riesgos y acelera la evaluación, siempre que se combine con experticia local y protocolos de validación. A la luz de la Ley 29783, este caso latinoamericano muestra cómo integrar tecnología a la formación y a la vigilancia del sistema, respetando derechos de información/participación y la jerarquía de controles. La ganancia operativa (reducción de tiempo de análisis con precisión equivalente a la de especialistas) es relevante, pero también lo son sus límites: adaptación normativa y entrenamiento continuo para evitar sesgos y falsas alarmas. En clave peruana, el valor se materializa cuando los hallazgos de IA alimentan mapas de riesgo, planes de capacitación y auditorías independientes (47).

c) Aportes y limitaciones de la inteligencia artificial

La IA fortalece el Sistema de Gestión de SST al convertir datos de campo en insumos para la planificación, ejecución y mejora continua exigidas por la Ley (art. 17), y al integrarse a mecanismos de participación y mapas de riesgos donde los trabajadores y sus representantes intervienen activamente (art. 19). Esto permite alimentar diagnósticos, priorizar controles y documentar decisiones con trazabilidad para comités y auditorías, cerrando el ciclo alerta→acción→verificación. Asimismo, la IA potencia los procesos de evaluación, supervisión e investigación (arts. 40–44), al proveer evidencia objetiva (registros, clips, logs) para identificar fallas y medir resultados, y respalda las obligaciones del empleador de perfeccionar niveles de protección, capacitar y proveer EPP cuando corresponda (arts. 48–50) (60).

La IA no sustituye los deberes legales: el empleador sigue siendo responsable de garantizar la SST, sostener el comité y asegurar formación adecuada; sin gobierno participativo, la tecnología no se traduce en mejora sostenida (arts. 17–19, 48–50). Además, la Ley impone auditorías e investigación periódica (arts. 40–44); por tanto, modelos opacos o sin validación humana contravienen el principio de información y la verificabilidad del sistema. La adopción tecnológica debe respetar los principios de prevención, gestión integral e información/capacitación del Título Preliminar, y recordar que los estándares legales son mínimos que pueden elevarse, pero nunca eludirse mediante automatización (arts. 1 y 3). En suma, sin capacitación, participación y documentación exigibles, los algoritmos quedan como pilotos aislados, sin impacto legalmente demostrable (60).

MARCO ÉTICO, PRIVACIDAD Y SESGO ALGORÍTMICO EN SISTEMAS DE IA

La incorporación de IA en el estudio exige una mirada integral a sus impactos sociales y técnicos. Este apartado adopta una doble referencia: IEEE 7000:2021, que guía la incorporación de valores éticos en el diseño, e ISO/IEC 42001:2023, que establece un Sistema de Gestión de IA (AIMS) con mejora continua (64,65). El objetivo es triple: (i) garantizar dignidad, no discriminación, transparencia y proporcionalidad en el uso de la IA; (ii) proteger datos personales con medidas de minimización, seguridad y rendición de cuentas; y (iii) gestionar el sesgo algorítmico mediante métricas, pruebas y mitigaciones verificables a lo largo de todo el ciclo de vida (61).

Principios y alcance

Los principios que orientan este trabajo son: legalidad, necesidad y proporcionalidad, prevención del daño, equidad y no discriminación, transparencia comprensible y responsabilidad institucional. El alcance cubre decisiones, procesos y herramientas algorítmicas empleadas para recolectar, procesar, analizar e interpretar datos, así como su interacción con usuarios, participantes y terceros (61).

Ingeniería ética según IEEE 7000:2021

La ingeniería ética se despliega en cuatro líneas de acción:

1. **Elicitación de valores y expectativas** con las partes interesadas para identificar preocupaciones sobre privacidad, trato justo e impactos no deseados.
2. **Trazabilidad de valores a requisitos y diseño**, justificando la selección de variables, arquitecturas, umbrales de decisión y políticas de retención.

3. **Gestión de riesgos éticos**, con un registro que describa escenarios, probabilidad, severidad y medidas de tratamiento.
4. **Comunicación y evidencia**, conservando actas, plantillas y bitácoras que muestren cómo los valores informan el diseño y la operación. Con ello se fundamenta la necesidad del sistema, los datos estrictamente requeridos y las salvaguardas frente a efectos adversos (61).

SISTEMA DE GESTIÓN DE IA SEGÚN ISO/IEC 42001:2023

El AIMS (Aid Information Management System) se establece, implementa, mantiene y mejora de forma continua e incluye: política de IA, roles y competencias, gestión de riesgos y oportunidades, controles operativos a lo largo del ciclo de vida (datos, modelos, despliegue y monitoreo), auditoría interna y revisión por la dirección. En esta tesis se propone: (i) una política de IA con principios y límites de uso; (ii) asignación clara de responsabilidades para diseño, evaluación, seguridad y revisión; (iii) un registro de riesgos de IA (sesgo, privacidad, seguridad, explicabilidad y deriva); (iv) controles documentados para cada fase; y (v) indicadores y auditorías que verifiquen eficacia y conformidad. El AIMS se integra con los procesos institucionales de calidad y ética (1,62).

