

Rendimiento en materia de seguridad: eficacia de las estrategias preventivas en proyectos de construcción

Safety performance: Effectiveness of preventive strategies in construction projects

Luis A. Saavedra-Robinson¹  Kathleen Salazar-Serna²  Lorena Cadavid³ 

¹ Departamento de Ingeniería Industrial, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

² Departamento de Ingeniería Civil e Industrial, Pontificia Universidad Javeriana – Cali, Cali, Colombia

³ Departamento de Computación y Ciencias de la Decisión, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

¿Cómo citar?

Saavedra-Robinson LA, Salazar-Serna K, Cadavid L. Rendimiento en materia de seguridad: eficacia de las estrategias preventivas en proyectos de construcción. Ingeniería y Competitividad, 2025, 27(3)e-20915259

<https://doi.org/10.25100/iyc.v27i3.15259>

Resumen

Introducción: la construcción es uno de los sectores con mayor índice de accidentes. Las estrategias preventivas suelen dar resultados ineficaces, ya que se aplican de forma genérica sin tener en cuenta el rendimiento de los trabajadores ni los riesgos in situ.

Objetivo: esta investigación tiene como objetivo evaluar la eficacia de las estrategias preventivas para la seguridad mediante la modelización de la forma en que los empleados interactúan con el entorno del proyecto de construcción.

Método: este artículo propone un modelo basado en agentes que integra factores como el impacto de la influencia social en el comportamiento en materia de seguridad, los riesgos que varían durante el proceso de construcción, la experiencia laboral y la concienciación sobre la seguridad. Evaluamos tres medidas preventivas que tienen en cuenta la supervisión humana, la supervisión con drones y la atención de los compañeros de trabajo.

Resultados: los resultados indicaron que la influencia social entre los empleados tenía un impacto positivo en la concienciación sobre la seguridad. El rendimiento en materia de seguridad no es el resultado directo de una mayor inversión en seguridad. Por lo tanto, una mejor toma de decisiones tiene un impacto positivo en los costes y la duración del proyecto, así como en el bienestar de la mano de obra.

Conclusiones: el sector de la construcción sigue presentando altas tasas de accidentes a pesar de los considerables esfuerzos de las empresas por mitigarlos. Las inversiones en estrategias de prevención no siempre se traducen en mejoras proporcionales en los resultados de seguridad.

Palabras clave: modelación basada en agentes; rendimiento en materia de seguridad; construcción de edificios; seguridad en la construcción; prevención de accidentes; inversión en seguridad.

Abstract

Introduction: construction is one of the industries with the highest rate of accidents. Preventive strategies often lead to ineffective results as they are applied generically without considering the worker's performance or on-site hazards.

Objective: this research aims to evaluate the effectiveness of preventive strategies for safety by modelling how employees interact with the construction project environment.

Method: this paper puts forward an agent-based model that integrates factors such as the impact of social influence on safety behaviour, hazards varying during the construction process, work experience and safety awareness. We evaluate three preventive actions that take into consideration human monitoring, drone monitoring, and co-workers' care.

Results: indicated that social influence among the employees had a positive impact on safety awareness. Safety performance is not a direct result of a higher investment in safety. Therefore, better decision-making impacts positively on costs and project duration, as well as on the welfare of the workforce.

Conclusions: the construction sector continues to exhibit high accident rates despite considerable efforts by companies to mitigate them. Investments in prevention strategies do not always yield proportional improvements in safety outcomes.

Keywords: agent-based modelling; safety performance; building construction; construction safety; accident prevention; safety investment

Recibido: 18/09/25

Revisado: 5/11/25

Aceptado: 24/11/25

Online: 10/12/25

Correspondencia

l.saavedra@javeriana.edu.co



¿Por qué se realizó este estudio?

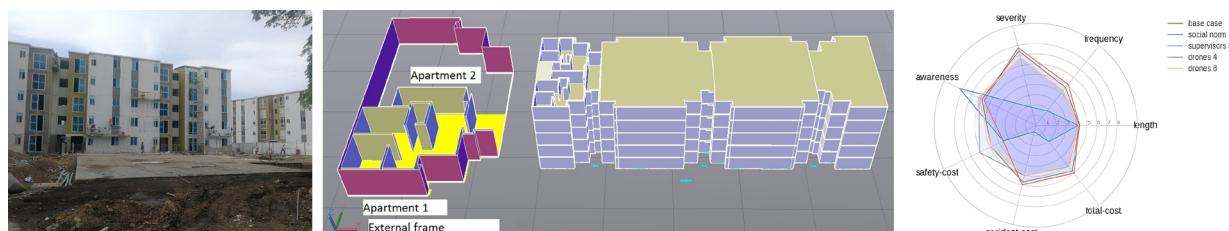
Los accidentes laborales en el sector de la construcción, y en concreto en la edificación residencial, son una preocupación importante en materia de seguridad laboral, afectando no solo la productividad de las empresas, sino también la calidad de vida de los empleados. Esta investigación muestra cómo el uso de tecnologías como los drones puede brindar apoyo y mejorar las condiciones de seguridad, además de generar impactos positivos en los indicadores de gestión y la productividad en este tipo de proyectos.

¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

El estudio reveló que la influencia social entre los trabajadores impulsó significativamente la concienciación sobre seguridad. Este aumento de la concienciación se correlacionó con reducciones en los accidentes observados y mejoras en métricas clave del proyecto, como la rentabilidad y la reducción de la duración prevista de las tareas de construcción residencial. El uso de la tecnología no generará los efectos deseados si no se tienen en cuenta en el análisis los factores psicológicos que influyen en el comportamiento de los trabajadores. Las estrategias más rentables, en orden, son: iniciativa social, drones y supervisores.

¿Qué aportan estos resultados?

Los resultados demuestran que aprovechar la dinámica social y una cultura de seguridad proactiva puede generar beneficios sustanciales en seguridad y productividad, potencialmente más rentables que simplemente aumentar el gasto en seguridad. Además, la integración de modelos dinámicos de riesgos y apoyo tecnológico con la consideración de factores humanos mejora la toma de decisiones, lo que conduce a lugares de trabajo más seguros y proyectos de construcción de viviendas más eficientes.



Introducción

La industria de la construcción es un motor fundamental para el crecimiento económico y el desarrollo nacional (1). Más allá de su papel fundamental en la creación de empleo, la interconexión del sector con otras industrias contribuye significativamente al PIB y al avance económico general (2). No obstante, la construcción sigue siendo una de las industrias más peligrosas a nivel mundial, afectando tanto a países desarrollados como en desarrollo (3). Aunque la industria emplea aproximadamente al 7% de la fuerza laboral mundial, representa entre el 30 y el 40% de los accidentes laborales mortales (4), superando las tasas de accidentes observadas en países como China, Alemania, Estados Unidos y Reino Unido. En los países desarrollados, aunque las tasas absolutas han disminuido gracias a estrictas regulaciones y tecnologías de prevención, la complejidad de los proyectos y la subcontratación ha generado nuevos riesgos emergentes. En los países emergentes, por otro lado, los indicadores siguen aumentando. Por ejemplo, el Consejo de Seguridad de Colombia informó de un aumento del 145% en las enfermedades profesionales entre 2019 y 2020, especialmente en la construcción residencial (5). Países como Brasil y México también tienen altas tasas de accidentes, donde el empleo informal y la falta de supervisión son factores clave que agravan los accidentes en la región (6). Dado el considerable coste económico y humano asociado a estos incidentes (7), mejorar el rendimiento en seguridad en la construcción se ha convertido en una prioridad tanto para los gobiernos como para los actores del sector (8).

Múltiples factores influyen en el rendimiento en materia de seguridad durante los proyectos de construcción. Hoła et al. (9) clasifican estos factores en tres grupos principales: 1- tipo de construcción y tecnologías empleadas (10)(11); 2- atributos relacionados con el trabajador, incluyendo experiencia, cultura, creencias y entorno social (12)(13); y 3- factores no convencionales como el ritmo de trabajo, la tasa de aprendizaje, la conciencia del riesgo y la ergonomía (14)(15).

