Avance online de artículo en prensa

ORIGINAL

Gemelos digitales inmersivos para la familiarización operacional en un ejercicio civil-militar OTAN: estudio con métodos mixtos sobre conciencia situacional, estrés anticipatorio y aceptación percibida

José Tortosa Alcázar[1], Manuel Pardo Ríos[1,2], José Higinio de Gea García[3,4], Lucía López Ferrándiz[1,2], Carmen Amalia López López[1,2], Daniel Guillén Martínez[1], Marina Sánchez Gómez[1,2], Martin Lyubomirov Ivanov[5], José Antonio Jiménez Hernández[3,4], Tatiana Cuartas-Álvarez[6], Rafael Castro-Delgado[6,7], Ana Belén Ocampo Cervantes[1,8]

Objetivo. Evaluar, como prueba de concepto exploratoria, el cambio en conciencia situacional y estrés anticipatorio tras la exposición a gemelos digitales en un ejercicio civil-militar OTAN y caracterizar la aceptación percibida.

Método. Estudio observacional pre-post de un solo brazo, con un componente cualitativo exploratorio de dos grupos focales (diseño mixto secuencial explicativo), en el ejercicio OTAN «Bulgaria 2025». Los desenlaces coprimarios fueron conciencia situacional (Situational Awareness Rating Technique, SART) y estrés anticipatorio (subescala anticipatoria de la Perceived Stress Reactivity Scale, PSRS-A). Una escala propia de orientación espacial-operacional y la preparación autopercibida fueron exploratorias.

Resultados. Hubo 106 participantes (94,3% hombres; 78,3% militares). La exposición se asoció con un descenso del estrés anticipatorio ($p < 0,001$) y con cambios favorables en las tres dimensiones de la SART: demanda, suministro y comprensión ($p < 0,001$). En la escala exploratoria, la orientación espacial-operacional aumentó +2,96 (0-10; $p < 0,001$), con baja consistencia interna basal. La aceptación alcanzó una mediana de 8,0 y el 84% recomendaría su uso futuro; la mayor aceptación se asoció con mayor reducción del estrés ($r = -0,22$; $p = 0,024$). Los grupos focales aportaron seis temas relativos a desenlaces, condiciones de uso y aceptación.

Conclusiones. La exposición a gemelos digitales se asoció con mejoras autopercibidas de la conciencia situacional y reducción del estrés anticipatorio, con elevada aceptación; sin embargo, el diseño no permite inferencias causales ni cuantificar la contribución específica del gemelo. Se necesitan estudios controlados que aíslen el efecto y evalúen su transferencia a operaciones reales.

Palabras clave: Realidad virtual. Planificación en desastres. Defensa civil. Concienciación. Personal de respuesta a emergencias.

Immersive digital twins for operational familiarization in a NATO civil-military exercise: a mixed-methods study of situational awareness, anticipatory stress, and perceived acceptance

Objectives. To evaluate, as an exploratory proof of concept, changes in situational awareness and anticipatory stress following exposure to Matterport digital twins during a NATO civil-military exercise and to characterize perceived acceptance.

Method. Single-arm pre-post observational study with an exploratory qualitative component consisting of 2 focus groups (sequential explanatory mixed-methods design), conducted during the NATO "Bulgaria 2025" exercise. Co-primary endpoints were situational awareness (Situational Awareness Rating Technique, SART) and anticipatory stress (anticipatory subscale of the Perceived Stress Reactivity Scale, PSRS-A). A study-specific spatial-operational orientation scale and self-perceived preparedness were exploratory outcomes. Analyses included paired t test, Wilcoxon test, paired Cohen's d (dz), and 95%CIs; furthermore, inductive thematic analysis was performed.

Results. A total of 106 participants were included (94.3% men; 78.3% military personnel). Exposure was associated with a decrease in anticipatory stress ($dz = -1.75$; $P < .001$) and favorable changes in all three SART dimensions: demand, supply, and understanding ($P < .001$). On the exploratory scale, spatial-operational orientation increased by +2.96 (0-10; $dz = 3.80$; $P < .001$), although baseline internal consistency was low. Acceptance reached a median of 8.0, and 84% would recommend future use; greater acceptance was associated with a greater reduction in stress ($r = -0.22$; $P = .024$). The focus groups yielded 6 themes related to outcomes, conditions of use, and acceptance.

Conclusions. Exposure to digital twins was associated with self-perceived improvements in situational awareness and reduced anticipatory stress, with high acceptance; however, the design does not allow causal inference or

Filiación de los autores:
[1]Grupo de Investigación de Nuevas Tecnologías para la Salud (NT4H), Facultad de Ciencias de la Salud, UCAM Universidad Católica de Murcia, Murcia, España.
[2]Gerencia de Urgencias y Emergencias Sanitarias 061 de la Región de Murcia, Murcia, España.
[3]Hospital Clínico Universitario de la Arrixaca, Región de Murcia, España.
[4]Universidad de Murcia, Región de Murcia, España.
[5]Euro-Atlantic Disaster Response Coordination Centre (EADRCC), NATO Headquarters, Bruselas, Bélgica.
[6]Health Research Institute of the Principality of Asturias (Research Group on Prehospital Care and Disasters, GIAPREDE), Oviedo, España.
[7]Departamento de Medicina, Universidad de Oviedo, Oviedo, España.
[8]Hospital Universitario Santa Lucía de Cartagena, Región de Murcia, España.

Contribución de los autores:
Todos los autores han confirmado su autoría en el documento de responsabilidades del autor, acuerdo de publicación y cesión de derechos a EMERGENCIAS.

Autor para correspondencia:
Manuel Pardo Ríos.
Facultad de Ciencias de la Salud, UCAM Universidad Católica de Murcia.
Campus de los Jerónimos, n.º 135. 30107 Guadalupe, Murcia, España.

Correo electrónico:
mpardo@ucam.edu

Información del artículo:
Recibido: 26-5-2026
Aceptado: 29-7-2026
Online: 7-10-2026

Editor responsable:
Aitor Alquézar Arbé

DOI:
XXXX

Avance online de artículo en prensa

Avance online de artículo en prensa

quantification of the specific contribution of the digital twin. Controlled studies are needed to isolate the effect and assess transferability to real-world operations.

Keywords: Virtual reality. Disaster planning. Civil defense. Awareness. Emergency responders.