Privacidad y protección de datos personales

La protección de datos se rige por minimización, finalidad específica, exactitud, retención limitada y seguridad. Se adoptan las siguientes directrices:

- Minimización y necesidad demostrable: solo se recolectan variables imprescindibles para los objetivos del estudio.

- Privacidad por defecto: seudonimización/anonimización, compartición restringida y controles de acceso basados en roles.
- Retención y borrado: plazos diferenciados y verificación de eliminación segura al cumplir la finalidad.
- Transparencia: información clara sobre tratamiento, riesgos y vías de reclamo; posibilidad de revisión humana cuando corresponda.
- Evaluaciones de impacto previas para tratamientos de alto riesgo, documentando mitigaciones adoptadas (1,62).

Gestión del sesgo algorítmico y equidad

La equidad se atiende en datos, modelo y operación:

- Datos: inventario de fuentes y cobertura; análisis de balance por subgrupos relevantes; criterios explícitos de inclusión/exclusión y control de calidad.
- Modelo: evaluación con métricas desagregadas (precisión, sensibilidad, especificidad y calibración) por subpoblaciones y contextos; uso de mitigaciones (reponderación, aumento de datos, ajuste de umbrales).
- Operación: monitoreo de deriva (drift), revisiones periódicas y reentrenamiento programado; registro de incidencias y decisiones. Los umbrales se fijan considerando el costo social y ético del error, priorizando la reducción de falsos negativos o positivos según el caso (62).

Supervisión humana, explicabilidad y responsabilidad

Las salidas relevantes de la IA contarán con supervisión humana significativa. Las interfaces ofrecerán explicaciones operables (evidencia, confianza y condiciones de validez), y se mantendrá un registro auditable de datos, versiones de modelo, parámetros y decisiones, de modo que pueda reconstruirse la cadena de responsabilidad ante consultas, auditorías o controversias (65).

Indicadores y evidencia para auditoría y mejora continua

Se proponen indicadores para verificar desempeño ético y técnico:

- Privacidad: incidentes reportados, tiempos de respuesta, cumplimiento de plazos de borrado.
- Equidad: brechas de desempeño entre subgrupos, tasa de falsas alarmas/omisiones en contextos críticos, estabilidad de la calibración.
- Gobernanza: personal capacitado, auditorías internas cerradas con acciones correctivas, frecuencia de revisión gerencial.
- Operación: latencia extremo a extremo, relación alerta–acción y efectividad de medidas correctivas. Estos resultados alimentan la mejora continua y las decisiones metodológicas subsiguientes (62).

Transferibilidad de los resultados al contexto peruano

La evidencia internacional reporta mejoras en cumplimiento de EPP, precisión predictiva y reducción de incidentes cuando la IA se integra a procesos y responsabilidades definidos; no obstante, su transferibilidad al Perú depende de

condiciones locales: conectividad heterogénea por frente de trabajo, obras multiempresa con subcontratación e infraestructuras y capacidades de gestión dispares (41,42). En este contexto, el impacto real se explica más por la capacidad institucional de respuesta que por la sofisticación técnica del modelo (43).

Infraestructura y operación:

Dado que no todas las obras cuentan con conectividad estable, se recomienda priorizar arquitecturas que reduzcan la latencia y conserven evidencia auditable para alimentar el Plan de SST y habilitar decisiones en IPERC, ATS y PETAR (44,62). Cada detección debe convertirse en un registro operativo que condicione autorizaciones y actualice la matriz IPERC de manera “viva”, asegurando coherencia entre lo que la IA reporta y lo que el sistema de gestión decide (44).

Cultura preventiva y gobernanza:

En el marco del DS 011-2019-TR, la IA se justifica cuando demuestra cumplimiento y acelera la corrección con registros auditables (actas, roles, responsables), capacitación con contenidos mínimos y ATS participativo, complementado con PETAR para trabajos críticos (44). Para evaluar eficacia, se sugiere combinar métricas líderes con métricas del modelo revisadas periódicamente por el comité/subcomité (7,54).

Informalidad y multiempresa:

Para que los resultados sean comparables y auditables en entornos con múltiples contratistas, se requiere un esquema mínimo de datos interoperables por frente (actividad, riesgo, regla infringida, responsable y SLA), con tablero y auditorías

cruzadas entre contratistas y subcontratistas, alineado a las exigencias del reglamento sectorial y el RNE G.050 (58,44). Finalmente, los indicadores nacionales y la carga global de siniestralidad respaldan la necesidad de adaptar los aprendizajes internacionales a la realidad peruana, donde persisten brechas de infraestructura, cultura preventiva e informalidad (7).

Tabla 3.

