



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología

journal homepage: www.elsevier.es/rot



Premios Fundación SECOT

Desarrollo y validación de un sistema de aprendizaje específico de técnicas mínimamente invasivas guiadas por ecografía en Cirugía Ortopédica y Traumatología

Development and validation of a specific learning system for minimally invasive ultrasound-guided techniques in Orthopedic Surgery and Traumatology

J.R. Calvo-Tapies^{a,*}, J. Albareda-Albareda^a, J. Gómez-Vallejo^a, B. Redondo-Trasobares^a, N. Blanco-Rubio^a, J.R. Ballesteros-Betancourt^a, E. Bueno-Gracia^b, P. Fanlo-Mazas^b, I. Ríos-Asín^b, J. Pérez-Rey^b, J. Rodríguez-Sanz^c y M. Malo-Urriés^b

^a Departamento de Cirugía Ortopédica y Traumatología, Hospital Clínico Universitario Lozano Blesa, Zaragoza, España

^b Grupo de Investigación en Ciencias de la Salud PhysiUzerapy, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España

^c Grupo de Anatomía Funcional ACTIUM, Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud, Universitat Internacional de Catalunya, Sant Cugat del Vallès, Barcelona, España

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Palabras clave:

Simulación médica
Ecografía
Cirugía ortopédica
Formación médica
Técnicas mínimamente invasivas

Keywords:

Medical simulation
Ultrasound
Orthopedic surgery
Medical education
Minimally invasive techniques

R E S U M E N

Introducción: Las técnicas mínimamente invasivas guiadas por ecografía han demostrado un notable crecimiento en Cirugía Ortopédica y Traumatología. Sin embargo, su aprendizaje presenta una elevada complejidad, lo que ha impulsado el desarrollo de modelos de simulación específicos como herramienta docente.

Objetivo: Evaluar la efectividad de un programa de entrenamiento mediante *phantoms* personalizados para la adquisición de habilidades en técnicas mínimamente invasivas guiadas por ecografía.

Métodos: Estudio prospectivo comparativo con 20 médicos internos residentes, distribuidos en grupo intervención (n = 10; formación con *phantoms*) y grupo control (n = 10; formación habitual sin entrenamiento con *phantom*). Se evaluó la transferencia del aprendizaje en un modelo cadavérico, el desempeño técnico mediante rúbricas específicas y la autopercepción de competencia mediante cuestionarios.

Resultados: El grupo intervención mostró una reducción significativa en el tiempo de ejecución (p < 0,001) y en el número de intentos (p < 0,001). Además, obtuvo mejores resultados en desempeño técnico y autopercepción, destacando diferencias significativas en la satisfacción (p = 0,002), el esfuerzo percibido (p = 0,035) y la frustración (p < 0,001).

Conclusión: El entrenamiento con *phantoms* personalizados mejora el aprendizaje técnico y la percepción de competencia en técnicas mínimamente invasivas guiadas por ecografía, representando una herramienta eficaz y transferible para la formación en Cirugía Ortopédica y Traumatología.

A B S T R A C T

Introduction: Ultrasound-guided minimally invasive techniques have experienced remarkable growth in Orthopedic Surgery and Traumatology. However, their learning process is complex, leading to the development of specific simulation models as educational tools.

Objective: To evaluate the effectiveness of a personalized *phantom*-based training program for acquiring skills in ultrasound-guided minimally invasive techniques.

Methods: A prospective comparative study was conducted with 20 orthopedic surgery residents, assigned to an intervention group (n = 10; trained with phantoms) or a control group (n = 10; usual training without phantom-based training). Learning transfer was assessed in a cadaver model, technical performance was evaluated using specific rubrics, and self-perceived competence was measured via questionnaires.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: jorge_rct@hotmail.com (J.R. Calvo-Tapies).

<https://doi.org/10.1016/j.recot.2026.03.005>

Recibido el 4 de diciembre de 2025; Aceptado el 13 de marzo de 2026

Disponible en Internet el xxx

1888-4415/© 2026 SECOT. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Cómo citar este artículo: J.R. Calvo-Tapies, J. Albareda-Albareda, J. Gómez-Vallejo et al., Desarrollo y validación de un sistema de aprendizaje específico de técnicas mínimamente invasivas guiadas por ecografía en Cirugía Ortopédica y Traumatología, Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología, <https://doi.org/10.1016/j.recot.2026.03.005>

Results: The intervention group showed a significantly shorter execution time ($P < .001$) and fewer attempts ($P < .001$). Technical performance and self-perceived competence were superior in the intervention group, with significant differences in satisfaction ($P = .002$), perceived effort ($P = .035$), and frustration ($P < .001$).

Conclusion: Training with personalized phantoms improves technical performance and self-perceived competence in ultrasound-guided minimally invasive procedures, representing an effective and transferable tool for training in Orthopedic Surgery and Traumatology.