DOI: XXXXX

Introducción

Las catástrofes, los conflictos armados y los atentados imponen exigencias crecientes sobre los equipos de respuesta a emergencias sanitarios, de protección civil y militares[1-4]. La OTAN, mediante su Centro Euroatlántico de Coordinación de Respuesta a Catástrofes (EADRCC), organiza ejercicios multinacionales civil-militares para validar procedimientos e interoperabilidad[4]. El NATO Emergency Management Exercise «Bulgaria 2025» (8-11 septiembre 2025, Aeródromo de Elder, Bulgaria) reunió a más de mil participantes y ofreció un escenario idóneo para evaluar herramientas de preparación.

La conciencia situacional (percepción del entorno, su comprensión y la proyección de su estado futuro)[5] es un determinante crítico del rendimiento en operaciones complejas, sobre todo en entornos físicamente desconocidos[6]. En paralelo, el estrés anticipatorio, evaluable con la Perceived Stress Reactivity Scale (PSRS) y su subescala anticipatoria[7], puede comprometer la toma de decisiones y la coordinación; la exposición simulada previa reduce esa carga y mejora la familiarización con el escenario.

La realidad extendida y, concretamente los gemelos digitales, son un recurso prometedor para la formación en emergencias y la gestión de catástrofes[8-12]. Los gemelos digitales, réplicas 3D navegables de espacios reales, ofrecen oportunidades para la preparación anticipada, la planificación de rutas y el reconocimiento del terreno[13,14]. El grupo ha evaluado decisiones clínicas en realidad virtual (RV) inmersiva en ejercicios OTAN previos[2,3], y la reconstrucción geoespacial posevento en operaciones de búsqueda y rescate urbano (USAR) tras el terremoto de Turquía de 2023[1,14,15] refuerza la pertinencia de evaluar estos recursos en coordinación interagencia[16].

El presente estudio, anidado en el ejercicio civil-militar OTAN «Bulgaria 2025», se diseñó como una prueba de concepto exploratoria multientorno en la que se evaluaron cuatro gemelos digitales correspondientes a cuatro tipologías operacionales heterogéneas (rescate estructural, rescate vertical, incidente con múltiples víctimas en lugar de pública concurrencia y base operacional). El objetivo principal fue evaluar el cambio, entre el inicio y el cierre del ejercicio, en dos desenlaces coprimarios medidos con instrumentos validados: la conciencia situacional (SART) y el estrés anticipatorio (PSRS-A) en participantes expuestos a los gemelos digitales; el cambio en una escala propia de orientación espacial-operacional se analizó como desenlace exploratorio. Como objetivo secundario se planteó caracterizar la aceptación percibida de la herramienta. De forma complementaria, se realizó un análisis de sensibilidad de los desenlaces principales según el dispositivo de visualización y el idioma, y un componente cualitativo exploratorio con dos grupos focales dirigido a explorar las percepciones de los participantes sobre la utilidad y las condiciones de uso del gemelo digital.

Método

Diseño y guías de reporte

Estudio observacional pre-post intrasujeto de un único grupo expuesto, complementado por un componente cualitativo paralelo de dos grupos focales (diseño mixto exploratorio secuencial). Debido a restricciones operativas del ejercicio, el reclutamiento se completó únicamente sobre el brazo de intervención; el protocolo no fue registrado prospectivamente. El reporte se ha conducido conforme a las directrices STROBE para estudios observacionales, SRQR para el componente cualitativo[17] y SAMPL para el reporte estadístico.

Ámbito y cronograma

El estudio se realizó durante el NATO Emergency Management Exercise «Bulgaria 2025» en la Base de Operaciones del Aeródromo de Elder (Montana, Bulgaria), entre el 8 y el 11 de septiembre de 2025. Los cuatro gemelos digitales se capturaron en agosto de 2025 con cámara Matterport Pro 3 en tres localizaciones del recinto del centro de entrenamiento OTAN-Bulgaria (escenarios «Debris», «New NATO Bulgaria» y «Training Center NATO») y en un teatro extrarrecinto («Bulgaria Theatre»). El cuestionario pre se administró al inicio del ejercicio (8-9 septiembre) y el cuestionario post el último día (11 septiembre), al cierre del ejercicio y tras el conjunto de actividades formativas, no inmediatamente después de la exploración del gemelo digital. La distancia mediana pre-post fue de 2,8 días (rango 2,2-3,2).

Participantes

La población diana fueron civiles y militares participantes en el ejercicio. Se incluyeron mayores de 18 años con consentimiento informado y capacidad de cumplimentar el cuestionario en inglés, español o francés. Se excluyeron quienes rehusaron participar o no completaron ambos cuestionarios. El muestreo fue de conveniencia y se obtuvieron 106 sujetos con datos pareados pre y post. El sexo y el género se recogieron por autoinforme.

Intervención

Cada participante exploró individualmente los cuatro gemelos digitales, capturados previamente con cámara Matterport Pro 3 (Matterport, Inc., Sunnyvale,

Avance online de artículo en prensa

California, EE.UU.) y procesados en la plataforma Matterport Cloud, que genera la malla 3D, la vista en planta y el recorrido navegable. La visualización se realizó mayoritariamente mediante dispositivos accesibles (teléfono móvil, pantalla u ordenador portátil) y, en un subgrupo, mediante gafas de realidad virtual Meta Quest 3. Los cuatro gemelos digitales pueden visualizarse en los siguientes enlaces:

– Escenario 1. Debris: https://my.matterport.com/show/?m=tySDgStbiUr

– Escenario 2. NATO Bulgaria: https://my.matterport.com/show/?m=yuiN32x3PBM

– Escenario 3. Bulgaria Theatre: https://my.matterport.com/show/?m=VTDjGufXKfX

– Escenario 4. Training Center: https://my.matterport.com/show/?m=NhCxYosC1br

Variables e instrumentos

Se administraron en pre y post los siguientes instrumentos de medida: (i) la subescala anticipatoria de la Perceived Stress Reactivity Scale (PSRS-A, 3 ítems, 0-4)[7]; (ii) la Situational Awareness Rating Technique en su versión de tres dimensiones, con seis ítems compartidos pre-post (escala 1-7); sus dimensiones de demanda, suministro y comprensión proceden del marco original de Taylor[18] (la dimensión de demanda recoge la inestabilidad, la complejidad y la variabilidad percibidas de la situación; la de suministro, la concentración de la atención; y la de comprensión, la calidad de la información y la familiaridad con la situación), se relacionan conceptualmente con el modelo de Endsley[5] y cuentan con antecedentes de uso en contextos militares[6]; y (iii) una escala de orientación espacial-operacional de 5 ítems (0-10) de elaboración propia (mapa mental del área, ubicación de recursos, comprensión del *layout*, identificación de riesgos y confianza de navegación). Este último instrumento no ha sido validado formalmente y analizado como desenlace exploratorio. En el cuestionario posexperiencia se administraron además seis ítems específicos de aceptación del gemelo digital (0-10) y respuestas abiertas sobre momentos de utilidad y propuestas de mejora. Se prespecificaron como desenlaces coprimarios el cambio pre-post en la conciencia situacional (SART) y en el estrés anticipatorio (PSRS-A), ambos con instrumentos validados; el cambio en la escala propia se consideró exploratorio. Se incluyó asimismo un ítem único de preparación operacional autopercibida («¿Se siente preparado para comenzar su rol?»; 0 = nada preparado, 10 = totalmente preparado), que fue administrado en pre y post y analizado como desenlace exploratorio.

Análisis estadístico

Para los desenlaces coprimarios y el exploratorio se aplicó la t de Student para muestras relacionadas sobre las puntuaciones compuestas; se reportan diferencia media, intervalo de confianza (IC) del 95%, t, grados de libertad, p bilateral y d de Cohen para diseños pareados (d_z). Como sensibilidad se usó la prueba de Wilcoxon; para la consistencia interna, el α de Cronbach. Como análisis de sensibilidad se examinó la consistencia del cambio pre-post entre los subgrupos definidos por el dispositivo de visualización y el idioma del cuestionario (y, de forma complementaria, por ámbito profesional y formación previa), mediante la comparación descriptiva de las medias del cambio por subgrupo. Se exploraron además correlaciones *post hoc* (Pearson) entre la aceptación y los cambios pre-post. Se usaron los paquetes estadísticos IBM SPSS y R y la significación estadística fue bilateral con un valor $\alpha = 0{,}05$. Dado que se prespecificaron dos desenlaces coprimarios, el umbral de significación se corrigió mediante Bonferroni ($\alpha = 0{,}025$) para dichos contrastes.

Análisis cualitativo

Se realizaron dos grupos focales posexperiencia (Grupo 1 n = 8, Grupo 2 n = 7) sobre participantes seleccionados aleatoriamente desde los códigos del conjunto de datos post. Se utilizó un guion semiestructurado y se aplicó análisis temático inductivo[19] con codificación independiente por dos investigadores y resolución de discrepancias por consenso. La triangulación cuantitativo-cualitativa se presenta mediante un matriz de integración.

Aspectos éticos y financiación

Se obtuvo consentimiento informado escrito al inicio del cuestionario. El estudio contó con la aprobación CE112309 del Comité de Ética de la Investigación de la UCAM (24/11/2023). Los datos se trataron de forma anonimizada con códigos DT-XXX. El estudio tuvo financiacion mediante el proyecto METASALUD (PID2022-138884NA-I00).

Resultados

Características de los participantes

De los 106 participantes con datos pareados, 100 (94,3%) eran hombres, con edad media de 36,3 (DE: 7,6) años y una mediana de 11 años de experiencia profesional (P25-P75: 7-20). El 78,3% eran militares y el 64,2% respondió en inglés. El detalle sociodemográfico, profesional y de experiencia previa están en la Tabla 1 y en la Figura 1.

Desenlace principal: conciencia situacional (SART)

Analizada por dimensiones (media de ítems, escala 1-7), la demanda descendió de 5,22 a 4,13 ($\Delta = -1{,}09$; IC 95% −1,25 a −0,94; $p < 0{,}001$); el suministro aumentó de 4,24 a 5,45 ($\Delta = +1{,}22$; IC 95% +0,99 a +1,44; $p < 0{,}001$); y la comprensión aumentó de 3,59 a 6,05 ($\Delta = +2{,}46$; IC 95% +2,30 a +2,62; $p < 0{,}001$), con confirmación por Wilcoxon ($r = 0{,}71$–$0{,}87$). Los seis ítems que componen estas dimensiones se detallan en la Tabla 3 (Figura 2 Panel B).

Avance online de artículo en prensa

Tabla 1. Características sociodemográficas, profesionales y de experiencia previa de los participantes (N = 106)

Variable	Categoría	N= 106 n (%)
Edad (años)	Media ± DE (rango)	36 ± 8 (22-53)
	Mediana (P25-P75)	36 (31-42)
Años de experiencia profesional	Media ± DE (rango)	13 ± 8 (0-33)
	Mediana (P25-P75)	11 (7-20)
Sexo	Hombre	100 (94,3)
	Mujer	6 (5,7)
Ámbito profesional	Militar	83 (78,3)
	Protección civil	11 (10,4)
	Servicios médicos de emergencia	5 (4,7)
	Bomberos/rescate	4 (3,8)
	Policía/seguridad	3 (2,8)
Idioma del cuestionario	Inglés	68 (64,2)
	Español	22 (20,8)
	Francés	16 (15,1)
Ejercicios multinacionales previos	≥ 2 ejercicios	48 (45,3)
	1 ejercicio	27 (25,5)
	Ninguno	31 (29,2)
Formación previa en CS	Sí	68 (64,2)
	No	38 (35,8)
Formación previa en estrés	Sí	52 (49,1)
	No	54 (50,9)
Conocimiento previo de GD	Ninguno	37 (34,9)
	Bajo	48 (45,3)
	Moderado	18 (17,0)
	Alto	3 (2,8)
Experiencia previa con RE/GD	Nunca	24 (22,6)
	Algunas veces	72 (67,9)
	Regularmente	10 (9,4)
Dispositivo de visualización del gemelo	Móvil	42 (39,6)
	Pantalla	30 (28,3)
	Portátil	19 (17,9)
	Gafas de RV	7 (6,6)
	No especificado	8 (7,5)
Mareo previo con pantallas/GD	No	70 (66,0)
	Leve	28 (26,4)
	Moderado	8 (7,5)

Las variables continuas se presentan como media ± DE; las categóricas como n (%).
CS: conciencia situacional; RE: realidad extendida; GD: Gemelos Digitales; RV: Realidad Virtual.