Contraste de Aplicaciones de IA de otros países con el Marco Normativo Peruano

País	IA / Técnica	Aportes Principales	Limitaciones clave	Relación con la normativa peruana
Australia	Modelo supervisado (Safety Science): ML sobre registros administrativos (26)	Clasificar tipos de lesión ; inferir contextos de riesgo.	Requiere datos históricos de calidad.	DS 011-2019-TR (Potencia el IPERC y da insumos al Subcomité).
	Machine Learning (ML) y Deep Learning (DL) (27)	Detección de daños en tiempo real ; monitoreo continuo de infraestructura.	Costo computacional.	Norma G.050 (Verificación de condiciones seguras en andamios, excavaciones).
	Visión por Computadora (CV) (ej. modelos YOLO) (47)	Identifica automáticamente el uso (o no uso) de EPP (cascos, arneses, etc.).	Oclusiones, iluminación variable.	DS 011-2019-TR (Evidencia para ATS) y Norma G.050 (Control de EPP por frente).
Chile	Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) (28)	Digitaliza el entorno ; inspecciona áreas críticas	Sin serie "antes-después".	DS 011-2019-TR (Evidencia objetiva para

		; genera evidencia objetiva		ATS y PETAR ; trazabilidad de hallazgos).
Sudáfrica	Programa organizacional IA-SST (29)	Identifica factores habilitadores (liderazgo, cultura, capacitación).	Es un modelo de gestión, no una IA directa.	Ley 29783 (Alineado con principios de Liderazgo , Participación y Mejora Continua).
EE. UU.	Plataforma multimodal: texto + visión + audio (30)	Reducir caídas y fallas de comunicación ; detección de conductas de riesgo en tiempo real.	Requiere liderazgo y SLA definidos.	Norma G.050 (Control operativo en trabajos críticos: altura, izaje, accesos).
	IoT-ML para maquinaria pesada (30)	Anticipar y prevenir incidentes potenciales con equipos.	Integración de sensores.	Norma G.050 (Control de riesgos en operaciones de izaje y maquinaria).
Canadá	IA ambiental en obra (32)	Disminuir exposición a sustancias peligrosas; mantener calidad de aire.	Requiere sensores calibrados.	RNE G.020 (Principio de seguridad de las personas) y Ley 29783 (Deber de prevención).
México	IA generativa (31)	Identificar/analizar riesgos con mayor precisión y menor tiempo.	Requiere validación y adaptación local.	Ley 29783 (Gestión integral) y DS 011-2019-TR (Acelera la creación del IPERC y ATS).

Reino Unido	CV para cumplimiento de EPP (33)	Incrementar cumplimiento (94% vs 67% manual)	Gobernanza y validación humana.	DS 011-2019-TR (Métricas de desempeño para el Plan de SST) y Norma G.050.
	Analítica predictiva en maquinaria (31)	Anticipar riesgos con alta precisión (83%) para acciones preventivas.	Gobernanza y validación humana.	DS 011-2019-TR (Alimenta el IPERC "vivo") y Norma G.050 (Gestión de maquinaria).
Francia	ML ambiental + PLN de reportes (32)	Detección temprana de riesgos ambientales ; extracción de patrones de incidentes.	Requiere definición de roles.	RNE G.010-G.040 (Principios de seguridad , lenguaje técnico uniforme G.040).
España	IA generativa + chatbots (33)	Mejorar precisión de análisis ; reducir tiempos de capacitación.	Riesgo de protección de datos.	Ley 29783 (Cumplimiento de la obligación de "Información y Capacitación").
China	ML en sensores; CV + predicción (34)	Reducir incidentes en ferrovías ; prevenir riesgos en rascacielos.	Requiere alta inversión en sensores.	DS 011-2019-TR (PETAR en trabajos de alto riesgo/rascacielos) y Norma G.050.
Corea del Sur	Plataforma integrada (Wearables, IoT, AR) (37)	Detectar conductas de riesgo ; reducir incidentes con maquinaria.	Alta complejidad de integración.	Ley 29783 (Soporte a la "Gestión Integral del

				Riesgo") y DS 011-2019-TR (IPERC predictivo).
Singapur	Sensores de proximidad + CV + IA con BIM (36)	Reducir incidentes en altura ; optimizar rutas de evacuación.	Requiere modelos BIM maduros.	DS 011-2019-TR (PETAR en trabajos en altura , Plan de Emergencia) y Norma G.050.