Las empresas constructoras mitigan los riesgos de los proyectos mediante diversas inversiones en seguridad, que van desde medidas tradicionales como la formación del personal e investigaciones de accidentes hasta tecnologías innovadoras como la realidad virtual y los sistemas aéreos no tripulados (11). Aunque la mayoría de los estudios evalúan la eficacia de estas intervenciones mediante análisis estadísticos u observaciones empíricas, a menudo pasan por alto diferencias individuales y dinámicas interpersonales, elementos especialmente relevantes para factores no convencionales y comúnmente excluidos de las evaluaciones de seguridad (16). El modelado basado en agentes (ABM) proporciona un enfoque computacional potente para capturar estas interacciones no lineales entre individuos y su entorno (17), permitiendo una comprensión más matizada de su impacto en los resultados de seguridad.

El desempeño en seguridad en la industria de la construcción se ha evaluado tradicionalmente mediante indicadores reactivos como las tasas de accidentes y días laborales perdidos mediante normativas como el Decreto 1072 de 2015, que regula el Sistema de Gestión de Salud y Seguridad Ocupacional (SG-SST) en Colombia y es obligatorio para todas las empresas, y la Resolución 4272 de 2021, que establece regulaciones para trabajar en altura, un riesgo específico y frecuente en la construcción. Sin embargo, estas métricas proporcionan una visión limitada sobre la prevención de accidentes, ya que solo se registran después de que se hayan producido incidentes, reflejando así un enfoque reactivo más que proactivo. Por ello, investigaciones recientes han enfatizado la

importancia de variables proactivas, incluyendo inversiones en seguridad (14), clima de seguridad y conciencia sobre la seguridad (13). Cabe destacar que la conciencia sobre la seguridad abarca la percepción de los riesgos por parte de los trabajadores de la construcción y la comprensión de riesgos, que puede mejorarse mediante una mayor conciencia situacional (18). Garantizar una conciencia situacional adecuada es fundamental para que los trabajadores de la construcción puedan navegar con seguridad en entornos complejos y dinámicos (19). Estudios experimentales en entornos simulados han demostrado que la conciencia situacional puede disminuir en tareas cognitivamente exigentes, como la operación de carretillas elevadoras durante la carga o descarga (20). Estas medidas proactivas sirven como indicadores tempranos de la eficacia de los esfuerzos de seguridad de la empresa. Este estudio subraya la importancia de integrar medidas de seguridad tanto reactivas como proactivas dentro del modelo desarrollado.

Palaniappan et al. (21) propusieron un marco conceptual para evaluar las respuestas de los trabajadores a la cultura de seguridad, empleando un único tipo de agente que represente a los trabajadores. En cambio, nuestro modelo amplía esto incorporando múltiples tipos de agentes y variables de entrada adicionales. Lu et al. (14) examinaron la influencia de las inversiones en seguridad en las tasas de accidentes, incorporando factores como la carga de trabajo y las interacciones agente-entorno. Sin embargo, su modelo no tuvo en cuenta la variabilidad de los riesgos a lo largo del ciclo de vida de la construcción, ni tuvo en cuenta la edad y la experiencia de los empleados. Zhang et al. (22) utilizaron modelado basado en agentes (ABM) para investigar el impacto de las prácticas de gestión de seguridad en la seguridad de los trabajadores analizando un comportamiento inseguro específico. No obstante, las intervenciones tecnológicas de seguridad ni las implicaciones de costes no se abordaron en su estudio.

Partiendo de estas limitaciones, nuestra simulación basada en agentes analiza las interacciones entre empleados, proyectos y sitios para evaluar la eficacia de las estrategias de seguridad preventiva. Nuestro modelo innova integrando variables como la diferenciación del nivel de riesgo basada en el diseño del edificio y el progreso del proyecto, la edad de los empleados y las influencias sociales relacionadas con la antigüedad (años de experiencia). A pesar de la evidencia de Feng et al. (12) y Meng & Chan (23) que destacan la influencia significativa de estos factores en la ocurrencia de accidentes, su incorporación dentro de los marcos ABM sigue sin explorarse. Además, Lu et al. (14) enfatizaron la necesidad de incluir estas variables para avanzar en la comprensión del rendimiento en seguridad. Además, aprovechando tecnologías emergentes, este estudio evalúa la rentabilidad de diversas estrategias de prevención de accidentes.

Este estudio presenta un modelo basado en agentes diseñado para evaluar la eficacia de las estrategias de seguridad en la prevención de accidentes durante la construcción de edificios de apartamentos, incorporando factores convencionales y no convencionales que normalmente se omitieron en análisis previos. Se examinan tres estrategias: 1- fomentar una norma social en la que cada trabajador asuma la responsabilidad de la seguridad de los compañeros; 2- contratar supervisores para hacer cumplir el cumplimiento de las normas de seguridad en el lugar; y 3- desplegar sistemas aéreos no tripulados (UAS), una intervención novedosa no analizada previamente dentro de este marco de modelado. El modelo integra condiciones dinámicas de peligro moldeadas por la evolución del diseño espacial de la obra, así como fenómenos específicos

de los trabajadores, como los procesos de aprendizaje y la heterogeneidad en la conciencia del riesgo. Estas características representan avances significativos en comparación con los estudios existentes. La validación del modelo se realizó mediante comparación con datos de un proyecto de construcción real en Colombia.

Método

Para evaluar el impacto de las acciones de prevención de accidentes en la productividad de seguridad y rendimiento, se desarrolló y calibró un modelo de simulación basado en agentes utilizando datos reales de casos. Los datos reales se recogieron sobre: 1- características del proyecto de construcción (como tipo de proyecto, diseño arquitectónico y dimensiones); 2- inversiones en seguridad (como la frecuencia de las actividades y los salarios del personal pagados); y 3- estadísticas sobre seguridad en el rendimiento (como accidentes mortales y no fatales y bajas por enfermedad o discapacidades temporales o permanentes). Los datos recogidos corresponden a la construcción de un edificio residencial en la ciudad de Cali, Colombia. Estos datos permitían la parametrización de algunas variables de entrada, así como la calibración de aquellas variables que no disponían de información disponible. El modelo fue desarrollado utilizando la plataforma NetLogo® (24).

Estudio de casos

Según Cámara Colombiana de la Construcción – CAMACOL en 2018, considerando que el 65% de los empleados del sector de la construcción trabajan en edificios destinados a uso residencial, se seleccionó un caso práctico como ejemplo común de un proyecto de construcción de apartamentos que consistió en 60 apartamentos distribuidos en 5 plantas; cada planta alberga 12 pisos. La Figura 1 muestra el diseño del edificio y la distribución interior de un apartamento típicamente diseñado y construido.

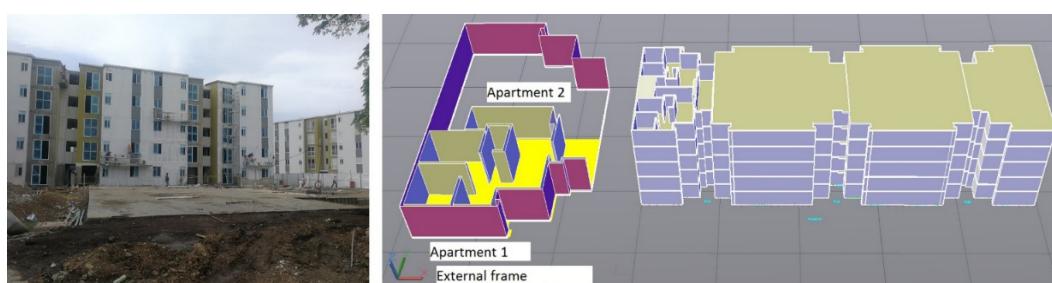


Figura 1. Diseño de edificios y pisos

El vertido de losas monolíticas de hormigón, que simultáneamente se vierten paredes de cimentación y suelos utilizando encofrados, es el sistema que se ha industrializado en la construcción de edificios de apartamentos. Esta fase de la construcción se conoce como 'estructura'. Según estadísticas nacionales, la 'estructura' es la etapa con mayor intensidad de uso de mano de obra por unidad de vivienda (2,3 trabajadores).