Introducción

Las técnicas mínimamente invasivas guiadas por ecografía han experimentado un notable auge en el ámbito de la Cirugía Ortopédica y Traumatología durante la última década, debido fundamentalmente a su elevada precisión, seguridad y eficacia¹. La posibilidad de acceder de forma directa y selectiva a determinadas estructuras anatómicas ha permitido obtener resultados terapéuticos específicos, minimizando los riesgos asociados². Antes de la introducción de la ecografía, estas técnicas se realizaban guiadas por palpación, mediante la identificación de referencias anatómicas superficiales o a través de técnicas de imagen como la radiografía o la tomografía computarizada. No obstante, la ecografía ha supuesto un avance decisivo al permitir la visualización en tiempo real de las estructuras anatómicas y la trayectoria de las agujas, eliminando la exposición a radiaciones ionizantes y mejorando la seguridad y la precisión de los procedimientos³.

Sin embargo, la aplicación clínica de estas técnicas requiere una formación específica, dado que implica el dominio simultáneo de la interpretación ecográfica, la orientación espacial y la coordinación psicomotriz. La complejidad de la imagen ecográfica, la variabilidad de las ventanas anatómicas y la necesidad de adquirir habilidades bimanuales han convertido su aprendizaje en un proceso con una curva de aprendizaje prolongada⁴. Tradicionalmente, la adquisición de estas competencias se ha basado en el modelo de aprendizaje maestro-aprendiz (*master-apprentice*), que ha predominado en la formación médica durante más de un siglo^{5,6}. Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones relevantes en el contexto actual. Por un lado, las oportunidades formativas se ven condicionadas por la presión asistencial, las restricciones presupuestarias y la disponibilidad de casos clínicos adecuados, dificultando el aprendizaje progresivo y limitando la posibilidad de recibir retroalimentación inmediata. Por otro lado, el aprendizaje sobre pacientes plantea cuestiones éticas y legales, debido al creciente énfasis en la seguridad y el bienestar del paciente⁷.

Ante estas limitaciones, la formación mediante simulación ha emergido como un método eficaz y seguro. Este enfoque permite la práctica repetida en entornos controlados, facilita la identificación y la corrección de errores y proporciona retroalimentación inmediata, favoreciendo la adquisición de habilidades técnicas y su transferencia efectiva a la práctica clínica real⁸. Entre las diversas herramientas de simulación, los modelos *phantom* destacan como una opción especialmente útil, al permitir la práctica de tareas específicas en condiciones reproducibles⁹. Sin embargo, los modelos comerciales disponibles suelen presentar limitaciones en cuanto a su coste elevado, su accesibilidad restringida y su limitada durabilidad¹⁰. En este sentido, el desarrollo de *phantoms* personalizados, diseñados para técnicas específicas, reutilizables y de bajo coste, ha supuesto un avance significativo, al permitir prácticas altamente específicas de forma accesible y prolongada¹¹.

El entrenamiento con estos modelos ha demostrado su eficacia en la mejora de la destreza técnica, permitiendo alcanzar competencias adecuadas en un periodo de tiempo reducido, siempre que se disponga de un programa formativo estructurado y de calidad¹². No obstante, para integrar estos modelos en programas formativos oficiales es necesario validar su eficacia educativa mediante estudios rigurosos que evalúen la transferencia del aprendizaje. Esta validación debe contemplar múltiples dimensiones y utilizar métodos como cuestionarios, evaluaciones pre y postintervención, escalas de evaluación global y estudios comparativos¹³. Por ello, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la

eficacia de un programa de entrenamiento basado en *phantoms* personalizados para la enseñanza de técnicas mínimamente invasivas guiadas por ecografía en Cirugía Ortopédica y Traumatología. Se plantea determinar si la implementación de esta herramienta mejora la calidad, la velocidad de aprendizaje y la transferencia de las habilidades adquiridas a la práctica clínica real, estableciendo así las bases para un futuro currículo formativo estandarizado en este campo.

Material y métodos

Diseño del estudio

Se diseñó un proyecto educativo prospectivo de análisis del proceso de enseñanza-aprendizaje, con enfoque longitudinal y comparativo, para evaluar la efectividad de un nuevo modelo educativo basado en simulación mediante *phantoms* específicos en técnicas mínimamente invasivas guiadas por ecografía en Cirugía Ortopédica y Traumatología. Esta actividad se encuadró dentro del programa formativo interno de Médicos Internos Residentes del Hospital Clínico Universitario Lozano Blesa y fue planteada como una actividad docente voluntaria orientada a la mejora y a la evaluación de un proceso de enseñanza-aprendizaje, sin implicar investigación clínica sobre pacientes ni intervenciones asistenciales. Por ello, no se consideró preciso someter el proyecto a evaluación por el Comité Ético de Investigación Clínica. No obstante, el estudio se desarrolló respetando los principios de voluntariedad, información previa, consentimiento y confidencialidad de los datos personales.