Desenlace principal: estrés anticipatorio (PSRS-A)

El estrés anticipatorio compuesto descendió de 2,38 a 1,22, con una diferencia media de −1,16 (IC 95% −1,29 a −1,04; p < 0,001). El análisis de sensibilidad mediante Wilcoxon confirmó el resultado (r = 0,86; p < 0,001) (Tabla 2, Figura 2).

Objetivo secundario: aceptación del gemelo digital

En el bloque posexperiencia, la puntuación compuesta de aceptación alcanzó una mediana de 8,0 (P25-P75: 7,6-8,4; media 8,04, DE: 0,56). El ítem mejor valorado fue la recomendación de uso futuro (mediana 9,0; 84,0% con puntuación ≥ 8). Los seis ítems individuales se distribuyeron entre 7,52 (DE: 1,19) (reducción de estrés) y 8,64 (DE: 1,06) (recomendación) (Tabla 4).

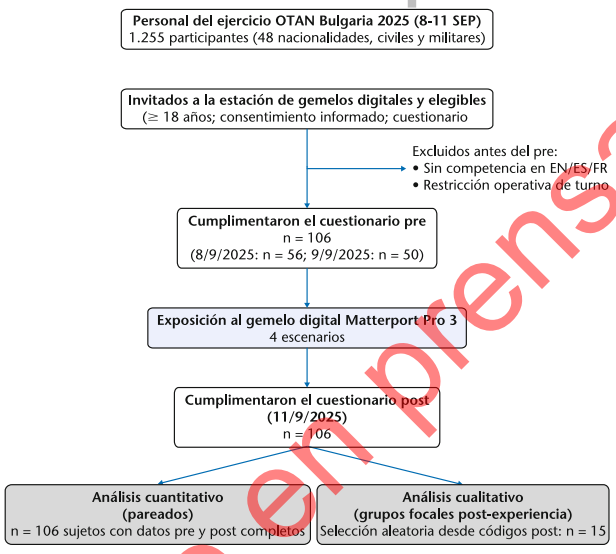

Figura 1. Diagrama de flujo de participantes (STROBE adaptado). Se representan los participantes cribados, los excluidos por no completar ambos cuestionarios y los finalmente analizados con datos pareados (n = 106).

Análisis de sensibilidad: dispositivo de visualización e idioma

El cambio pre-post en la escala de orientación espacial-operacional fue consistente en dirección y magnitud entre los subgrupos definidos por el dispositivo de visualización y el idioma del cuestionario, así como por ámbito profesional y formación previa (rango de medias del cambio: +2,73 a +3,50), sin que se realizara un contraste formal de interacción.

Análisis exploratorios

La puntuación compuesta de la escala propia de orientación espacial-operacional aumentó de 4,79 en pre a 7,75 en post, con una diferencia media de +2,96 (IC 95% +2,81 a +3,11; p < 0,001), confirmada por Wilcoxon (r = 0,87; p < 0,001) y con cambios consistentes en los cinco ítems (d_z superiores a 2,2) (Tabla 2; Figura 2, Panel A). La consistencia interna de esta escala fue baja en el pre (α = 0,33) y aceptable en el post (α = 0,73), lo que condiciona la interpretación de su magnitud. La preparación operacional autopercibida aumentó de 5,49 a 8,00 (Δ = +2,51; d_z = +2,98; p < 0,001). La aceptación del gemelo no se correlacionó con el cambio en la escala de orientación (r = +0,10; p = 0,313), pero sí se asoció con la reducción del estrés anticipatorio (r = −0,22; IC 95% −0,39 a −0,03; p = 0,024).

Componente cualitativo exploratorio

Los dos grupos focales (n = 15) generaron seis temas, que se presentan ordenados según su relación con los desenlaces del estudio. Los dos primeros se vinculan con la conciencia situacional y el estrés: la mejora de la comprensión situacional y la reducción de la incertidumbre y