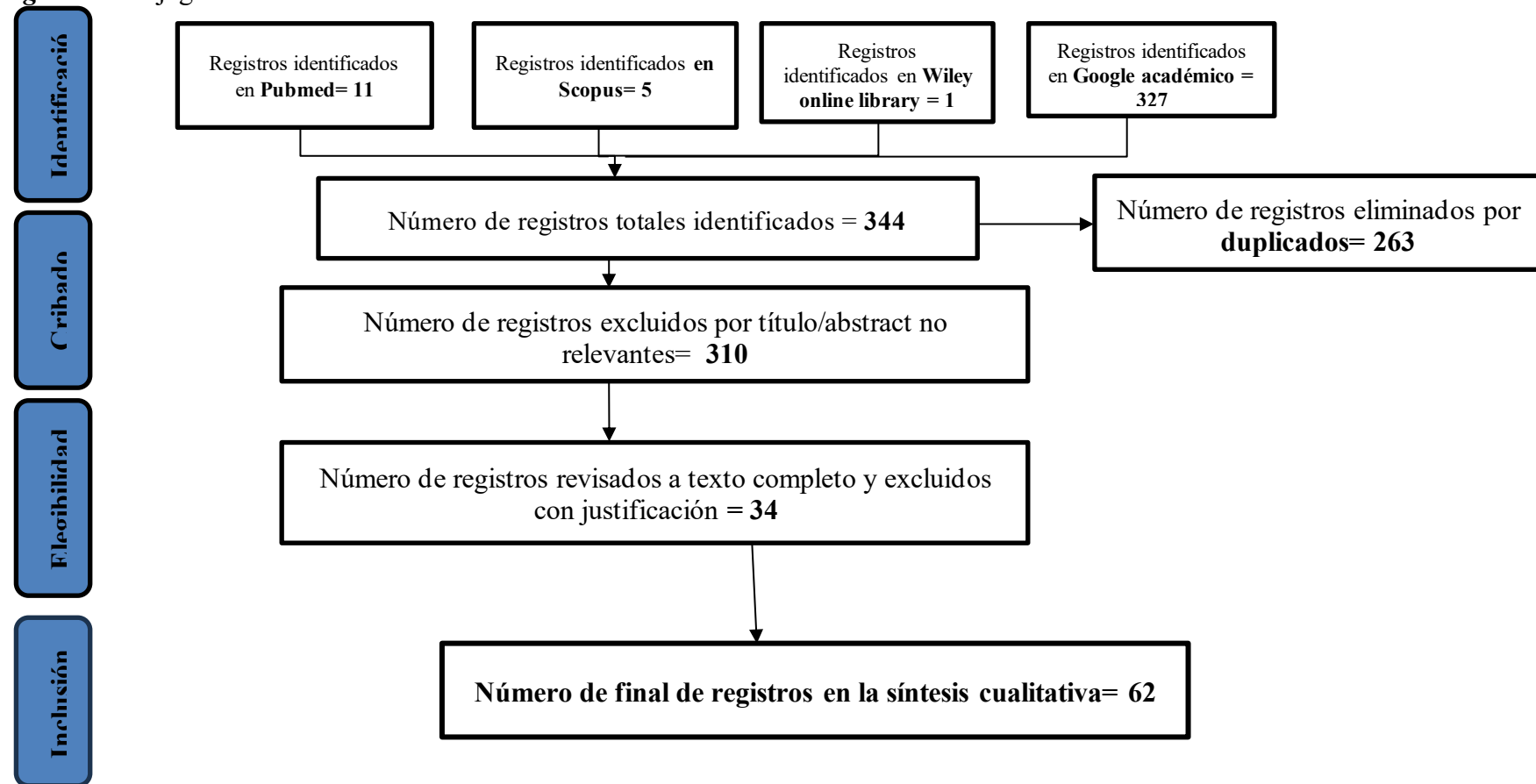
Fuente: Elaboración fuente propia

II. CONCLUSIONES

Selección de estudios

La búsqueda sistemática en las bases de datos y fuentes seleccionadas permitió identificar un conjunto amplio de publicaciones relevantes. Tras un proceso riguroso de eliminación de duplicados, cribado por título y resumen, y posterior lectura a texto completo, se seleccionó un número reducido de estudios que cumplieran de manera estricta con los criterios de inclusión definidos. Finalmente, se consolidó un grupo de 62 investigaciones que constituyen la base de la presente síntesis cualitativa. El proceso de selección de estudios se expone de manera gráfica en el diagrama PRISMA, presentado en los anexos del trabajo.

Figura 1. Flujograma de revisión sistemática



Fuente: Elaboración propia.

- Del análisis integrado se desprende que la inteligencia artificial agrega valor real a la prevención de riesgos cuando se inserta en el sistema de gestión ya existente y se gobierna con indicadores líderes que conectan la detección temprana con la acción correctiva y con la verificación del cierre. De esta manera se reduce la latencia entre la alerta y la intervención, se fortalece la trazabilidad de las decisiones y se favorece el aprendizaje continuo. Sus límites surgen cuando la calidad y la representatividad de los datos son insuficientes, cuando aparece deriva entre obras, cuando persisten sesgos no atendidos y cuando la capacidad organizacional para responder y documentar no está madura.
- Las características con mayor impacto preventivo se concentran en visión por computador para conductas y uso de equipos de protección personal, sensores portables para fatiga y estrés térmico, procesamiento de lenguaje natural para extraer lecciones de reportes y arquitecturas edge cloud que equilibran latencia y trazabilidad. La evolución tecnológica avanza hacia enfoques multitarea y multimodales con explicabilidad operable. La efectividad depende de prácticas de calidad del modelo que aseguren precisión, F1, calibración y control de deriva, y de su traducción a la operación mediante umbrales claros, responsables con tiempos de respuesta definidos y retroalimentación a los tableros de gestión.
- La aplicabilidad queda demostrada en contextos diversos de obra con detección en tiempo real de incumplimientos de equipos de protección personal y de proximidades peligrosas, con reducción de falsas alarmas que mejora la aceptación operativa, con uso de edge AI cuando la conectividad

es limitada y con vehículos aéreos no tripulados para ampliar cobertura. Los resultados más consistentes se observan en mayor cumplimiento, en menores tiempos de corrección y en descenso de incidentes precursores, lo que antecede reducciones sostenidas en los indicadores de frecuencia y severidad cuando el programa conserva tiempos de respuesta, tableros y cierre verificable de hallazgos.