Participantes

La muestra estuvo compuesta por 20 médicos internos residentes del Hospital Clínico Universitario Lozano Blesa. Diez participaron en el programa formativo específico basado en entrenamiento con *phantoms* (grupo intervención), mientras que los otros diez continuaron con su formación habitual y actuaron como grupo control. La asignación a los grupos no fue aleatorizada, sino que respondió a criterios organizativos del programa docente del servicio. El grupo intervención estuvo constituido por los residentes que participaron en la actividad formativa programada, mientras que el resto de médicos residentes disponibles en el mismo periodo actuaron como grupo control para la comparación. Participaron médicos internos residentes de distintos años del programa de especialidad. A pesar de que la distribución de niveles formativos fue similar en ambos grupos, debido a las características organizativas del programa docente, no fue posible realizar una asignación estratificada por año de residencia ni un emparejamiento previo por nivel de experiencia. Todos los participantes fueron informados previamente de las características de la actividad, su participación fue voluntaria, firmaron el consentimiento informado y se garantizó el cumplimiento de la normativa vigente sobre protección de datos personales. Con el fin de evitar perjuicios formativos, los participantes del grupo control tuvieron la posibilidad de realizar posteriormente el mismo entrenamiento con *phantoms* una vez finalizada la evaluación comparativa.

Procedimiento

El grupo intervención llevó a cabo un programa de entrenamiento técnico específico sobre un *phantom* diseñado para la práctica repetida y estandarizada de las técnicas. El programa formativo incluyó la

utilización de *phantoms* personalizados, fabricados en silicona y otros materiales adaptados, diseñados para reproducir estructuras anatómicas relevantes y permitir la práctica repetida de técnicas mínimamente invasivas guiadas por ecografía¹⁴. Los modelos reproducían tres escenarios clínicos distintos, seleccionados en función de su relevancia y frecuencia en la práctica clínica habitual en Cirugía Ortopédica y Traumatología. Los procedimientos evaluados incluyeron tres escenarios diseñados para representar diferentes tipos de abordaje ecoguiado: 1) localización y punción del centro de un vientre muscular; 2) abordaje de una interfase entre tejidos, y 3) acceso a una estructura cavitaria o receso anatómico. Por el contrario, el grupo control no recibió este entrenamiento previo y continuó con su formación habitual sin exposición al *phantom*. Finalmente, todos los participantes ejecutaron las mismas técnicas en un modelo cadavérico humano, lo que permitió analizar la transferencia del aprendizaje y comparar el rendimiento entre quienes habían realizado el entrenamiento con *phantom* y quienes no.

Variables de estudio

La variable independiente de este estudio fue la participación en un programa educativo estructurado mediante *phantoms* personalizados para la enseñanza de técnicas mínimamente invasivas guiadas por ecografía. Dicho programa incluyó una introducción teórica inicial (aproximadamente 30 minutos), seguida de tres prácticas supervisadas de 10 minutos cada una sobre el *phantom*, con evaluación sistemática y retroalimentación inmediata tras cada intento. La duración total del entrenamiento específico fue de aproximadamente 60 minutos por participante. El entrenamiento se centró no solo en la correcta ejecución técnica, sino también en la comprensión de los principios ecográficos aplicados, la optimización de la imagen y la identificación de errores comunes. De este modo, la variable independiente quedó operacionada como la exposición o no al programa educativo con *phantoms*, diferenciando dos grupos:

- Grupo intervención: médicos internos residentes que realizaron el entrenamiento completo mediante *phantoms*.
- Grupo control: médicos internos residentes que no recibieron el programa educativo propuesto mediante *phantoms*.

Ambos grupos recibieron su formación habitual dentro del programa de residencia, basada en sesiones teóricas, asistencia quirúrgica supervisada y aprendizaje clínico progresivo.

Este diseño permitió analizar el efecto directo del programa educativo sobre las variables dependientes seleccionadas, es decir, el desempeño técnico, la autopercepción de competencia y la transferencia del aprendizaje.

Las variables dependientes incluyeron el desempeño técnico y la autopercepción de competencia, evaluados durante la ejecución final de la técnica en un modelo cadavérico humano en tres escenarios: 1) acceso al receso lateral de la rodilla, simulando una artrocentesis ecoguiada; 2) abordaje de la interfase grasa de Hoffa-tendón rotuliano, simulando una infiltración ecoguiada, y 3) punción del centro del vientre muscular del gastrocnemio, simulando una técnica intramuscular ecoguiada. Cada uno de ellos permitía trabajar la manipulación coordinada de la sonda y la aguja, la orientación espacial bajo control ecográfico y la precisión en la ejecución de la punción en diferentes planos anatómicos. El desempeño técnico se valoró mediante una rúbrica basada en los *Quality-Compromising Behaviors* (QCBs), previamente validados en la literatura científica¹⁵, que permite identificar conductas susceptibles de comprometer la seguridad o la efectividad del procedimiento (visualización inadecuada de la aguja, errores de profundidad, malposicionamiento, dificultades en el manejo de la sonda y descoordinación sonda-aguja). La autopercepción de competencia se evaluó mediante un cuestionario estandarizado de ocho ítems administrado con escala tipo Likert, que recogía dimensiones como demanda mental y física, presión temporal, satisfacción, esfuerzo percibido y frustración. La evaluación en el