Avance online de artículo en prensa

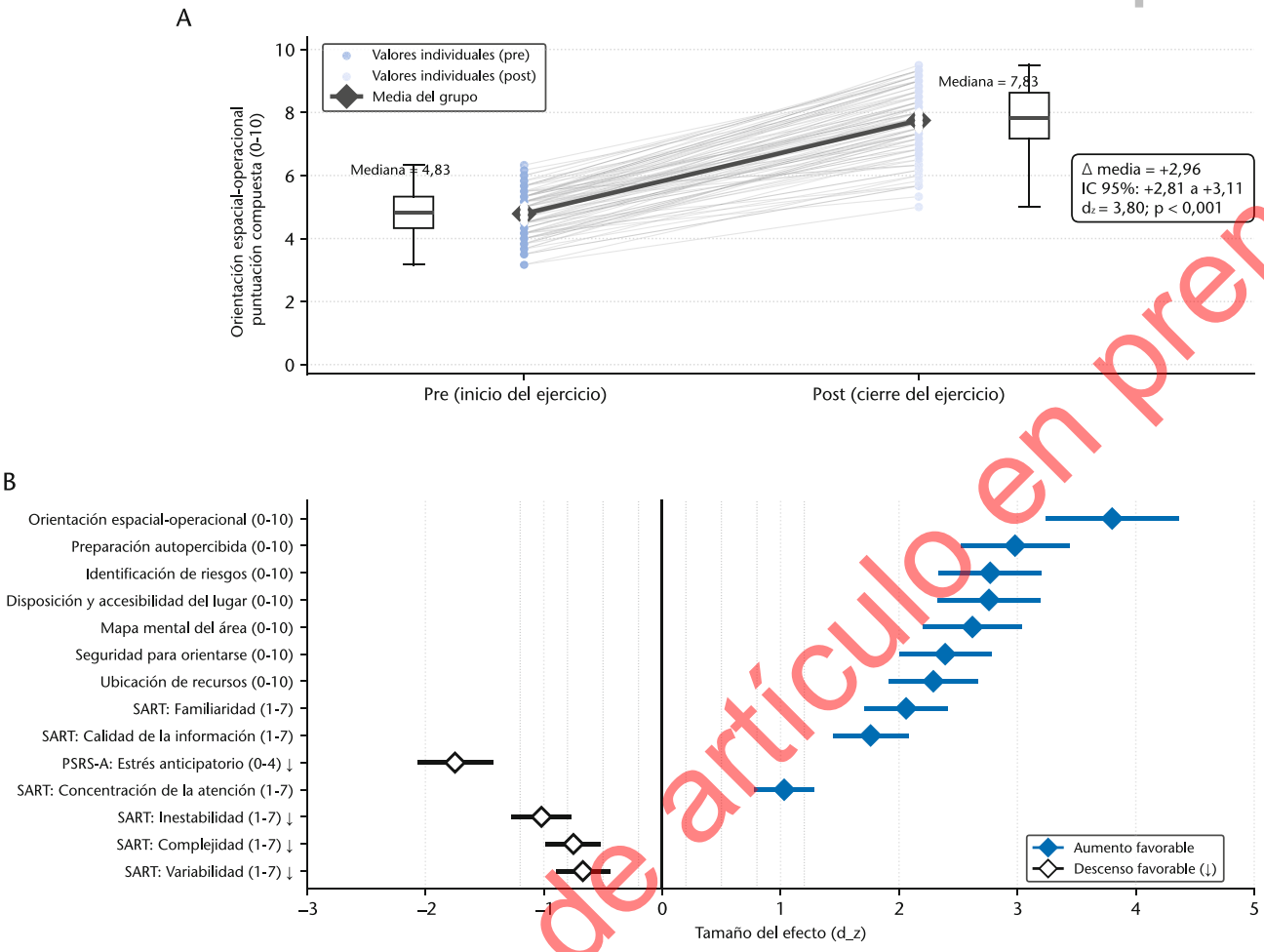

Figura 2. Cambio pre-post en las variables principales (N = 106). Panel A: gráfico de trayectorias individuales y diagrama de cajas de puntuación compuesta de orientación espacial-operacional (0-10). Panel B: diagrama de bosque de tamaños del efecto (d_z) con IC 95%.

de la carga de orientación. Los dos siguientes se refieren a las condiciones de uso: el momento óptimo de empleo, situado antes del primer movimiento, y su valor para la coordinación multinacional al ofrecer una referencia visual común. Los dos últimos se relacionan con la aceptación: la transición de un escepticismo inicial a una aceptación condicionada y la exigencia de robustez operativa (modo *offline,* capas por rol y control de versiones) como requisito para la adopción. No se cuantificó la frecuencia de cada tema, conforme al enfoque de análisis temático empleado[19]. La Tabla 4 integra estos temas con las puntuaciones de aceptación y las citas representativas.

Tabla 2. Cambio pre-post en variables principales (t pareada y Wilcoxon de sensibilidad; N = 106)

Variable	Pre Media (DE)	Post Media (DE)	Δ media (IC 95%)	t	d_z	p	r Wilc
CS (0-10), puntuación compuesta	4,79 (0,68)	7,75 (1,06)	+2,96 (+2,81; +3,11)	39,11	3,80	< 0,001	0,87
Mapa mental (0-10)	4,62 (1,47)	7,76 (1,90)	+3,14 (+2,91; +3,37)	26,98	2,62	< 0,001	0,88
Ubicación de recursos (0-10)	4,55 (1,67)	7,53 (2,04)	+2,98 (+2,73; +3,23)	23,58	2,29	< 0,001	0,87
Comprensión del espacio (0-10)	4,75 (1,39)	7,94 (1,65)	+3,19 (+2,97; +3,41)	28,41	2,76	< 0,001	0,88
Identificación de riesgos (0-10)	4,87 (1,21)	7,84 (1,59)	+2,97 (+2,77; +3,18)	28,51	2,77	< 0,001	0,88
Seguridad para orientarse (0-10)	4,43 (1,39)	7,42 (1,81)	+2,98 (+2,74; +3,22)	24,56	2,39	< 0,001	0,88
Preparación (0-10)	5,49 (1,48)	8,00 (1,49)	+2,51 (+2,35; +2,67)	30,67	2,98	< 0,001	0,88
Estrés anticipatorio, PSRS-A (0-4)	2,38 (0,49)	1,22 (0,44)	−1,16 (−1,29; −1,04)	−17,98	−1,75	< 0,001	0,86
SART – Demanda (1-7)	5,22 (0,62)	4,13 (0,54)	−1,09 (−1,25; −0,94)	−13,89	−1,35	< 0,001	0,79
SART – Suministro (1-7)	4,24 (0,83)	5,45 (0,83)	+1,22 (+0,99; +1,44)	10,63	+1,03	< 0,001	0,71
SART – Comprensión (1-7)	3,59 (0,68)	6,05 (0,50)	+2,46 (+2,30; +2,62)	30,13	+2,93	< 0,001	0,87

Las tres dimensiones de la SART (demanda, suministro y comprensión) y la PSRS-A son los desenlaces co-primarios validados; la escala propia (CS compuesta) es exploratoria. d_z: d de Cohen para diseños pareados. r Wilc: tamaño del efecto de Wilcoxon (Z/√N). Pruebas bilaterales; $\alpha = 0,05$.
CS: conciencia situacional; PSRS-A: subescala anticipatoria de la Perceived Stress Reactivity Scale; SART: Situational Awareness Rating Technique.

Avance online de artículo en prensa

Tabla 3. Cambio de puntuaciones entre pre y post en las dimensiones de la Situational Awareness Rating Technique (SART, 1-7). Desenlace coprimario de la conciencia situacional

Ítem SART	Dimensión	Pre Media (DE)	Post Media (DE)	Δ media (IC 95%)	d_z	p
Inestabilidad de la situación	Demanda	4,97 (1,07)	3,47 (0,88)	−1,50 (−1,78; −1,22)	−1,02	< 0,001
Complejidad de la situación	Demanda	5,54 (0,94)	4,65 (0,91)	−0,89 (−1,11; −0,66)	−0,75	< 0,001
Variabilidad de la situación	Demanda	5,15 (0,98)	4,25 (0,85)	−0,90 (−1,15; −0,64)	−0,67	< 0,001
Concentración de la atención	Suministro	4,24 (0,83)	5,45 (0,83)	+1,22 (+0,99; +1,44)	+1,03	< 0,001
Calidad de la información	Comprensión	3,79 (1,06)	5,97 (0,75)	+2,18 (+1,94; +2,42)	+1,76	< 0,001
Familiaridad con la situación	Comprensión	3,39 (1,07)	6,12 (0,70)	+2,74 (+2,48; +2,99)	+2,06	< 0,001

SART: Situational Awareness Rating Technique (técnica de valoración de la conciencia situacional; 3 dimensiones, 6 ítems compartidos pre-post; marco original de Taylor[18]). En la dimensión de demanda, los descensos indican menor sobrecarga percibida; en las de suministro y comprensión, los aumentos indican mayor disponibilidad de recursos atencionales y mejor comprensión de la situación.