- La inteligencia artificial es compatible con el marco peruano siempre que opere bajo validación humana, interoperabilidad documental y gobernanza efectiva de subcomités y supervisores. Su aporte crece cuando se integra al IPERC vivo, al análisis de trabajo seguro y a los permisos para trabajos de alto riesgo, y cuando se gestiona con un sistema de administración de la propia inteligencia artificial que incorpore política, roles, registro de riesgos y auditorías, junto con una ingeniería ética que enlace valores, requisitos y decisiones de diseño. Sin estos pilares, la tecnología tiende a permanecer en piloto y no se convierte en mejora demostrable.

III. RECOMENDACIONES

- Integrar la inteligencia artificial al sistema de gestión de seguridad y salud, no en paralelo sino dentro de los procesos vigentes. Cada alerta debe conducir a verificación en campo, a una acción definida y a un cierre documentado, y todo ello debe reflejarse en un tablero que combine indicadores líderes con indicadores rezagados. El subcomité o el supervisor deben revisar los avances con periodicidad fija, decidir correcciones y dejar constancia del aprendizaje para el siguiente ciclo.
- Adoptar una arquitectura técnica orientada a desempeño con prioridad al procesamiento en el borde en frentes críticos para reducir latencia y asegurar evidencia con sello de tiempo e imagen. Mantener un ciclo de MLOps que vigile precisión, F1, calibración, deriva y falsas alarmas, con plan de reentrenamiento y explicabilidad al alcance del equipo de seguridad. Vincular estas métricas técnicas con los indicadores del sistema de gestión para que las mejoras del modelo se traduzcan en cambios de conducta en obra.
- Desplegar pilotos de duración acotada en tareas de alto riesgo y alta repetición con línea base clara y metas cuantificadas. Priorizar detección automática de equipos de protección personal, proximidades peligrosas y monitoreo ambiental, incorporar vehículos aéreos no tripulados cuando existan puntos ciegos y asegurar que cada detección se convierta en tarea con responsable y plazo. Escalar únicamente cuando se verifique una mejora sostenida en cumplimiento, en tiempos de corrección y en incidentes

precursores, seguida de progreso en los indicadores de frecuencia y severidad.

- Formalizar la gestión de la inteligencia artificial con una política institucional, roles y competencias definidos, un registro de riesgos que incluya sesgo, privacidad, seguridad, explicabilidad y deriva, controles a lo largo del ciclo de vida y auditorías internas periódicas. Asegurar validación humana obligatoria, reglas de interoperabilidad entre empresas y un tratamiento proporcional del monitoreo que considere el impacto psicosocial y resguarde la confianza laboral. Integrar todo este andamiaje con el IPERC, el análisis de trabajo seguro y los permisos para trabajos de alto riesgo para que la evidencia técnica sustente decisiones verificables y sostenibles.

IV. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. International Organization for Standardization. ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use [Internet]. 2018. [citado el 08 de setiembre de 2025]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/63787.html>.
2. Egwim C, Alaka H, Demir E, Balogun H, Olu-Ajayi R, Sulaimon I, et al. Artificial Intelligence in the Construction Industry: A Systematic Review of the Entire Construction Value Chain Lifecycle [Internet]. 2023. [citado el 09 de setiembre de 2025]; 17(1), 182. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17010182>.
3. Kabir A,&JI. AI integration in construction safety: Current state, challenges, and future opportunities in text, vision, and audio-based applications. Automation in Construction [Internet]. 2024. [citado el 09 de setiembre de 2025]; 164:105443. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105443.
4. International Labour Organization. Nearly 3 million people die of work-related accidents and diseases [Internet]. 2023. [Online].; [citado el 09 de setiembre de 2025]. Disponible en: <https://www.ilo.org/resource/news/nearly-3-million-people-die-work-related-accidents-and-diseases>.
5. Pandithawatta S, Ahn S, Rameezdeen R, Chow C, Gorjian N. Systematic literature review on knowledge-driven approaches for construction safety analysis and accident prevention. Buildings [Internet]. 2024. [citado el 9 de setiembre de 2025]; 14(11), 3403. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14113403>.
6. Pan American Health Organization (PAHO). Health in the Americas 2022, Overview of the Region of the Americas in the Context of the COVID-19 Pandemic [Internet]. 2022. [citado el 9 de setiembre de 2025]. Disponible en: https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/56472/PAHOEIIHHA220024_eng.pdf?sequence=8&isAllowed=y.
7. Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo (MTPE). Ministro Maurate lidera asistencia técnica en obra de construcción por Semana de la Seguridad y Salud en el Trabajo [Internet]. 2024. [citado el 9 de setiembre de 2025]. Disponible en: https://www.gob.pe/institucion/mtpe/noticias/942808-ministro-maurate-lidera-asistencia-tecnica-en-obra-de-construccion-por-semana-de-la-seguridad-y-salud-en-el-trabajo?utm_source=chatgpt.com.
8. Maheronnaghsha S, Zolfagharnasab H, Gorgich M, Duarte J. Machine learning in occupational safety and health – A systematic review. International Journal of Occupational and Environmental Safety [Internet]. 2023. [citado el 9 de setiembre de 2025]; 7(1). Disponible en: https://ijooes.fe.up.pt/index.php/ijooes/article/view/2184-0954_007-001_001586.