modelo cadavérico, considerado un entorno de alta fidelidad, permitió analizar la transferencia del aprendizaje y comparar de forma integrada las variables objetivas y subjetivas entre grupos.

Análisis estadístico

El análisis de los datos se llevó a cabo utilizando el software SPSS versión 20.0 (IBM Corp., Armonk, NY, EE.UU.). En primer lugar, se realizó una descripción general de las variables incluidas en el estudio, utilizando la media y la desviación estándar para aquellas que presentaron una distribución normal, y la mediana junto con el rango intercuartílico para las variables que no cumplían los criterios de normalidad. Posteriormente, se procedió a comparar el comportamiento de ambos grupos mediante pruebas inferenciales seleccionadas en función de la distribución de los datos: se empleó la prueba t de Student para las variables paramétricas y la prueba no paramétrica de la U de Mann-Whitney cuando las variables no seguían una distribución normal. Se estableció un nivel de significación del 5% ($p < 0,05$).

Resultados

La **tabla 1** muestra la transferencia del aprendizaje al modelo cadavérico. El grupo intervención completó el procedimiento en un tiempo significativamente menor y con menos intentos que el grupo control ($p < 0,001$ en ambos casos). La tasa de éxito final fue del 100% en ambos grupos.

En relación con el desempeño técnico (**tabla 2**), el grupo intervención obtuvo mejores resultados globales que el grupo control, alcanzando una puntuación total significativamente superior ($p = 0,004$). Aunque algunas variables individuales mostraron únicamente tendencia a la significación, la reducción de errores en el manejo fue significativamente mayor en el grupo intervención ($p = 0,002$).

Respecto a la autopercepción de competencia (**tabla 3**), el grupo intervención presentó mayor satisfacción ($p = 0,002$) y menores niveles de esfuerzo percibido ($p = 0,035$) y frustración ($p < 0,001$). Las diferencias en demanda mental, demanda física y presión temporal no alcanzaron significación estadística.

Discusión

El presente estudio ha demostrado que el entrenamiento mediante un modelo de simulación con *phantoms* específicos, diseñado para la enseñanza de técnicas mínimamente invasivas guiadas por ecografía en Cirugía Ortopédica y Traumatología, proporciona beneficios significativos en la adquisición de competencias técnicas y en la autopercepción de la competencia por parte de los participantes. El uso de la ecografía en procedimientos intervencionistas ha transformado la práctica clínica en múltiples disciplinas, mejorando la precisión, el tiempo de inicio y la calidad de los bloqueos nerviosos en comparación con técnicas tradicionales¹⁶. Sin embargo, alcanzar este nivel de eficacia clínica depende en gran medida de la adquisición previa de competencias técnicas específicas, lo que justifica la necesidad de estrategias de entrenamiento estructuradas y validadas, como las evaluadas en el presente estudio.

Nuestros hallazgos revelan que los participantes del grupo intervención, que realizaron el entrenamiento previo con *phantoms*, mostraron una transferencia del aprendizaje superior al modelo cadavérico en comparación con el grupo control. Los tiempos de ejecución fueron significativamente menores en el grupo intervención, reduciéndose en más de dos tercios respecto al grupo control, lo que sugiere una mejor automatización de la secuencia técnica y una mayor eficiencia en la ejecución. Además, el número de intentos necesarios para completar con éxito el procedimiento fue también significativamente inferior, lo que indica una mejor integración de las habilidades motoras y cognitivas. Estos resultados coinciden con estudios previos en los que el entrenamiento mediante simulación ha mostrado mejorar la rapidez y

Tabla 1

Resultados descriptivos y comparativos de la transferencia del aprendizaje en modelo cadavérico en cada grupo

Variable	Grupo control (media ± DE)	Grupo intervención (media ± DE)	p
Tiempo, media (s)	98,20 (56,89)	31,00 (15,54)	< 0,001
Intentos, media	4,30 (1,34)	1,40 (0,52)	< 0,001
Éxito	100%	100%	1,000

DE: desviación estándar.

Nivel de significación estadística establecido en $p < 0,05$.