Discusión

En este ejercicio civil-militar multinacional OTAN, la exposición a gemelos digitales se asoció con un patrón favorable en las tres dimensiones de la SART (menor demanda, mayor suministro y mayor comprensión), con una reducción del estrés anticipatorio y con una aceptación elevada (84% recomendaría su uso futuro). La escala exploratoria de orientación espacial-operacional mostró un cambio en el mismo sentido, cuya magnitud se examina más adelante. Al tratarse de un diseño observacional de un solo brazo, estos resultados deben leerse como asociaciones, no como efectos causales atribuibles al gemelo digital. La evolución concordante de varias escalas autoinformadas por los mismos participantes en un mismo marco temporal indica consistencia entre medidas subjetivas, pero no constituye validez convergente ni descarta un sesgo común de método. Conviene distinguir tres planos: resultados observados, hipótesis interpretativas e implicaciones para la práctica.

Como hipótesis interpretativa, no verificable con el presente diseño, la asociación específica entre aceptación y reducción del estrés es compatible con que la familiarización anticipada con el entorno, entendida como el paso de la percepción a la comprensión y la proyección[5], redujera la incertidumbre operacional y, secundariamente, el estrés que genera. El cambio observado, no obstante, refleja el efecto combinado del programa formativo completo, reuniones *(briefings)*, reconocimiento del terreno, entrenamiento práctico e interacción entre equipos durante 2,8 días, y el diseño no permite estimar la contribución específica del gemelo digital. Concuerda con observaciones previas en simulaciones de incidentes con múltiples víctimas[20] y con la línea del grupo en RV para escenarios de decisión clínicos[2,3,21].

Los tamaños del efecto observados son inusualmente elevados, por ejemplo en la escala exploratoria de conciencia situacional. Aunque los estadísticos son internamente consistentes, su magnitud obliga a considerar explicaciones alternativas. La d_z se calcula sobre la desviación típica de las diferencias intrasujeto, de modo que una variabilidad pequeña de dichas diferencias infla el estadístico con independencia de la relevancia operativa del cambio. Además, la escala propia mostró una consistencia interna basal muy baja, compatible con

Tabla 4. Matriz de integración de resultados cuantitativos y cualitativos *(joint display):* aceptación cuantitativa del gemelo digital (post, n = 106) y temas emergentes en los grupos focales (n = 15)

Dimensión	Aceptación (media; DE; Me; % ≥ 8 puntos)	Tema emergente	Cita representativa (código)
Navegación efectiva	7,98; 1,15; 8; 72,6%	Reducción de incertidumbre en el primer movimiento.	«Antes del primer desplazamiento fue cuando más me aportó.» (DT-084)
Comprensión del área operacional	8,09; 1,03; 8; 67,9%	Lenguaje común multinacional; referencia compartida.	«Cuando todos miran una representación compartida, disminuyen los malentendidos.» (DT-035)
Reducción del estrés	7,52; 1,19; 8; 51,9%	Reducción de la carga de orientación, no del estrés operacional.	«No quita el estrés del ejercicio, pero reduce el estrés de orientación.» (DT-100)
Anticipación de riesgos	7,97; 1,25; 8; 66,0%	Visualización de rutas alternativas; decisión basada en evidencia espacial.	«Cuando vimos que un acceso podía saturarse, fue más sencillo justificar otra opción.» (DT-103)
Recomendación de uso futuro	8,64; 1,06; 9; 84,0%	Adopción condicionada a robustez (modo sin conexión, control de versiones, capas por rol).	«Sí, lo recomendaría. Condición: actualización fiable y respaldo no digital.» (DT-100)
Claridad del entorno	8,08; 1,10; 8; 71,7%	Confianza compartida más que individual.	«Más que confianza individual, vi confianza compartida.» (DT-098)
Aceptación global (puntuación compuesta)	8,04; 0,56; 8,0; 60,4%	Trayectoria global: de escepticismo a aceptación condicionada.	«Mi escepticismo bajó cuando vi que podíamos usarlo como punto común.» (DT-035)

Cualitativo: análisis temático inductivo[19] con codificación independiente por dos investigadores; reporte conforme a SRQR[17].

Avance online de artículo en prensa

una medición pre ruidosa que puede amplificar artificialmente el cambio estandarizado, y con un posible efecto suelo por puntuaciones pre relativamente bajas. A ello se añaden las expectativas positivas generadas por una tecnología novedosa, el contexto altamente inmersivo del ejercicio y los sesgos propios del autoinforme. Por todo ello, la magnitud de los efectos debe interpretarse con prudencia y no como una estimación de eficacia. En cuanto a un posible efecto techo, las puntuaciones post se situaron en torno a 7,4-8,0 sobre 10 y la puntuación compuesta rara vez alcanzó el máximo (1% en 10/10), lo que hace improbable que un techo estricto explique la magnitud observada. No obstante, algunos ítems individuales mostraron cierta acumulación en valores altos (en torno al 20% en el máximo).

Todos los desenlaces son autopercibidos. Además del sesgo de deseabilidad social, deben considerarse el efecto Hawthorne (los participantes sabían que estaban siendo evaluados con una herramienta diseñada para el estudio), el sesgo de expectativa asociado a la novedad tecnológica y una posible desviación de la respuesta *(response shift),* esto es, la redefinición del propio concepto de competencia tras varios días de entrenamiento intensivo. No se incluyeron medidas objetivas de rendimiento ni escalas validadas de autoeficacia, cuya incorporación se recomienda en futuros trabajos.

Las revisiones sistemáticas sobre realidad extendida en incidentes con múltiples víctimas[8-10] concluyen que estas tecnologías son bien aceptadas, escalables y coste-eficientes, con efectos comparables a la simulación viva y evaluación objetiva del rendimiento[22-25]. Los presentes resultados concuerdan con estudios que hallaron aprendizaje equivalente entre simulación viva y RV en triaje a menor coste[26] y precisión START comparable con menor activación neurofisiológica en RV[21]. Frente a esa literatura, centrada en el entrenamiento de decisión clínica, este trabajo aporta el gemelo digital como recurso de reconocimiento espacial-operacional anticipado, en línea con el marco PPRR para gemelos digitales en emergencias[13].