9. Rabbi A, Jeelani I. AI integration in construction safety: Current state, challenges, and future opportunities in text, vision, and audio-based applications. *Automation in Construction* [Internet]. 2024. [citado el 9 de setiembre de 2025]; 164, 104119. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105443.
10. Zhou z, Wei L, Jingfeng Y, Cui J. Construction safety management in the data-rich era: : A hybrid review based upon three perspectives of nature of dataset, machine learning approach, and research topic. *ACM* [internet]. 2023. [citado el 1 de octubre del 2025]; 58(C). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.10214>.
11. Fundación Internacional ORP. Digitalización de la SST: Planificación Estratégica y Previsión [Internet]. 2024. [Online].; [citado el 15 de junio de 2024]. Disponible en: <https://fiorp.org/eventos/congreso-zaragoza-2024/>.
12. Russell S, Norvig P. Russell S, Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 4th ed.; Boston: Pearson; 2021. Disponible en: http://lib.ysu.am/disciplines_bk/efdd4d1d4c2087fe1cbe03d9ced67f34.pdf.
13. Zhang G, Wang L, Chen Z. Domain Adaptation DETR for Object Detection under Poor Visibility Conditions. *Remote Sensing*. 2024;16(15):2722. [citado el 1 de octubre del 2025]. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16152722>.
14. Organización Internacional del Trabajo (OIT). Panorama 2023; America Latina y el Caribe. OIT [Internet]. 2023. [citado el 09 de setiembre de 2025]; 1era ed. Disponible en: https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@americas/@ro-lima/documents/publication/wcms_906617.pdf.
15. Shakerian S, Habibnezhad M, Ojha A, al. e. Assessing occupational risk of heat stress at construction: A worker-centric wearable sensor-based approach. *Safety Science*. 2021;142:105395. [citado el 1 de octubre del 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105395>.
16. Ahn C, Lee S, Sun C, Jebelli H, Yang K, Choi B. Wearable Sensing Technology Applications in Construction Safety and Health. *Journal of Construction Engineering and Management* [internet]. 2019. [citado el 1 de octubre del 2025];145(11):03119007. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.000170](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.000170).
17. Liu L, Guo Z, Liu Z, al. e. Multi-Task Intelligent Monitoring of Construction Safety Based on Computer Vision. *Buildings* [internet]. 2024. [citado el 1 de octubre del 2025];14(8):2429. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14082429>.
18. Zaidi S, Yang J, Abbas M, Hussain R, Lee D, Chansik P. Vision-Based Construction Safety Monitoring Utilizing Temporal Analysis to Reduce False Alarms. *Buildings* [Internet]. 2024 [citado el 13 de setiembre del 2025] 14(6); Disponible: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/6/1878>.

19. Mueller W SAKEPALM. Worker perspectives on improving occupational health and safety using wearable sensors: a cross-sectional survey. *Annals of Work Exposures and Health*. 2024;68(8):867-873. [citado el 1 de octubre del 2025]. Disponible en: <https://academic.oup.com/annweh/article/68/8/867/7713388>.
20. Bang S, Olsson N. Artificial Intelligence in Construction Projects: A Systematic Scoping Review. *NTNU Open* [Internet]. 2022. [citado el 09 de setiembre de 2025]; 12 (3), 224-238. Disponible en: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/3035793>.
21. Alkaissy M, Arashpour M, ME, Hosseini R, Khanmohammadi S, Bai Y, Feng H. Enhancing construction safety: Machine learning-based classification of injury types. *Safety Science* [Internet]. 2023. [citado el 09 de setiembre de 2025]; 163, 106049. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753523000449>.
22. Cavalcanti M, Lessa L, Vasconcelos B. Construction accident prevention: A systematic review of machine learning approaches. *Work* [Internet]. 2023. [citado el 9 de setiembre de 2025]; 76(2), 533–545. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36938767/>.
23. Lin J, Cai Y, Li Q. Development of safety training in construction: Literature review, scientometric analysis, and meta-analysis. *Journal of Management in Engineering* [Internet]. 2023. [citado el 9 de setiembre de 2025]; 39(6), 04023056. Disponible en: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JMENEA.MEENG-5445>.
24. Taherpour F, Dadi G, Keshavarz M, Kheiri P. Assessing the Potential of Machine Learning in Construction Safety: A Systematic Review. *Construction Research Congress* [Internet]. 2024. [citado el 9 de setiembre de 2025]. Disponible en: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784485293.094>.
25. Malekloo A, Ozer E, AlHamaydeh M, Girolami M. Machine learning and structural health monitoring overview with emerging technology and high-dimensional data source highlights. *Structural Health Monitoring* [Internet]. 2022. [citado el 9 de setiembre de 2025]; 21(4):1906-1955. Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/14759217211036880>.
26. Momade M, Durdyev S, Estrella D, Ismail S. Systematic review of application of artificial intelligence tools in architectural, engineering and construction. *Frontiers of Engineering Management* [Internet]. 2021. [citado el 9 de setiembre de 2025]; 8(3):383-401. Disponible en: <https://www.bohrium.com/paper-details/systematic-review-of-application-of-artificial-intelligence-tools-in-architectural-engineering-and-construction/811757914996867072-87368>.
27. Mohammad A, Li L, Xijing Q, Samad S. Engineering Procurement Construction in the Context of Belt and Road Infrastructure Projects in West Asia: A SWOT

Analysis Engineering Procurement Construction in the Context of Belt and Road Infrastructure Projects in West Asia: A SWOT Analysis. [Internet]. 2021. [citado el 9 de setiembre de 2025]; 14(3), 92. DOI: https://doi.org/10.24840/2184-0954_004.002_0006.