Modelo

Un modelo basado en agentes se basa en tres elementos: 1- propiedades, comportamiento y entorno del agente; 2- interacciones de agentes con el entorno; y 3, interacciones de agentes con otros agentes. Por lo tanto, la descripción del modelo se basa en la clasificación de estos tres elementos.

Entorno y agentes

Entorno: el entorno en el que interactúan los agentes representa un edificio en construcción. Este espacio está formado por una cuadrícula de 5x5 celdas, cada una de las cuales representa 1 m². Las celdas espaciales varían en cuanto a cargas de trabajo y peligros; Los niveles pueden variar desde 1 (muy bajo) hasta 10 (muy alto). Inicialmente, se asumió que toda el área compartía las mismas cargas de trabajo, asignándose un valor de 2 unidades; aunque, los niveles de peligro varían según la zona del edificio que se esté construyendo. En la Figura 2, las celdas en blanco indican celdas en las que los agentes no operan, no se necesitan trabajos de construcción y, por tanto, no hay peligros. Las celdas en azul claro representan el interior de los apartamentos, donde el nivel de riesgo es bajo. Del mismo modo, las celdas en negro representan las divisiones dentro de los apartamentos; estos no tienen un nivel de riesgo asociado. Sin embargo, las celdas en azul oscuro representan los bordes exteriores del edificio; Allí, el nivel de peligro es alto debido a los riesgos asociados a caer desde alturas significativas.

Agentes: Los agentes del modelo desarrollado representan a los trabajadores de la construcción, específicamente aquellos que trabajan en la etapa de estructura seleccionada para el estudio. Cada trabajador tiene los siguientes atributos:

Edad: un factor que determina la capacidad del trabajador para influir en el comportamiento de seguridad de sus compañeros.

Influencia social: definida como la capacidad del trabajador para modificar el comportamiento de sus compañeros.

Velocidad: entendida como el número de cargas de trabajo diarias que el trabajador puede realizar.

Conciencia: entendida como el nivel de conciencia del peligro.

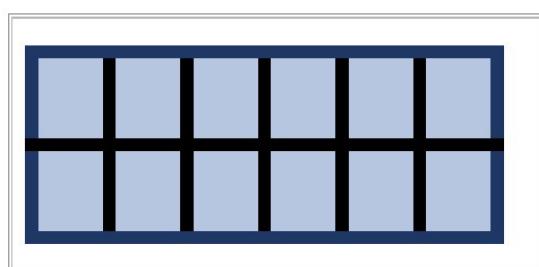


Figura 2. Medio ambiente

Interacciones entre el entorno y los agentes

La interacción entre los agentes y el entorno implica dos rutinas: búsqueda de empleo y control de seguridad. Cada rutina se explica a continuación.

Búsqueda de empleo: cada trabajador se desplaza por todo el edificio en construcción, buscando completar la carga de trabajo móvil de la que es responsable; Luego pasamos a una nueva tarea, una nueva celda. De este modo, y teniendo en cuenta tanto la velocidad del trabajador como la carga de trabajo de la célula, es posible que algunos trabajadores terminen su trabajo antes que otros; así, el mismo día, estos trabajadores pueden pasar a la siguiente célula, antes que los demás agentes. Al comienzo de la simulación, los trabajadores están en el centro del piso #1 en la primera planta. Como se ha indicado, dadas las condiciones auténticas del estudio de caso, los agentes completan un apartamento a la vez.

Comprobación de seguridad: esta comprobación consiste en comparar los riesgos asociados a esa célula con la conciencia de seguridad del trabajador. Si la conciencia del trabajador supera los peligros de la celda, el trabajador aplicará el procedimiento de seguridad y no estará predispuesto a lesiones.

Al inicio de la simulación, todos los agentes son conscientes del peligro incluso de las células más peligrosas involucradas; esto se debe a que la conciencia inicial es igual al máximo peligro. Si el trabajador sufre un accidente que debería resultar fatal (con cierta probabilidad), el trabajador es reemplazado. Si, por otro lado, el accidente resulta no ser fatal, el trabajador permanece inactivo durante el tiempo concedido por su seguro de discapacidad; y no es reemplazado. Además, durante los días asignados por el seguro, el trabajador no podrá realizar ninguna actividad ni contribuir al trabajo en curso.

Tanto la probabilidad de sufrir un accidente mortal como la gravedad de un accidente no fatal aumentan de una manera directamente relacionada con el número de plantas que se están construyendo. Cuanto más alto es el edificio, mayor es el número de accidentes mortales. Sin embargo, en modelos de investigación anteriores (14)(22), el progreso del trabajo no altera la exposición al peligro, se asume que es constante; sin embargo, diferentes estudios reconocen su naturaleza dinámica (25). Por lo tanto, este efecto se ha incluido en nuestro modelo.

Nuestro modelo simulado calcula los costes totales implicados debido a los accidentes que se producen durante la fase estructural del proyecto. En la Figura 3 presentamos el diagrama de flujo para el proceso de toma de decisiones del trabajador, que incluye las dos rutinas principales explicadas anteriormente: color azul para la rutina de búsqueda de tareas y color amarillo para la rutina de comprobación de seguridad.

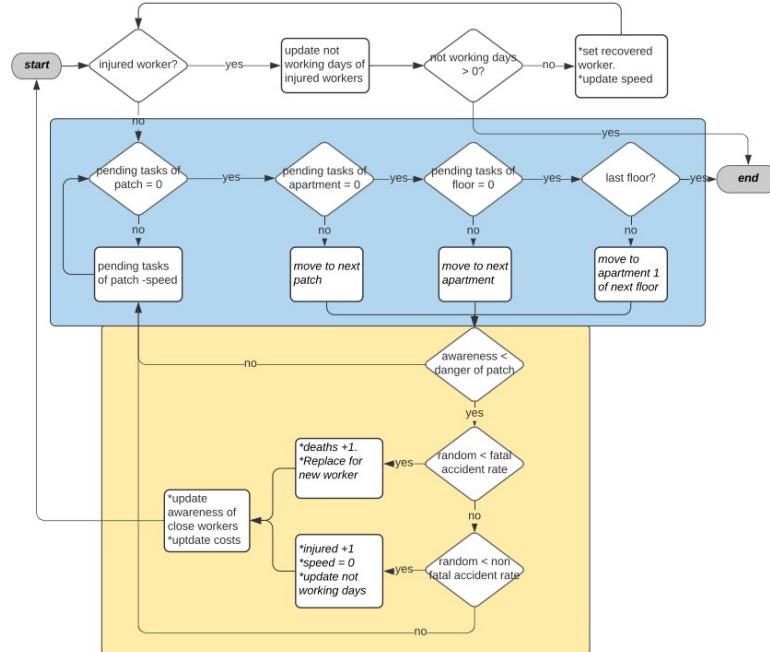


Figura 3. Reglas de decisión de los trabajadores.

Fíjate que tanto dentro como fuera de las rutinas actualizamos las propiedades de los trabajadores y las variables globales de rendimiento de seguridad del proyecto, como costes, muertes y trabajadores lesionados. Explicamos estos mecanismos con más detalle en las siguientes secciones.

Evolución de las propiedades del agente

La conciencia de los trabajadores aumenta con algunos eventos. Los accidentes no mortales afectan no solo al nivel de conciencia del trabajador lesionado, sino también al nivel de conciencia de los compañeros que trabajan en las proximidades del lugar donde ocurrió el accidente. Esto determina cómo, tras el accidente no mortal, la conciencia de los compañeros del trabajador lesionado aumenta en 10 unidades (el mismo valor que el nivel inicial de conciencia). Así, el nivel de conciencia de los trabajadores que presenciaron el accidente es el de 10 unidades añadidas al nivel de conciencia que tenía el trabajador en ese momento. Como resultado, quienes presenciaron el accidente se vuelven mucho más atentos a las recomendaciones de seguridad en el futuro. Además, cuando el trabajador lesionado regresa al trabajo, su nivel de conciencia habrá aumentado en 20 unidades (el doble del nivel inicial de conciencia).