Tabla 2

Resultados descriptivos y comparativos del desempeño técnico en modelo cadavérico de cada grupo

Variable	Control (% de Sí)	Intervención (% de Sí)	p
Avance aguja	40,0%	80,0%	0,068
Profundidad aguja	50,0%	90,0%	0,051
Contacto anatómico	100,0%	100,0%	1,000
Malposicionamiento	60,0%	90,0%	0,121
Orientación sonda	70,0%	80,0%	0,606
Errores manejo	20,0%	90,0%	0,002
Total	3,40 (1,35)	5,30 (0,95)	0,004

Nivel de significación estadística establecido en $p < 0,05$.

Los valores se expresan como porcentaje de ejecuciones correctas para cada variable; la puntuación total se presenta como porcentaje de ejecución correcta o media (DE) en el caso de la puntuación total de 0 (peor puntuación) a 6 (mejor puntuación).

la precisión en procedimientos ecoguiados, contribuyendo a una curva de aprendizaje más corta y segura^{9,17}. Específicamente, en cuanto al desempeño técnico, los participantes del grupo intervención presentaron mejores resultados en la mayoría de las variables analizadas. Si bien algunas diferencias no alcanzaron significación estadística, probablemente debido al tamaño muestral limitado, la tendencia global favorece claramente al grupo intervención. Cabe destacar el hallazgo significativo en la variable «errores en el manejo», donde el grupo intervención presentó una tasa de error significativamente menor en comparación con el grupo control. Esto resulta particularmente relevante, ya que los errores en el manejo de la aguja o de la sonda durante procedimientos ecoguiados pueden comprometer la seguridad y la efectividad de la técnica. La puntuación global de desempeño técnico también fue significativamente superior en el grupo intervención, evidenciando el impacto positivo del entrenamiento simulado sobre la calidad técnica objetiva. Estos resultados reafirman la utilidad de los modelos de simulación para el desarrollo de habilidades psicomotrices complejas, como las que requieren la manipulación simultánea de la sonda ecográfica y la aguja, una de las principales dificultades reportadas en la literatura sobre formación en procedimientos ecoguiados¹³.

Tabla 3

Resultados descriptivos y comparativos de la autopercepción de competencia entre grupos

Variable	Grupo intervención (media ± DE)	Grupo control (media ± DE)	p
Demanda mental, media (0-10)	3,90 (1,79)	5,70 (2,00)	0,052
Demanda física, media (0-10)	1,50 (1,27)	2,80 (2,04)	0,165
Presión temporal, media (0-10)	4,10 (2,33)	5,60 (2,76)	0,218
Satisfacción, media (0-10)	8,20 (1,55)	5,50 (1,65)	0,002
Esfuerzo percibido, media (0-10)	4,00 (1,83)	5,90 (1,79)	0,035
Frustración, media (0-10)	1,70 (1,16)	5,40 (2,32)	< 0,001

DE: desviación estándar.

Nivel de significación estadística establecido en $p < 0,05$. Los valores se expresan como media (DE). La escala utilizada para cada variable fue de 0 a 10.

La selección de los tres escenarios evaluados no fue arbitraria, sino que respondió a la intención de representar patrones técnicos diferenciados dentro de los procedimientos ecoguiados musculoesqueléticos. El abordaje del centro de un vientre muscular reproduce técnicas intramusculares que requieren control de profundidad y estabilidad del plano ecográfico^{18,19}. El acceso a una interfase tisular implica mayor precisión en la delimitación de planos anatómicos contiguos^{20,21}, mientras que la punción de una estructura cavitaria o receso anatómico exige una orientación espacial más compleja y una triangulación precisa para alcanzar una diana potencialmente pequeña y colapsable^{22,23}. Estos tres patrones técnicos están ampliamente descritos en la literatura sobre intervencionismo ecoguiado musculoesquelético y constituyen escenarios habituales en la práctica clínica, lo que los convierte en modelos adecuados para evaluar la transferencia de habilidades técnicas de diferente complejidad.

Nuestros hallazgos también son congruentes con estudios recientes que han demostrado que el uso de dispositivos de simulación y guías ecográficas facilita la adquisición de habilidades técnicas complejas con un aprendizaje eficiente y bien tolerado por los participantes. Backhaus et al.¹⁵ evaluaron la factibilidad y la curva de aprendizaje de un sistema de guía de aguja para punción lumbar ecoguiada en estudiantes sin experiencia previa, demostrando que, tras un corto periodo de formación, los participantes no solo lograban mayores tasas de éxito técnico, sino que además reducían significativamente los tiempos de ejecución y reportaban niveles más bajos de frustración y carga mental. Estos resultados coinciden con los obtenidos en nuestro estudio, donde el grupo intervención, tras la formación mediante *phantoms*, alcanzó mejores resultados objetivos y subjetivos en desempeño técnico y autopercepción de competencia, con menores tiempos de ejecución, menos intentos, mayor satisfacción y menor frustración. Aunque las diferencias en demanda mental, demanda física y presión temporal no alcanzaron la significación estadística, la tendencia observada sugiere un impacto positivo del entrenamiento simulado en la percepción global de la dificultad técnica. Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que han mostrado que la simulación no solo mejora las habilidades técnicas objetivas, sino que también contribuye a reducir la ansiedad y el estrés durante la ejecución de procedimientos clínicos reales^{7,8}. Todo ello respalda que el uso de simuladores específicos puede facilitar la adquisición rápida y efectiva de habilidades en procedimientos ecoguiados, incluso en personas sin experiencia previa.