Los estudios inmersivos convergen, además, en dos aprendizajes relevantes: la variabilidad de rendimiento entre subgrupos profesionales[24] y la tensión entre adopción tecnológica y robustez operativa recogida en formatos cualitativos[27], patrón reproducido en los grupos focales de este trabajo y coincidente con estudios mixtos en triaje de otros sistemas[28,29] y con los aprendizajes del propio ejercicio «Bulgaria 2025»[30].

Desde el punto de vista operativo, la heterogeneidad del dispositivo (mayoritariamente móvil/ordenador/pantalla) es un argumento de escalabilidad y bajo coste. La integración de gemelos digitales en las reuniones OTAN/EADRCC y en operaciones civil-militares[4] podría facilitar la coordinación multinacional al ofrecer una referencia visual común, en conexión con la reconstrucción geoespacial posevento en operaciones USAR[1,14] y con el uso de realidad virtual para la formación[15].

Los grupos focales aportan tres ideas operativas: el valor del recurso aparece antes del primer movimiento, lo que apoya su integración en reuniones premisión; la confianza compartida prevalece sobre la individual; y la adopción está condicionada a la robustez técnica (modo fuera de línea, control de versiones, capas por rol). El testimonio «úsalo, pero no apagues tu criterio» resume el equilibrio entre asistencia tecnológica y juicio operacional.

Constituyen fortalezas de este trabajo el anidamiento en un ejercicio multinacional real con muestra heterogénea, el diseño mixto, el uso de dos instrumentos validados y la administración trilingüe del cuestionario. Entre las limitaciones, la ausencia de grupo de comparación y el diseño de un solo brazo impiden atribuir causalmente los cambios al gemelo digital y aislar su contribución del programa formativo. El desenlace exploratorio usó una escala propia no validada y de baja consistencia interna basal ($\alpha = 0,33$), y los tamaños del efecto, inusualmente grandes, pueden reflejar efecto suelo, expectativas, contexto inmersivo y sesgos de autoinforme (efecto Hawthorne, deseabilidad social y desviación de respuesta). El estudio no se registró prospectivamente. La muestra fue predominantemente masculina (94,3%) y militar (78,3%); conforme a la perspectiva de sexo y género, no pudo analizarse desagregada por sexo por la escasa representación femenina, lo que limita su generalización. Finalmente, el diseño transversal no permite evaluar la retención del efecto ni su transferencia a operaciones reales.

De cara a futuras investigaciones, los resultados apoyan el desarrollo de ensayos controlados aleatorizados con asignación por equipos para evaluar el efecto específico del gemelo digital frente a la revisión tradicional; estudios longitudinales que cuantifiquen la retención del efecto; y trabajos de transferencia a operaciones reales (USAR posterremoto, evacuación en eventos masivos, despliegues en infraestructura crítica).

En conclusión, en el marco de una prueba de concepto exploratoria, la exposición a gemelos digitales, la exposición a gemelos digitales durante un ejercicio civil-militar multinacional OTAN se asoció con una mejora de la conciencia situacional operacional autopercibida y una reducción del estrés anticipatorio, junto con una aceptación percibida elevada. Estos resultados no permiten atribuir causalidad ni cuantificar la contribución específica del gemelo digital. Los temas emergentes en los grupos focales sugieren, a título de hipótesis, mecanismos perceptivos plausibles, familiarización del terreno, lenguaje espacial compartido y reducción de la incertidumbre y condiciones para su implementación operativa. Son necesarios estudios controlados que aíslen el efecto específico del gemelo y evalúen su transferencia a operaciones reales.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en relación con el presente artículo.

Financiación: Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España, en el marco del proyecto «METASALUD: Design of a Metaverse for Higher Education in Health Sciences» (referencia PID2022-138884NA-I00; MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE).

Responsabilidades éticas: Todos los autores confirman el mantenimiento de la confidencialidad y respeto de los derechos de los pacientes en el documento de responsabilidades del autor, acuerdo de publi-

Avance online de artículo en prensa

cación y cesión de derechos a EMERGENCIAS. El estudio fue aprobado por el Comité de Ética de la Investigación de la UCAM (código CE112309, 24 de noviembre de 2023). Todos los participantes firmaron consentimiento informado y los datos se trataron de forma anonimizada conforme al Reglamento General de Protección de Datos.

Artículo no encargado por el Comité Editorial y con revisión externa por pares.

Agradecimientos: Los autores agradecen al Euro-Atlantic Disaster Response Coordination Centre (EADRCC) de la OTAN, al equipo organizador del NATO Emergency Management Exercise «Bulgaria 2025» y a los participantes civiles y militares que voluntariamente accedieron al estudio. Se agradece igualmente al equipo VR Lab de la institución promotora por el soporte técnico en la captura Matterport, y a la red de investigación en asistencia prehospitalaria por su apoyo logístico.