HSI de igual modo, cuando ocurre un accidente mortal, el aumento en la conciencia de aquellos compañeros del fallecido que continúan trabajando cerca del lugar en cuestión es cuatro veces mayor que el estado inicial; evidencia de susceptibilidad a un impacto mucho mayor que un accidente no mortal, un impacto de 40 unidades. En cualquier caso, la conciencia de los agentes sobre los peligros disminuye naturalmente con el paso del tiempo. Esto pone de relieve el hecho de que, al principio del proyecto, los trabajadores siguieron las recomendaciones de seguridad en mucha mayor medida que al final del proyecto. Esto refleja una conciencia decreciente o una preocupación decreciente cuando se enfrenta al peligro. Se asume que día a día, la conciencia

del trabajador disminuye naturalmente hasta en 2 unidades; que al final de 5 días de trabajo, el trabajador no cumplirá ninguna de las normas de seguridad. Para contrarrestar este fenómeno, es práctica habitual que las empresas constructoras den breves charlas sobre medidas de seguridad varias veces por semana. La modelización de esta estrategia, ya inmersa en los datos del caso real, aumenta la conciencia de los trabajadores en 2 unidades por charla (coincidiendo con la conciencia que se pierde a diario; así, estas charlas proporcionan la conciencia diaria necesaria).

Variables input

Basándose en la información recopilada y basada en el estudio de caso, se obtuvieron las siguientes estadísticas:

- La duración de la fase de construcción de la estructura fue de 75 días de trabajo activo.
- Los trabajadores podían completar 1 apartamento por turno
- Se registraron un total de 9 accidentes no mortales y 0 accidentes mortales.
- El número total de días de incapacidad, según los 9 accidentes, fue de 127.

Según esto, la tasa de accidentes no mortales en el trabajo es del 47,4%. Esto equivale a una tasa diaria de accidentes del 0,63%. Sin embargo, usando esta proporción en un modelo de simulación cuyo paso de tiempo se indica en días, parecería que todas las células que se mueven en el espacio están en riesgo. Por lo tanto, la tasa de accidentes utilizada para el modelo debe reflejar el hecho de que no todas las celdas del espacio operan con alto riesgo; las de alto riesgo serían solo aquellas que trabajan en los bordes del edificio (98 de 555 celdas, lo que corresponde al 18% del espacio); en este sentido, la tasa de accidentes utilizada en el modelo es del 3,6% (0,63% / 18%). Aunque este sitio de construcción no sufrió accidentes mortales, el modelo tuvo en cuenta la tasa de mortalidad del sector de la construcción colombiano.

Las proporciones reales de casos en días de ausencias relacionadas con discapacidad debido a accidentes laborales son de 14,1. No obstante, estos datos no clasifican las ausencias según el piso en el que ocurrió el accidente. Para corregir esta falta de información, el número de días calculados dentro del modelo según la gravedad del accidente utiliza un factor que se multiplica por el número de plantas, por ejemplo, suponiendo que el factor es 5, una caída desde la cuarta planta supondrá 20 días de ausencia relacionada con la discapacidad. Del mismo modo, una caída desde la primera planta supondrá una ausencia relacionada con una discapacidad de 5 días. Con esta modificación, el número medio de días de ausencias relacionadas con la discapacidad es 15, un valor razonablemente cercano a la realidad (el valor exacto se lograría mediante un factor de 4,7 días en lugar de 5 días; sin embargo, esto no tiene sentido para un modelo cuyo avance del paso temporal se calcula en días completos).

Variables de rendimiento de seguridad del proyecto

El modelo monitoriza constantemente seis variables de rendimiento del proyecto:

- Duración: tiempo necesario para completar todo el trabajo durante la fase de estructura.
- Índice de frecuencia: estandarizado para un trabajo de 100 trabajadores que trabajan un total

de 240.000 horas al año.

- Índice de gravedad: estandarizado para un puesto de 100 trabajadores que trabajan un total de 240.000 horas al año.
- Costes de seguridad: costes diarios de las medidas de seguridad implementadas en el sitio, por trabajador.
- Costes de accidente: costes diarios de accidentes in situ, incluyendo accidentes mortales y no mortales, por trabajador.
- Costes totales: los costes diarios totales de las medidas de seguridad en el trabajo incluyen los costes de la estrategia de seguridad así como el coste de accidentes por trabajador.

Tabla 1. Conjunto de variables consideradas en el modelo.

Variable	Descripción	Valor	Fuente
W#	Número de trabajadores de la construcción	19 Distribución del poder entre 20 y	Estudio de casos
Edad	Edad de los trabajadores	40 años. El 70% de los trabajadores tiene menos de 30 años.	Estudio de casos
Accidentes diarios no mortales	Probabilidad diaria de un accidente no mortal	3.6%	Estudio de casos
Accidentes mortales	Probabilidades diarias de un accidente mortal	0.06%	Estudio de casos
Tasa de gravedad debida a accidentes no mortales	Días perdidos por discapacidades asignados a cada accidente no mortal	5 días x altura del suelo	Estudio de casos
Tasa de gravedad debida a accidentes mortales	Días asignados al año debido a cada accidente mortal	6000 días	ICONTEC NTC3701
Coste / accidente no F	Coste por accidente no mortal	222 \$ (USD)	(26,27)
Accidente de coste / accidente	Coste por fatal accidente	\$125000 (USD)	Ministerio de Trabajo de Colombia. Salario mínimo para 2020. En efecto. Salarios
Costes de las charlas de formación	Discurso de coste por formación	12 dólares (USD)	de supervisores de construcción en Colombia
Charlas por semana	Número de charlas de formación por semana	3	Estudio de casos

Resultados y discusión

Esta sección presenta los hallazgos de la simulación de casos de referencia, basada en 5.000 iteraciones para asegurar baja varianza y significación estadística.

Resultados de los casos de referencia

La Tabla 2 resume los resultados de la simulación de referencia. El modelo estima una duración media del proyecto de 74 días, con un índice de frecuencia de 167 accidentes y un índice de gravedad de 2.400 días laborales perdidos. Estos valores se desvían menos del 1,5% de los datos reales del proyecto, lo que respalda la validez del modelo.

Tabla 2. Resultados del caso base

Variable	Real	Promedio	IC 95% - límite inferior	IC 95%- límite superior
Largura	75	74.1	74.0	74.3
Frecuencia	168	167.0	165.4	168.6
Severidad	2377	2400.1	2374.8	2425.4
Conciencia	NR	279.3	271.9	286.7
Coste de seguridad	NR	0.31	0.31	0.31
Coste por accidente	NR	21.14	20.77	21.52
Coste total	NR	21.45	21.08	21.83

Los costes diarios por trabajador son aproximadamente 21,45 USD, compuestos por 21,14 USD relacionados con los costes de accidentes y 0,31 USD atribuidos a estrategias de prevención (por ejemplo, sesiones de formación en seguridad bidiarias). La media de la conciencia sobre la seguridad laboral se cuantifica en 279,3 unidades de sensibilización.

Las 5.000 simulaciones revelan variabilidad en los resultados debido a la estocasticidad inherente. La Figura 3 muestra las distribuciones de las métricas clave de rendimiento en seguridad. La duración del proyecto fluctúa entre 62 y 96 días (Figura 4a), con el 95% de las simulaciones que no superan los 74 días, consistente con las duraciones típicas de fases estructurales en los proyectos de construcción colombianos.

El índice de frecuencia varía entre 75 y 250 accidentes (Figura 4b), con frecuencias más bajas correlacionadas con duraciones de proyectos más cortas. La gravedad se analizó por separado para los casos sin accidentes mortales (97%, Figura 4c) y aquellos con accidentes mortales (3%, Figura 4d). En el caso de la primera, la gravedad promedia fue de 2.281 días laborales perdidos; en este último, la gravedad oscilaba entre 6.000 y 9.000 días.