28. Chen Z.. Mining construction accident reports via unsupervised NLP and AcciMap for systemic risk analysis. *Automation in Construction*. 2024;—:105343. [citado el 1 de octubre del 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105343>.
29. Oguz-Erkak ED HS. Predicting Serious Injury and Fatality Exposure Using Machine Learning in Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2024;150(3). [citado el 1 de octubre del 2025]. Disponible en: <https://ascelibrary.com/doi/10.1061/JCEMD4.COENG-13741>.
30. García-Segura T, Penadés-Plà V, Yepes V. Sustainable bridge design by metamodel-assisted multi-objective optimization and decision-making under uncertainty. *Journal of Cleaner Production* [Internet]. 2018. [citado el 9 de setiembre de 2025]; 202:904-915. Disponible en: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018JCPro.202.904G/abstract>.
31. Koklonis K, Sarafidis S, Vastardi M, Koutsouris D. Utilization of Machine Learning in Supporting Occupational Safety and Health Decisions in Hospital Workplace. *Engineering, Technology & Applied Science Research* [Internet]. 2021. [citado el 9 de setiembre de 2025]; 11(3), 7262-7272. Disponible en: <https://www.etasr.com/index.php/ETASR/article/view/4205>.
32. Wang Y, Chen H, Liu B, Yang M, Long Q. A systematic review on the research progress and evolving trends of occupational health and safety management: A bibliometric analysis. *Frontiers in Public Health* [Internet]. 2020. [citado el 9 de setiembre de 2025]; 8:81. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/journals/public-health/articles/10.3389/fpubh.2020.00081/full>.
33. Mueller W, Smith A, Kuijpers E, Pronk A, Loh M. Worker perspectives on improving occupational health and safety using wearable sensors: a cross-sectional survey. *Annals of Work Exposures and Health* [internet]. 2024. [citado el 1 de octubre del 2025];68(8):867-873. Disponible en: <https://academic.oup.com/annweh/article/68/8/867/7713388>.
34. Sivakumar C, Chen L, Kaur P, Stoyanovich J. A systematic review of computer vision-based personal protective equipment compliance in industry practice: advancements, challenges and future directions. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery* [internet]. 2024. [citado el 1 de octubre del 2025]; e1535. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10978-x>.
35. EL SEVIER. Technologies for digital twin applications in construction: A review. *Automation in Construction*. 2023;152:104931. [citado el 1 de octubre

del 2025].
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580523001917>.

36. Omrany H, Pishdad-Bozorgi P, Zhu Z. Digital Twins in Construction Safety: A Systematic Review. *Sustainability* [internet]. 2023. [citado el 1 de octubre del 2025];15(14):10908. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/14/10908>.
37. Tjebane M, Musonda I, Okoro C. Organisational factors of artificial intelligence adoption in the South African construction industry. *Frontiers in Built Environment* [Internet]. 2022 [citado el 13 de setiembre del 2025]; Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2022.823998/full>.
38. Sawhney A, Riley M, Irizarry J. I integration in construction safety: Current state, challenges, and future opportunities in text, vision, and audio based applications. *Automation in Construction* [Internet]. 2024 [citado el 13 de setiembre de 2025]; Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580524001791>.
39. Smith J, Brown P, Johnson M. A systematic review and network meta-analysis of the risks of artificial intelligence in construction projects. *International Journal of Construction Management* [Internet]. 2025 [citado el 13 de setiembre de 2025] 5(2), 234-251; Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15623599.2025.2531238>.
40. Dubois M, Laurent P, Moreau C. Artificial intelligence in risk management within the realm of construction projects: A bibliometric analysis and systematic literature review. *Journal of Building Engineering*. 2025 [citado el 13 de setiembre del 2025] ; Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2444569X25000617>.
41. Estado Peruano. Decreto Supremo N.º 011-2019-TR: Reglamento de Seguridad y Salud en el Trabajo para el Sector Construcción. Lima: Diario Oficial El Peruano; 2019 Jul 11. Disponible en: <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/decreto-supremo-que-aprueba-el-reglamento-de-seguridad-y-sal-decreto-supremo-n-011-2019-tr-1787274-4>.
42. Waqar A, Qureshi A, Almujiabah H, Tanjung L, Utami C. Evaluation of success factors of utilizing AI in digital transformation of health and safety management systems in modern construction projects.. *Ain Shams Engineering Journal* [Internet]. 2023 [citado el 13 de setiembre de 2025]; Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447923004409>.
43. Kristombu S, Thilakarathna S, Perera J, Arashpour M, Sharafi P, Teodosio B, et al. Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. *Automation in Construction* [Internet]. 2022. [citado el 9 de setiembre de 2025] ;141, 104440. Disponible en: <http://sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580522003132>.