Nuestros resultados apoyan los hallazgos de investigaciones previas que han evaluado el impacto de sistemas de simulación avanzados para la enseñanza de procedimientos ecoguiados en entornos de simulación complejos. Keri et al.²⁴ realizaron un ensayo clínico aleatorizado donde demostraron que los residentes entrenados con un sistema de simulación computarizada 3D, que permite la visualización simultánea de la ecografía y la trayectoria de la aguja en un modelo anatómico tridimensional, presentaban mejores resultados objetivos durante la realización de punciones lumbares ecoguiadas en modelos con patología espinal compleja. Concretamente, los participantes del grupo intervención mostraron una menor trayectoria de la aguja, menor daño potencial a los tejidos y tiempos más reducidos de inserción de la aguja, sin diferencias en la tasa de

éxito global del procedimiento. De forma análoga, en nuestro estudio, el entrenamiento previo con *phantoms* personalizados permitió a los participantes alcanzar mejores métricas de desempeño técnico en términos de tiempos de ejecución, número de intentos y puntuación global, además de obtener mejores percepciones subjetivas de la técnica. Estos resultados refuerzan la utilidad de los modelos de simulación, tanto avanzados como de bajo coste, para mejorar la eficiencia, la precisión y la seguridad en la formación en procedimientos mínimamente invasivos guiados por ecografía.

La mejora simultánea en las medidas objetivas y subjetivas observada en nuestro estudio sugiere que la incorporación sistemática de modelos de simulación específicos puede constituir un recurso formativo de alto valor en los programas de Cirugía Ortopédica y Traumatología. Este tipo de entrenamiento ofrece a los residentes la posibilidad de practicar en un entorno seguro y controlado, permitiendo la adquisición progresiva de habilidades técnicas antes de su aplicación en pacientes reales. La posibilidad de realizar múltiples repeticiones en un entorno seguro y controlado, junto con la retroalimentación inmediata, promueve un aprendizaje activo alineado con los principios del aprendizaje deliberado. No obstante, debe considerarse que la durabilidad de los *phantoms* puede verse limitada por el uso repetido, lo que podría afectar su rendimiento y su coste-efectividad a largo plazo. Futuros estudios deberían evaluar la resistencia del material y su comportamiento tras un número elevado de prácticas para determinar su viabilidad en programas formativos continuados. En cualquier caso, la literatura coincide en subrayar esta necesidad de disponer de modelos de simulación de bajo o nulo coste permiten desarrollar habilidades esenciales en un entorno seguro y exento de riesgos para los pacientes, mejorando la preparación previa a la práctica clínica real²⁵. Tales simuladores se han revelado particularmente útiles en entornos donde los dispositivos comerciales resultan económicamente inaccesibles. En consonancia con esta evidencia, Colaco et al.²⁶ demostraron que un simulador artroscópico de bajo coste era capaz de discriminar distintos niveles de experiencia y favorecer una mejora progresiva con la práctica repetida, además de ser bien valorado por su sencillez y portabilidad.

Entre las fortalezas de este estudio destacan el diseño comparativo controlado, la utilización de un modelo cadavérico como referencia para la transferencia, y la evaluación combinada de variables objetivas y subjetivas. Sin embargo, deben reconocerse varias limitaciones inherentes al diseño y a la ejecución de este estudio. En primer lugar, el tamaño muestral fue reducido, ya que el proyecto se desarrolló exclusivamente con médicos internos residentes de un único centro hospitalario. Este tamaño limitado puede restringir la potencia estadística y la generalización de los resultados, por lo que los hallazgos deben interpretarse con cautela. Futuros estudios con un mayor número de participantes, idealmente con diseño multicéntrico, permitirán confirmar y ampliar los hallazgos observados. En segundo lugar, el diseño de los *phantoms* se limitó a tres situaciones clínicas específicas, seleccionadas con el objetivo de facilitar un control del aprendizaje. Aunque este planteamiento permitió analizar con detalle la progresión en la adquisición de competencias, la aplicabilidad del modelo a otras situaciones clínicas no fue explorada en esta fase inicial. Además, si bien se ha demostrado la transferencia del aprendizaje al modelo cadavérico, el estudio no evaluó la efectividad directa de la herramienta en pacientes reales. El hecho de que los participantes del grupo intervención mostraran un mejor rendimiento en un entorno cadavérico, considerado altamente realista, sugiere un alto potencial de transferencia clínica, pero su validación clínica final requerirá estudios adicionales que confirmen la utilidad de la herramienta en la práctica asistencial habitual. Además, el año de residencia podría influir en habilidades psicomotrices, como la coordinación bimanual y la triangulación ecográfica; sin embargo, el tamaño muestral del presente estudio no permitió realizar análisis por subgrupos ajustados por nivel de experiencia. Futuros estudios con mayor tamaño muestral deberían explorar este posible efecto. Por último, cabe señalar que, debido a la naturaleza educativa del estudio, no fue posible aplicar un cegamiento de los participantes. Esta limitación metodológica