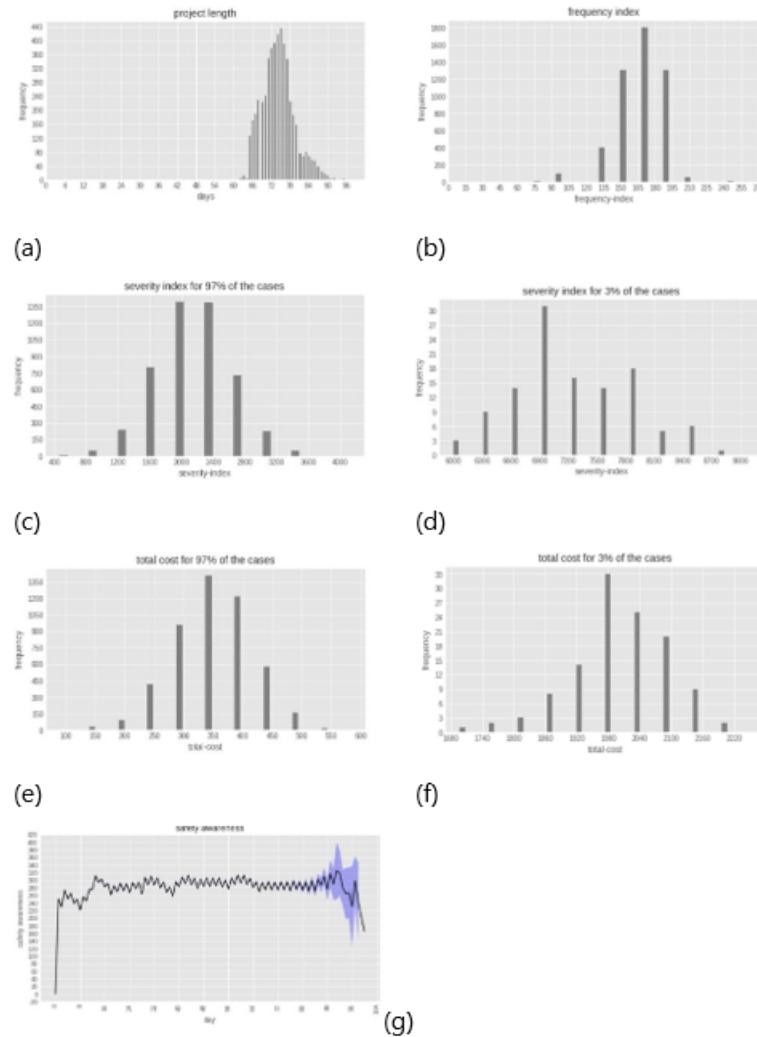


Figura 4.

Nota: (a) Duración del proyecto; (b) Índice de frecuencia; (c) Índice de gravedad para el 97% de los casos; (d) Índice de gravedad para el 3% de los casos; (e) Coste total del 97% de los casos; (f) Coste total del 3% de los casos; (g) Concienciación sobre la seguridad.

La conciencia sobre la seguridad tiende a disminuir con el tiempo debido a la mayor confianza de los trabajadores y la reducción de comportamientos de autoprotección, pero se refuerza periódicamente mediante formación, advertencias o accidentes, lo que resulta en patrones oscilatorios de conciencia (Figura 4g). La conciencia fluctúa dentro de un rango estable de aproximadamente 220 a 320 unidades.

Los costes totales por trabajador varían significativamente según la gravedad del accidente. En simulaciones sin fallecimientos (97%), los costes oscilan entre 7,9 y 28,9 USD por día, mientras que las simulaciones con fallecimientos (3%) reportan costes entre 88,4 y 116,8 USD por día.

La Figura 5 ilustra las interrelaciones entre frecuencia, gravedad y duración del proyecto. Los proyectos con índices de frecuencia y gravedad más altos presentan duraciones prolongadas

(Figuras 4a y 4b). Se observó una relación lineal directa: duplicar el índice de frecuencia extiende la duración del proyecto en un 25%, mientras que duplicar la severidad incrementa la duración en un 17%, en línea con la literatura existente sobre los impactos en la seguridad en retrasos en la construcción (28).

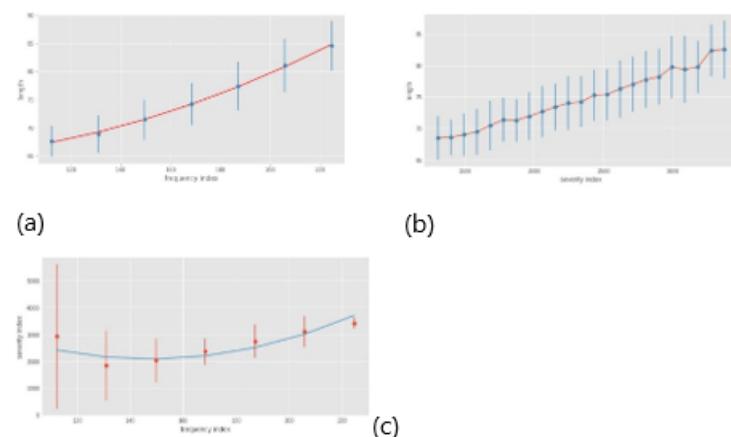


Figura 5. Interacciones entre frecuencia, gravedad y duración.

Nota: (a) Duración frente al índice de frecuencia; (b) Duración del tiempo frente al índice de severidad; (c) Índice de severidad frente a índice de frecuencia. La longitud de las barras verticales indica la variabilidad en los resultados obtenidos, lo que indica un promedio de todas las simulaciones.

Se observa que aquellos proyectos que presentan índices más altos, tanto en severidad como en frecuencia, duran más (véase las Figuras 5a y 5b). La relación entre estas variables es directa y lineal. Así, cuando el índice de frecuencia se duplica, la duración del proyecto aumenta un 25%, y cuando el índice de severidad se duplica, la duración del proyecto aumenta un 17%. Este hallazgo es coherente con lo que indican otros autores respecto a la incidencia del rendimiento en seguridad en retrasos de construcción (28)(29).

Curiosamente, la relación frecuencia-severidad muestra una curva en forma de U (Figura 5c), con la severidad mínima cerca de los valores de frecuencia media. Este patrón sugiere que, aunque una mayor frecuencia de accidentes generalmente aumenta la gravedad debido a más días de trabajo perdidos, algunos proyectos con baja frecuencia siguen experimentando una gravedad elevada, a menudo debido a accidentes mortales, que posteriormente aumentan la concienciación de los trabajadores y reducen la frecuencia de accidentes.

Validación de modelos

No es tarea trivial validar un modelo individual que representaría un sistema social. No existe un procedimiento estándar que pueda lograr esto; Sin embargo, existe un conjunto de técnicas fragmentadas destinadas a aumentar la confianza en el modelo. Una exploración general del

modelo evidenció el comportamiento adecuado respecto a la evolución de las principales variables de estado (técnicas de animación y gráficos operacionales). La Figura 6 muestra los gráficos de una de las muchas simulaciones que se realizaron.

Podemos observar que el índice de frecuencia, el índice de gravedad y el número de accidentes aumentan con el tiempo, mientras que el trabajo pendiente en el proyecto de construcción disminuye con el paso de los días, hasta alcanzar cero en el día 74. La conciencia media entre los trabajadores oscila a medida que pasan los días (factor negativo), a medida que se llevan a cabo charlas (efecto positivo) y a medida que ocurren accidentes laborales (efecto positivo). Por tanto, se puede observar que el número de trabajadores implicados en el proyecto se mantiene constante en el tiempo (es decir, no hay nuevos trabajadores, ni los trabajadores iniciales se marchan). Cabe señalar que aquellos trabajadores incapacitados siguen siendo reconocidos como trabajadores de la empresa. También debe señalarse que el número de trabajadores incapacitados, así como los que no lo están, constituyen el total de trabajadores de la empresa. Mantener la masa contribuye a la validación del modelo.