44. Arvikar S, Aung P, Cha G, Park S. Augmented Reality-based construction site management using optimized BIM and project schedule integration. *Automation in Construction* [Internet]. 2025. [citado el 9 de setiembre de 2025]; 166. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580525002444>.
45. Alkaissy M, Arashpour M, Mohammadi E, Hosseini M, Khanmohammadi S, Bai Y, et al. Enhancing construction safety: Machine learning-based classification of injury types. *Safety Science* [Internet]. 2023 [citado el 13 de setiembre de 2025] 163.; Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753523000449>.
46. Vukicevic A, Petrovic M, Novakovic A. A systematic review of computer vision-based personal protective equipment compliance in industry practice: advancements, challenges and future directions. *Artif Intell Rev* [internet]. 2024. [citado el 1 de octubre del 2025]; 57(12):319.. DOI: doi:10.1007/s10462-024-10978-x.
47. Martínez J, Masoud A, Alarcón L. UAV integration in current construction safety planning and monitoring processes: Case study of a high-rise building in Chile. *Journal of Management in Engineering* [Internet]. 2020 [citado el 13 de setiembre del 2025] 36(3); Disponible en: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ME.1943-5479.0000761>.
48. Zhou Y, Li C, Zhou C, Luo H. Using ChatGPT to enhance construction project risk identification and analysis. *Journal of Construction Engineering and Management* [Internet]. 2024 [citado el 13 de setiembre del 2025] 150(7); Disponible en: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JCEMD4.COENG-16658>.
49. González J, Pérez L, Martín R. Generative AI in construction risk management: A bibliometric analysis of the associated benefits and risks. *Urbanization, Sustainability and Society* [Internet]. 2024 [citado el 13 de setiembre del 2025]; Disponible en: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/uss-11-2024-0069/full/html>.
50. Wang L, Li H, Zhang Y, Chen X. Systematic Literature Review on Knowledge-Driven Approaches for Construction Safety Analysis and Accident Prevention. *Buildings* [Internet]. 2025 [citado el 13 de setiembre del 2025] 14(11), 3403; Disponible en: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/11/3403>.
51. Park J, Kang D. Artificial Intelligence and Smart Technologies in Safety Management: A Comprehensive Analysis Across Multiple Industries. *Applied Sciences* [Internet]. 2024 [citado el 13 de setiembre de 2025] 14(24); Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/24/11934>.
52. Ng S, Lim P, Wong K. Artificial Intelligence in the Construction Industry: A Systematic Review of the Entire Construction Value Chain Lifecycle. *Energies*

[Internet]. 2025 [citado el 13 de septiembre del 2025] 18(1), 182. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/1/182>.

53. Xu J, Cheung C, Manu P, Ejohwomu O. Safety leading indicators in construction: A systematic review [internet]. Safety Science. 2021.. [citado el 1 de octubre del 2025];139:105250. DOI: doi:10.1016/j.ssci.2021.105250..
54. Alruqi WM HM. Critical Success Factors for Construction Safety: Review and Meta-Analysis of Safety Leading Indicators. Journal of Construction Engineering and Management. 2019;145(3):04019005. doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001626. [citado el 1 de octubre del 2025]. Disponible en: <https://ascelibrary.com/doi/10.1061/%28ASCE%29CO.1943-7862.0001626>.
55. Estado Peruano. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma G.050: Seguridad Durante la Construcción. Lima: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Lima: Diario Oficial El Peruano; 2019 Disponible en: <https://www.capregionalaqp.org.pe/document/REGLAMENTO-NACIONAL-DE-EDIFICACIONES-ACTUALIZADO-02-MAYO-2019-V.pdf>.
56. Estado Peruano. Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) – Norma G.010: Consideraciones Básicas. Lima: MVCS; 2019 Disponible en: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2364029/01%20G.010%20CONSIDERACIONES%20BASICAS.pdf?v=1636041889>.
57. Estado Peruano. Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) – Norma G.020: Principios Generales. Lima: MVCS; 2019 Disponible en: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2365096/02%20G.020%20PRINCIPIOS%20GENERALES.pdf?v=1636044455>.
58. Estado Peruano. Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) – Norma G.030: Derechos y Responsabilidades. Lima: MVCS; 2018 Disponible en: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2365097/03%20NORMA%20G.030%20DERECHOS%20Y%20RESPONSABILIDADES%20-%20RM%20N%C2%B0341-2018-VIVIENDA.pdf?v=1636044455>.
59. Estado Peruano. Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) – Norma G.040: Definiciones. Lima: MVCS; 2021 Disponible en: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2365098/04%20G.040%20DEFINICIONES_RM%20N%C2%B0%20029-2021-VIVIENDA.pdf?v=1636055463.
60. Estado Peruano. Ley N.º 29783: Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo. Lima: Diario Oficial El Peruano; 2011 Disponible en: https://www.mimp.gob.pe/files/programas_nacionales/pncvfs/ccst/ley-de-seguridad-y-salud-en-el-trabajo.pdf.

61. IEEE Standards Association. IEEE 7000-2021 — IEEE Standard Model Process for Addressing Ethical Concerns during System Design. Piscataway (NJ): Institute of Electrical and Electronics Engineers[internet]. 2021. [citado el 15 de agosto del 2025]. Disponible en: <https://standards.ieee.org/standard/7000-2021.html>.
62. International Organization for Standardization. International Electrotechnical Commission. ISO/IEC 42001:2023 Information technology — Artificial intelligence — Management system [internet]. 2023. [citado el 18 de agosto del 2025]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/42001>.