podría haber influido en la valoración subjetiva de algunas variables, especialmente en las relacionadas con la autopercepción de competencia. Futuros estudios deberán considerar estrategias metodológicas que minimicen este sesgo. Pese a estas limitaciones, los resultados obtenidos aportan evidencia relevante sobre la utilidad de los modelos de simulación personalizados para mejorar el aprendizaje y el desempeño técnico en técnicas mínimamente invasivas guiadas por ecografía. Estos hallazgos abren la puerta a futuras investigaciones multicéntricas, con muestras más amplias y diseños longitudinales, que permitan confirmar y ampliar la aplicabilidad de esta herramienta formativa.

Conclusiones

El entrenamiento mediante modelos de simulación específicos permite mejorar tanto el desempeño técnico como la autopercepción de competencia en la ejecución de técnicas mínimamente invasivas guiadas por ecografía. La utilización de *phantoms* personalizados representa una estrategia eficaz y reproducible para optimizar la formación en Cirugía Ortopédica y Traumatología, facilitando la adquisición de competencias clave y mejorando la seguridad del paciente.

Nivel de evidencia

Nivel de evidencia II.

Financiación y agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Fundación SECOT a través de la Convocatoria SECOT 2023 - Proyectos de Iniciación a la Investigación. Los autores expresan su agradecimiento por el apoyo recibido y dejan constancia de que, conforme a los requisitos de la Fundación SECOT, esta ayuda será mencionada en cualquier futura publicación o presentación relacionada con los resultados del proyecto, remitiéndose además una separata a la Secretaría de la SECOT en caso de difusión en otras revistas o congresos.

Consideraciones éticas

Todos los procedimientos se realizaron de conformidad con Helsinki, las leyes pertinentes y las directrices institucionales.

Conflicto de intereses

Ninguno.

Bibliografía

- Stewart ZE, Lee K. Lower extremity ultrasound-guided interventions: tendon, ligament, and plantar fascia. *Skeletal Radiol.* 2023;52:991-1003. <http://dx.doi.org/10.1007/S00256-022-04212-4>. PMID: 36326878.
- Mercaldi CJ, Lanes SF. Ultrasound guidance decreases complications and improves the cost of care among patients undergoing thoracentesis and paracentesis. *Chest.* 2013;143:532-538. <http://dx.doi.org/10.1378/CHEST.12-0447>. PMID: 23381318.
- Narouze S, Peng PWH. Ultrasound-guided interventional procedures in pain medicine: a review of anatomy, sonoanatomy, and procedures. Part II: axial structures. *Reg Anesth Pain Med.* 2010;35:386-396. <http://dx.doi.org/10.1097/AAP.0B013E3181E82F42>. PMID: 20607896.
- Seifert LB, Schnurr B, Stefanescu MC, Sader R, Ruesseler M, Sterz J. Comparing video-based versions of Halsted's «see one, do one» and Peyton's «4-step approach» for teaching surgical skills: a randomized controlled trial. *BMC Med Educ.* 2020;20:194. <http://dx.doi.org/10.1186/S12909-020-02105-5>. PMID: 32552805.
- Rashid P. Surgical education and adult learning: integrating theory into practice. *F1000Res.* 2017;6:143. <http://dx.doi.org/10.12688/F1000RESEARCH.10870.1/DOI>.
- Srinivasan D, Kilic Y, Weston-Petrides GK, et al. Teaching strategies in interventional radiology: a narrative review of the literature. *Cardiovasc Intervent Radiol.* 2025;48:133-141. <http://dx.doi.org/10.1007/S00270-024-03891-X>. PMID: 39461908.
- Miller ZA, Amin A, Tu J, Echenique A, Winokur RS. Simulation-based training for interventional radiology and opportunities for improving the educational para-