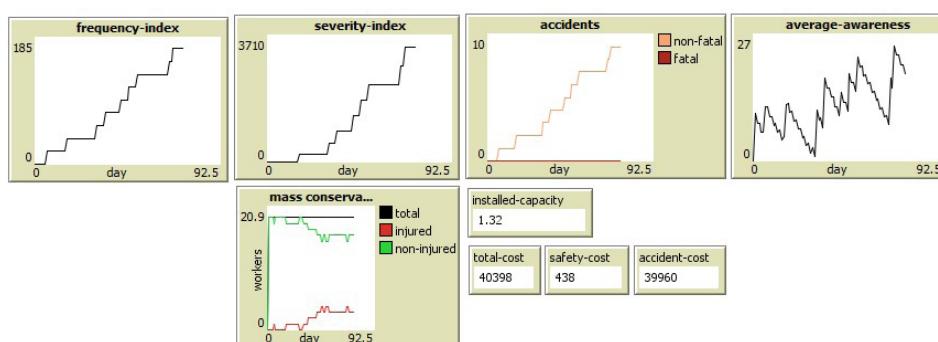


Figura 6. Animación, gráficos operativos y pruebas de validación masiva de conservación

Se llevó a cabo una prueba degenerada. En esta prueba, el efecto de riesgo dinámico se anuló siendo reemplazado por un riesgo fijo en el que, ignorando la altura del suelo que se estaba construyendo; La gravedad de cada accidente fue de 15 días (el valor medio del riesgo dinámico). Para comprender con mayor detalle los efectos de este riesgo dinámico, se analizaron las tablas mediante simulación temporal. La Figura 7 presenta los resultados de este análisis respecto a las variables de frecuencia y gravedad.

Cabe señalar que un riesgo fijo hipotético tiene un impacto insignificante en el índice de frecuencia de la construcción. Sin embargo, esta hipótesis sobreestima el índice de severidad durante la primera mitad de la construcción, mientras que lo subestima durante la segunda mitad. En consecuencia, el riesgo fijo hipotético subestima significativamente el índice final de severidad de la construcción, pasando de 2400 a 2043 de acuerdo con el riesgo fijo hipotético (una subestimación del 14,9%).

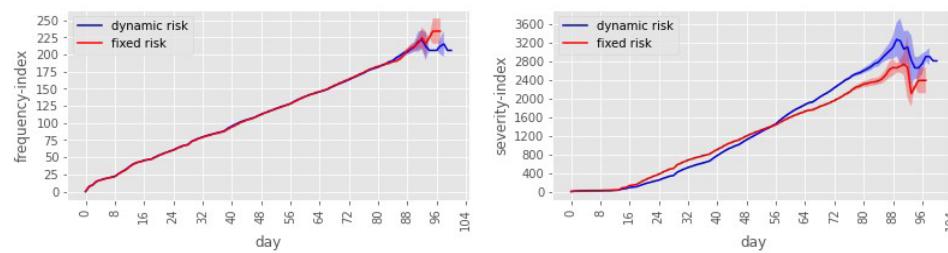


Figura 7. Efecto del riesgo dinámico. Prueba degenerada para validación

Esta misma prueba se aplicó para anular el efecto de la influencia social según la experiencia debida a la edad del trabajador. Los resultados se muestran a continuación en la Figura 8. Cuando se completa la construcción, el valor medio de los índices de frecuencia y severidad que repudian el efecto de la influencia debida a la experiencia puede encontrarse dentro del intervalo de confianza de los índices al considerar dicho efecto. En otras palabras, la inclusión del efecto de la influencia debida a la experiencia tiene un efecto negativo tanto sobre los índices de frecuencia como sobre la disciplina de la construcción.

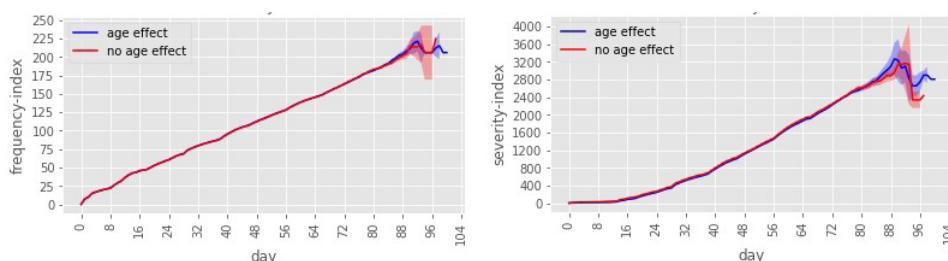


Figura 8. Efecto de la influencia por la experiencia. Prueba degenerada para validación

Como los modelos de agentes requieren el desarrollo de un código, se desarrollaron otras técnicas para la validación. Ejemplos de esto eran las marcas de rastros y la revisión de escritorio. Estos resultados demostraron satisfactorios. Correspondientemente, los resultados del modelo se compararon con los resultados obtenidos en estudios realizados por otros (14)(16); estos resultados resultaron satisfactorios. Sin embargo, no fue posible realizar una comparación de códigos porque los códigos modelo según la literatura no estaban disponibles.

La comparación entre valores históricos y simulaciones de variables de salida como longitud, frecuencia y severidad constituyó una prueba sobre la validez histórica del modelo. Según las empresas constructoras Bolívar y Normandia en Colombia, la continua consulta con expertos sobre este problema aumenta su validez mediante la técnica de validez facial. Las numerosas simulaciones realizadas para capturar la estocasticidad de los resultados debido a la aleatoriedad

de las variables de entrada forman parte de la validez interna. Por último, la posibilidad de incluir políticas de mejora en el modelo y de realizar análisis teniendo en cuenta los indicadores estandarizados del fenómeno contribuye a generar confianza en el modelo.

Estrategias de prevención

Se modelaron tres intervenciones preventivas para evaluar su impacto en la seguridad y la productividad:

Iniciativa social

Esta estrategia asigna a cada trabajador la responsabilidad de la seguridad de los compañeros cercanos en un radio de 1 m². Al mover células, un trabajador advierte al compañero más cercano con mayor discrepancia entre la conciencia y el riesgo de caída, aumentando la conciencia de seguridad de ese compañero en 3 a 7 unidades dependiendo de la influencia social, que se correlaciona con la experiencia laboral y la edad. Aunque es gratuita, esta estrategia puede resultar difícil de implementar en la práctica.

Supervisores de construcción encargados de la salud y seguridad laboral

Se contratan dos supervisores de construcción encargados de la salud y seguridad ocupacional para inspeccionar la práctica de las normas de seguridad en el terreno. En el modelo, los supervisores son un nuevo tipo de agente que no trabaja en construcción, sino que se mueve constantemente entre los trabajadores. En cada ronda, el supervisor selecciona al trabajador más cercano dentro de su ámbito de acción (10 m² circundantes) que muestre la mayor diferencia entre la conciencia de la seguridad y el riesgo de caídas. Al ser advertido sobre las normas de seguridad a seguir, la conciencia de dicho trabajador aumenta en 8 unidades, valor que responde a la evaluación de los expertos consultados. Es importante señalar que las advertencias dadas por los supervisores que han recibido la autoridad para inspeccionar los estándares de seguridad son mucho más influyentes que los consejos y advertencias dados por los trabajadores más experimentados. Según plataformas como Indeed Colombia, esta acción exige el coste del salario que ahora debe pagarse a los supervisores; Costes que también deben incluir beneficios sociales.

Drones

Esta acción emplea dos drones para inspeccionar las normativas de seguridad que se están aplicando en el terreno. Se elige a favor del dron multirrotor. Este tipo de dron fue recomendado en nuevos estudios realizados sobre los posibles usos de los drones según sus especificaciones técnicas (30). De forma similar a lo que ocurre con los supervisores, en el modelo los drones son un nuevo tipo de agente que no trabaja en la construcción, sino que se mueve constantemente entre los trabajadores, con cada movimiento seleccionando al trabajador más cercano en su esfera de acción (5m², la mitad de la esfera de acción del supervisor), lo que marca la mayor diferencia entre la conciencia y el riesgo de caída. Al advertir al trabajador sobre las normas de seguridad que deben seguirse, su conciencia aumenta en x unidades. Dado que esta política no se ha implementado en los empleos de la construcción en Colombia, no se sabe la influencia social que podría tener el dron; Por lo tanto, se realizaron dos análisis: (a) la influencia del dron es = hasta 8 unidades de conciencia (tanto como la de un supervisor); y (b) la influencia de los drones es =

hasta 4 unidades de conciencia (la mitad de la influencia de un supervisor, que corresponde a la influencia social media que aprovechan los trabajadores). Esta acción conlleva los costes de la compra del dron y la suposición de que la vida útil de dicho dron sería de 36 meses de acuerdo con sus especificaciones técnicas y su eventual obsolescencia tecnológica. La Tabla 3 muestra los parámetros básicos necesarios para modelar estas acciones.