Bibliografía

1 Pardo Ríos M, Morales Sánchez C, Parra Beneitez Y, López Guardiola P, Lanchares Ortiz A, Pedreño Rosique A, et al. Urban search and rescue operations (USAR) in collapsed buildings after the 2023 earthquake in Türkiye. Emergencias. 2023;35:288-96.
2 López López CA, Greif R, Semeraro F, Ocampo Cervantes AB, Pons Claramonte M, Nieto Caballero S, et al. Can immersive virtual reality assess hypothermia resuscitation decision-making? A cross-sectional study in a civil-military disaster management context. BMJ Open. 2026;16:e113246.
3 Sánchez Gómez M, López López CA, Greif R, Semeraro F, Ocampo Cervantes AB, Pons Claramonte M, et al. Evaluation of advanced life support training through virtual reality: a cross-sectional observational study in a hypothermia and helicopter evacuation scenario. Medicine (Baltimore). 2026;105:e47135.
4 Khorram-Manesh A, Burkle FM, Phattharapornjaroen P, Ahmadi Marzaleh M, Sultan MA, Mäntysaari M, et al. The development of Swedish military healthcare system: part II—re-evaluating the military and civilian healthcare systems in crises through a dialogue and study among practitioners. Mil Med. 2021;186:e442-50.
5 Endsley MR. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. Hum Factors. 1995;37:32-64.
6 Büssing A, Walach H, Kohls N, Zimmermann F, Trousselard M. Conscious Presence and Self Control as a measure of situational awareness in soldiers—a validation study. Int J Ment Health Syst. 2013;7:1.
7 Schlotz W, Yim IS, Zoccola PM, Jansen L, Schulz P. The Perceived Stress Reactivity Scale: measurement invariance, stability, and validity in three countries. Psychol Assess. 2011;23:80-94.
8 Cardós-Alonso MC, Otero-Varela L, Redondo M, Uzuriaga M, González M, Vazquez T, et al. Extended reality training for mass casualty incidents: a systematic review on effectiveness and experience of medical first responders. Int J Emerg Med. 2024;17:99.
9 Heldring S, Jirwe M, Wihlborg J, Berg L, Lindström V. Using high-fidelity virtual reality for mass-casualty incident training by first responders—a systematic review of the literature. Prehosp Disaster Med. 2024;39:94-105.
10 Abbas JR, Chu MMH, Jeyarajah C, Isba R, Payton A, McGrath B, et al. Virtual reality in simulation-based emergency skills training: a systematic review with a narrative synthesis. Resusc Plus. 2023;16:100484.
11 Baetzner AS, Wespi R, Hill Y, Gyllencreutz L, Sauter TC, Saveman BI, et al. Preparing medical first responders for crises: a systematic literature review of disaster training programs and their effectiveness. Scand J Trauma Resusc Emerg Med. 2022;30:76.
12 Kimura R, Fukushima A, Kajiwara K, Sakuramoto H, Yoshihara S, Harada K, et al. Scoping review of virtual reality (VR)-based disaster mitigation education. Cureus. 2024;16:e74062.
13 Sun T, Lu J, Li Q, Kou Y. Can digital twin technology revolutionize public health emergency management? Insights from the PPRR framework. Front Public Health. 2025;13:1631339.
14 Ivanov ML, Georgiev MP. Innovations, applications, and future perspectives in geospatial information visualization for disaster response: insights from the 2023 Kahramanmaras earthquake urban search and rescue operations. Nat Hazards. 2025;121:22787-816.
15 Carrozzino MA, Giuliodori G, Tanca C, Evangelista C, Bergamasco M, Potel M. Virtual reality training for post-earthquake rescue operators. IEEE Comput Graph Appl. 2023;43:61-70.
16 Martín-Ibáñez L, Pérez-Martínez J, Zamora-Mínguez D, Alcón-Rubio F, González-Alonso V, Aroca García-Rubio S, et al. A civilian tactical survival chain for incidents involving multiple intentional injury victims: the Victory I Consensus Report. Emergencias. 2019;31:195-201.
17 O'Brien BC, Harris IB, Beckman TJ, Reed DA, Cook DA. Standards for reporting qualitative research: a synthesis of recommendations. Acad Med. 2014;89:1245-51.
18 Taylor RM. Situational Awareness Rating Technique (SART): the development of a tool for aircrew systems design. En: Situational Awareness in Aerospace Operations (AGARD-CP-478). Neuilly-sur-Seine: NATO-AGARD; 1990. p. 3/1-3/17.
19 Braun V, Clarke V. Using thematic analysis in psychology. Qual Res Psychol. 2006;3:77-101.
20 Hartman EN, Daines B, Seto C, Shimshoni D, Feldman ME, LaBrunda M. Sort, Assess, Life-Saving Intervention, Triage with drone assistance in mass casualty simulation: analysis of educational efficacy. Cureus. 2020;12:e10572.
21 Ferrandini Price M, Escribano Tortosa D, Nieto Fernández-Pacheco A, Pérez Alonso N, Cerón Madrigal JJ, Melendreras-Ruiz R, et al. Comparative study of a simulated incident with multiple victims and immersive virtual reality. Nurse Educ Today. 2018;71:48-53.
22 Baetzner AS, Hill Y, Roszipal B, Gerwann S, Beutel M, Birrenbach T, et al. Mass casualty incident training in immersive virtual reality: quasi-experimental evaluation of multimethod performance indicators. J Med Internet Res. 2025;27:e63241.
23 Kman NE, Price A, Berezina-Blackburn V, Patterson J, Maicher K, Way DP, et al. First responder virtual reality simulator to train and assess emergency personnel for mass casualty response. J Am Coll Emerg Physicians Open. 2023;4:e12903.
24 Kman N, Way D, Panchal AR, Patterson J, McGrath J, Danforth D, et al. Virtual reality simulation for assessment of hemorrhage control and SALT triage performance: a comparison of prehospital to in-hospital emergency responders. Prehosp Disaster Med. 2025;40:191-8.
25 Lowe J, Peng C, Winstead-Derlega C, Curtis H. 360 virtual reality pediatric mass casualty incident: a cross-sectional observational study of triage and out-of-hospital intervention accuracy at a national conference. J Am Coll Emerg Physicians Open. 2020;1:974-80.
26 Mills B, Dykstra P, Hansen S, Miles A, Rankin T, Hopper L, et al. Virtual reality triage training can provide comparable simulation efficacy for paramedicine students compared to live simulation-based scenarios. Prehosp Emerg Care. 2020;24:525-36.
27 Eide KL, Keating B, Braastad A, Eckhoff B, Kvam IA, Rise SP, et al. Immersive virtual reality simulation for tactical mass-casualty triage: an observational study of usability, realism, and decision-making in RAMP training. Disaster Med Public Health Prep. 2025;20:e7.
28 Wang LH, Lin CC, Chao LF, Chang CI, Goopy S, Han CY. Effectiveness of a virtual reality triage simulation program for nursing students: a mixed-methods study. Nurse Educ Pract. 2024;81:104161.
29 Lochmannová A. Exploring the role of virtual reality in preparing emergency responders for mass casualty incidents. Isr J Health Policy Res. 2025;14:22.
30 López Ferrándiz L, López López CA, Pardo Ríos M, Guillén Martínez D, Ivanov ML, Castro-Delgado R, et al. International civil-military disaster response exercises: lessons learned from NATO Emergency Management Exercise "Bulgaria 2025". Emergencias. En prensa.

Avance online de artículo en prensa