Tabla 3. Parámetros de las estrategias preventivas contenidas en el modelo

Variable	Descripción	Valor
Radio social	Radio de influencia de los trabajadores	1 m ²
Influencia social mínima	Mínima influencia ejercida por un trabajador	3 unidades de conciencia de seguridad
Máxima influencia social	Máxima influencia ejercida por un trabajador	7 unidades de conciencia de seguridad
Supervisor de radio	Radio de influencia del supervisor	10 m ²
Supervisor's impact	Impacto del supervisor	8 unidades de conciencia de seguridad
Supervisor's cost por month	Coste mensual de un supervisor	200 \$ (USD) / mes
Radio de drones	Radio de influencia del dron	5 unidades de conciencia de seguridad 4 y 8 unidades de concienciación de seguridad
Impacto de dron	Impacto del dron	concienciación de seguridad
Coste mensual del dron	Coste mensual del dron	70 \$ (USD)

Una vez más, se obtuvieron 5000 simulaciones para cada una de las tres estrategias de prevención modeladas. Para facilitar su comparación, los resultados se representaron en una escala logarítmica y se utilizó un gráfico tipo radar para representarlos. Esto puede observarse en la Figura 9.



Figura 9. Comparación de acciones preventivas

Las cuatro estrategias analizadas obtuvieron mejores resultados que el caso base respecto a las siguientes variables: duración, gravedad, conciencia de la seguridad y frecuencia. Además, esto condujo a mejores resultados en los costes de accidentes y en los costes totales. La estrategia de coste total más bajo es la estrategia de norma social; sin incurrir en inversión monetaria adicional, disminuye los índices de frecuencia y severidad, presentando el coste total más bajo de las estrategias (0,42 \$ (USD) por día por empleado, una reducción de más del 95% de los costes). Esto es coherente con el argumento de (12) y (13): cuanto mayor es la conciencia de seguridad de los trabajadores gracias a una buena cultura de seguridad, menor será la tasa de accidentes. Además, esta estrategia reduce el tiempo medio de finalización de la obra en 65 días; una ganancia de 10 días, lo que representa el 12% del tiempo necesario para completar la etapa de estructura de este proyecto. El uso estratégico de drones y supervisores requiere inversiones adicionales en el caso base (3% y 268% respectivamente). Es evidente que cuanto mayor sea la inversión en seguridad, menos se logra el mejor rendimiento en seguridad. Sin embargo, el impacto positivo en la seguridad de los supervisores reduce el coste total del proyecto en un 56% en comparación con el coste del caso base.

La efectividad de los drones dependerá de la influencia que tengan sobre los trabajadores. Como indica el punto (31), si no se tienen en cuenta los factores psicológicos que afectan al comportamiento de los trabajadores, el uso de la tecnología no generará los efectos deseados. Si el impacto de los drones es el mismo que el del supervisor, los costes totales del proyecto se reducirían en un 59%, convirtiéndolo en la segunda estrategia más rentable, incluso por encima del uso de supervisores. Si, por otro lado, el impacto de los drones es solo la mitad del impacto de los supervisores, los costes totales del proyecto se reducirían en un 23% y su efectividad sería menor que la de los supervisores.

Conclusiones

El sector de la construcción sigue mostrando altas tasas de accidentes a pesar de los considerables esfuerzos de las empresas para mitigarlos. Las inversiones en estrategias de prevención no siempre generan mejoras proporcionales en los resultados de seguridad. Aunque numerosos estudios han examinado los factores que influyen en los accidentes y han evaluado el impacto de las prácticas tradicionales de prevención, pocos han aprovechado las ventajas de la modelización computacional—especialmente en la representación de la heterogeneidad de los empleados y las complejas interacciones entre factores que influyen en accidentes—mientras evalúan simultáneamente tecnologías emergentes en la prevención de accidentes.

En este estudio, desarrollamos un modelo de simulación basado en agentes para representar la dinámica de los accidentes durante la fase estructural de la construcción de edificios. El objetivo era identificar estrategias con mayor potencial para reducir la frecuencia, gravedad, duración y costes asociados de los accidentes durante esta fase. El modelo se calibró utilizando datos de un estudio de caso real, estableciendo un escenario base para un análisis exhaustivo.

Nuestros resultados demuestran que las tres estrategias evaluadas contribuyeron a la mejora de los indicadores de seguridad del proyecto. Estos hallazgos sugieren que los proyectos de construcción pueden mejorar el rendimiento en seguridad implementando estas intervenciones. Cabe destacar que el estudio confirma que niveles de inversión más altos en prevención de accidentes no garantizan necesariamente resultados superiores en la seguridad. Los hallazgos clave incluyen: 1- la estrategia de normas sociales —donde los trabajadores asumen la responsabilidad de la seguridad de sus compañeros— requiere la menor inversión mientras se logran los niveles más altos de conciencia sobre seguridad, productividad (medida como duración del proyecto) y rendimiento general en seguridad; 2- El uso de drones para la inspección del sitio durante la fase estructural tiene un impacto positivo en la seguridad, superando la supervisión basada en supervisores cuando la influencia conductual de las alertas de seguridad generadas por drones es comparable a la de los supervisores. Sin embargo, la evidencia empírica sobre esta influencia social en condiciones reales sigue siendo limitada; 3- incorporar niveles dinámicos de peligro que evolucionan a lo largo del proceso de construcción es fundamental para capturar con precisión los fenómenos de accidentes; y 4- incluir la edad y antigüedad del trabajador en el modelo no afectó significativamente a los resultados, ya que los escenarios con y sin estas variables producían resultados esencialmente equivalentes.

Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: Luis A. Saavedra-Robinson, Kathleen Salazar-Serna, Lorena Cadavid.
Curación de datos: Luis A. Saavedra-Robinson, Kathleen Salazar-Serna, Lorena Cadavid. **Análisis formal:** Luis A. Saavedra-Robinson, Kathleen Salazar-Serna, Lorena Cadavid. **Investigación:** Luis A. Saavedra-Robinson, Kathleen Salazar-Serna, Lorena Cadavid. **Metodología:** Luis A. Saavedra-Robinson, Kathleen Salazar-Serna, Lorena Cadavid. **Gestión del Proyecto:** Luis A. Saavedra-Robinson, Kathleen Salazar-Serna, Lorena Cadavid. **Recursos:** Luis A. Saavedra-Robinson, Kathleen Salazar-Serna, Lorena Cadavid. **Software:** Lorena Cadavid. **Supervisión:** Luis A. Saavedra-Robinson, Kathleen Salazar-Serna, Lorena Cadavid. **Validación:** Luis A. Saavedra-Robinson, Kathleen Salazar-Serna.
Redacción - borrador original - Elaboración: Luis A. Saavedra-Robinson, Kathleen Salazar-Serna, Lorena Cadavid. **Redacción - revisión y edición - Elaboración:** Luis A. Saavedra-Robinson, Kathleen Salazar-Serna.

Financiamiento: Sí. Beca de investigación Pontificia Universidad Javeriana-Cali [2018-1007]

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses relacionados con esta investigación. Aspecto ético: no declara.

Referencias

1. Zhu R, Hu X, Wei A, Yang W, Ji F. Medición del desempeño en seguridad de los empleados de la construcción mediante análisis de envolvimiento de datos: un caso en Australia. *J Safety Res.* 2024 1 de febrero;88:293-302. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.11.016>

2. Khalid U, Sagoo A, Benachir M. Desarrollo del marco del Sistema de Gestión de Seguridad (SMS) - Mitigación de los factores críticos de seguridad que afectan al desempeño en Salud y Seguridad en proyectos de construcción. *Saf Sci.* 2021 1 de noviembre 1;143:105402. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105402>
3. Amo Larbi J, Tang LCM, Amo Larbi R, Abankwa DA, Darko Danquah R. Desarrollo de un marco integrado de entrega digital y una guía de flujo de trabajo para la gestión de la seguridad en la construcción en un sistema de entrega de proyectos. *SAF Sci.* 2024 1 de julio;175:106486. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106486>
4. Rafindadi AD u., Napiah M, Othman I, Mikić M, Haruna A, Alarifi H, et al. Análisis de las causas y medidas preventivas de accidentes mortales relacionados con caídas en la industria de la construcción. *Revista de Ingeniería Ain Shams.* 1 de junio de 2022; 13(4):101712. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101712>
5. Montilla J. ¿Cómo ha estado la siniestralidad laboral en el sector de la construcción? 2021. <https://ccs.org.co/portfolio/como-ha-estado-la-siniestralidad-laboral-en-el-sector-de-la-construcion/>
6. Hernández J, Neves dos Santos J, Hernández J, Neves dos Santos J. Análisis y clasificación iberoamericana de la accidentalidad laboral en la industria de la construcción civil. *Revista ingeniería de construcción [Internet].* 2020 Aug [cited 2025 Oct 15]; 35(2):135-47. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732020000200135>
7. Ma Y, Zhao Q, Xi M. Toma de decisiones en inversión en seguridad: una perspectiva de coste de oportunidad. *Ciencias de la Seguridad* 2016; <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.11.008>
8. Yilmaz M, Kanit R. Una herramienta práctica para estimar los costes obligatorios de SST en proyectos de construcción de edificios residenciales en Turquía. *Saf Sci.* 2018; 101:326-31. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.09.020>
9. Hoła B, Nowobilski T, Szer I, Szer J. Identificación de factores que afectan a la tasa de accidentes en la industria de la construcción. En: *Ingeniería Procedia.* Elsevier Ltd; 2017. p. 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.018>
10. Hallowell MR, Gambatese JA. Mitigación de riesgos de seguridad en la construcción. *J Constr Eng Manag [Internet].* 1 de diciembre de 2009; 135(12):1316-23. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000107](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000107)
11. Seo S, Park H, Koo C. Impacto de los elementos de aprendizaje interactivo en el rendimiento del aprendizaje personal en realidad virtual inmersiva para la formación en seguridad en la construcción. *Aplicación de Sistemas Expertos* 2024 1 de octubre;251:124099. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124099>

12. Feng Y, Teo EAL, Ling FYY, Low SP. Explorando los efectos interactivos de las inversiones en seguridad, la cultura de seguridad y el riesgo de proyectos en el rendimiento en seguridad: un análisis empírico. *International Journal of Project Management* [Internet]. 2014; 32(6):932-43. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.10.016>
13. Bautista-Bernal I, Quintana-García C, Marchante-Lara M. Cultura de seguridad, desempeño en seguridad y desempeño financiero. Un estudio longitudinal. *Ciencias de la Seguridad* 2024 abr. 1;172:106409. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106409>
14. Lu M, Cheung CM, Li H, Hsu SC. Comprensión de la relación entre la inversión en seguridad y el desempeño en seguridad de proyectos de construcción mediante modelado basado en agentes. *Accid Anal Prev.* 2016 Sep 1;94:8-17. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.05.014>
15. Liao L, Liao K, Wei N, Ye Y, Li L, Wu Z. Una evaluación holística de la aplicación de la ergonomía en la investigación de salud, seguridad y gestión ambiental para trabajadores de la construcción. *Ciencia de la Seguridad* 2023 1 de septiembre;165:106198. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106198>
16. Chen Y, Zhang J, Min BC. Aplicaciones de BIM y UAV a la seguridad en la construcción. En: Conferencia Anual de la CSCE. Montreal; 2019. https://legacy.csce.ca/elf/apps/CONFERENCEVIEWER/conferences/2019/pdfs/PaperPDFversion_254_0516023142.pdf
17. Macal CM, diputado del norte. Tutorial sobre modelado y simulación basada en agentes. *Revista de Simulación*. septiembre de 2010; 4(3):151-62. <https://doi.org/10.1057/jos.2010.3>
18. Kim S, Lee H, Hwang S, Yi JS, Son J. Concienciación de los trabajadores de la construcción sobre la información sobre seguridad dependiendo de la carga física y mental. *Revista de Arquitectura Asiática e Ingeniería de la Edificación* [Internet]. 4 de mayo de 2022; 21(3):1067-77. <https://doi.org/10.1080/13467581.2021.1908899>
19. Fang Y, Cho Y. Medición de la conciencia situacional del operador en la operación inteligente de grúas. En 2017. <https://doi.org/10.22260/ISARC2017/0013>
20. Choi M, Ahn S, Seo JO. Investigación basada en realidad virtual sobre la conciencia situacional de los operadores de carretillas elevadoras para prevenir accidentes de colisión. *Accid Anal Prev.* 2020 1 de marzo;136:105404. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105404>
21. Palaniappan S, Sawhney A, Janssen MA, Walsh KD. Modelar la seguridad en la construcción como un fenómeno emergente basado en agentes. En: Automatización y Robótica en la Construcción - Actas del 24º Simposio Internacional sobre Automatización y Robótica en la Construcción. 2007. p. 375-82. <https://doi.org/10.22260/ISARC2007/0063>
22. Zhang P, Li N, Jiang Z, Fang D, Anumba CJ. Un enfoque de modelización basada en agentes para comprender el efecto de las interacciones entre trabajadores y la dirección en los comportamientos relacionados con la seguridad de los trabajadores de la construcción. *Contrar. Autom* 2019 En; 97:29-43. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.015>

23. Meng X, Chan AHS. Influencias demográficas en la conciencia de seguridad y el comportamiento de ciudadanía de seguridad de los trabajadores de la construcción. *SAF Sci.* 2020 1 de septiembre;129:104835. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104835>
24. Willensky U. NetLogo. Universidad Northwestern: El Centro de Aprendizaje Conectado (CCL) y Modelado Basado en Ordenador; 2012. <https://ccl.northwestern.edu/>
25. Kim K, Cho Y, Zhang S. Integración de secuencias de trabajo y estructuras temporales en la planificación de seguridad: Identificación y prevención automatizada de riesgos relacionados con andamios en BIM. *Contrar. Autom* 2016 1 de octubre;70:128-42. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.06.012>
26. Acevedo K, Yáñez M. Costos de los accidentes laborales: Cartagena - Colombia 2009-2012. *Ciencias Psicológicas*. 2016; 10(1). <http://www.scielo.edu.uy/pdf/cp/v10n1/v10n1a04.pdf>
27. Vargas P. El Dane informó que la variación mensual del IPC para octubre se ubicó en 0,16%. *La República*. 2019; <https://www.larepublica.co/economia/el-dane-informo-que-la-inflacion-para-octubre-se-ubico-en-0-16-2929191>
28. Muralidhar P, Regidor Jain, Srivasta B, Rao VPC. Análisis del retraso en la ejecución de proyectos de construcción. Escuela de Ingeniería Civil, Ciencia y Tecnología. 2018; 9(1):41-9. <https://doi.org/10.33736/jcest.880.2018>
29. Xie L, Wu S, Chen Y, Chang R, Chen X. Un enfoque de razonamiento basado en casos para resolver problemas de retraso en el calendario en proyectos de construcción prefabricados. *Contraintendencia* 2023 1 de octubre;154:105028. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105028>
30. Li Y, Liu C. Aplicaciones de las tecnologías de drones multirrotor en la gestión de la construcción. *International Journal of Construction Management [Internet]*. 2019; 19(5):401-12. <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1452101>
31. Lingard H, Rowlinson S. Salud y seguridad ocupacional en la gestión de proyectos de construcción. Nueva York: Spon Press; 2005. <https://doi.org/10.4324/9780203507919>