- digm. *Tech Vasc Interv Radiol.* 2019;22:35–40, <http://dx.doi.org/10.1053/J.TVIR.2018.10.008>. PMID: 30765075.
8. Niazi AU, Haldipur N, Prasad AG, Chan VW. Ultrasound-guided regional anesthesia performance in the early learning period: effect of simulation training. *Reg Anesth Pain Med.* 2012;37:51–54, <http://dx.doi.org/10.1097/AAP.0B013E31823DC340>. PMID: 22179300.
 9. McVicar J, Niazi AU, Murgatroyd H, Chin KJ, Chan VW. Novice performance of ultrasound-guided needling skills: effect of a needle guidance system. *Reg Anesth Pain Med.* 2015;40:150–153, <http://dx.doi.org/10.1097/AAP.0000000000000209>. PMID: 25642909.
 10. Rosenberg AD, Popovic J, Albert DB, et al. Three partial-task simulators for teaching ultrasound-guided regional anesthesia. *Reg Anesth Pain Med.* 2012;37:106–110, <http://dx.doi.org/10.1097/AAP.0B013E31823699AB>. PMID: 22189577.
 11. King DM, Hangiandreou NJ, Tradup DJ, Stekel SF. Evaluation of a low-cost liquid ultrasound test object for detection of transducer artefacts. *Phys Med Biol.* 2010 Dec 7;55:N557–N570, <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/55/23/N01>. PMID: 21081828.
 12. Barrington MJ, Wong DM, Slater B, Ivanusic JJ, Ovens M. Ultrasound-guided regional anesthesia: how much practice do novices require before achieving competency in ultrasound needle visualization using a cadaver model. *Reg Anesth Pain Med.* 2012;37:334–339, <http://dx.doi.org/10.1097/AAP.0B013E3182475FBA>. PMID: 22354107.
 13. Mirza S, Athreya S. Review of simulation training in interventional radiology. *Acad Radiol.* 2018;25:529–539, <http://dx.doi.org/10.1016/J.ACRA.2017.10.009>. PMID: 29221857.
 14. Malo Urriés M, Ríos Asín I, Albarova Corral MI. Simulación con phantoms como metodología de aprendizaje de técnicas invasivas ecoguiadas. *Transformando la educación interprofesional con un enfoque OneHealth: simulación y tecnología.* 2024:67–85 [consultado 1 Mar 2026]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10061886>.
 15. Backhaus T, Cranach M, von Brich J. Ultrasound-guided lumbar puncture with a needle-guidance system: a prospective and controlled study to evaluate the learnability and feasibility of a newly developed approach. *PLoS One.* 2018;13:e0195317, <http://dx.doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0195317>. PMID: 29630646.
 16. Liu SS. Evidence basis for ultrasound-guided block characteristics on-set quality, and duration. *Reg Anesth Pain Med.* 2016;41:205–220, <http://dx.doi.org/10.1097/AAP.000000000000141>. PMID: 26244287.
 17. Niazi AU, Haldipur N, Prasad AG, Chan VW. Ultrasound-guided regional anesthesia performance in the early learning period: effect of simulation training. *Reg Anesth Pain Med.* 2012;37:51–54, <http://dx.doi.org/10.1097/AAP.0B013E31823DC340>. PMID: 22179300.
 18. Barreto Silva A, Malheiro N, Oliveira B, et al. Efficacy of ultrasound-guided infiltration with levobupivacaine and triamcinolone for myofascial pain syndrome of the quadratus lumborum: a retrospective observational study. *Braz J Anesthesiol.* 2023;73:718–724, <http://dx.doi.org/10.1016/J.BJANE.2021.06.026>. PMID: 34411624.
 19. Chin KJ, Versyck B, Elsharkawy H, Rojas Gomez MF, Sala-Blanch X, Reina MA. Anatomical basis of fascial plane blocks. *Reg Anesth Pain Med.* 2021;46:581–599, <http://dx.doi.org/10.1136/RAPM-2021-102506>. PMID: 34145071.
 20. Crisp T, Khan F, Padhiar N, et al. High volume ultrasound guided injections at the interface between the patellar tendon and Hoffa's body are effective in chronic patellar tendinopathy: a pilot study. *Disabil Rehabil.* 2008;30:1625–1634, <http://dx.doi.org/10.1080/09638280701830936>. PMID: 18608403.
 21. Ricci V, Cocco G, Mezzan K, et al. Patellar tendon-Hoffa fat pad interface: from anatomy to high-resolution ultrasound imaging. *Knee.* 2025;52:139–146, <http://dx.doi.org/10.1016/J.KNEE.2024.10.024>. PMID: 39577112.
 22. Wu T, Dong Y, Song HX, Fu Y, Li JH. Ultrasound-guided versus landmark in knee arthrocentesis: a systematic review. *Semin Arthritis Rheum.* 2016;45:627–632, <http://dx.doi.org/10.1016/J.SEMARTHRT.2015.10.011>. PMID: 26791571.
 23. Flores DV, Sampaio ML, Agarwal A. Ultrasound-guided injection and aspiration of small joints: techniques, pearls, and pitfalls. *Skeletal Radiol.* 2024;53:195–208, <http://dx.doi.org/10.1007/S00256-023-04374-9>. PMID: 37354318.
 24. Keri Z, Sydor D, Ungi T, et al. Un système de formation informatisé pour réaliser une ponction lombaire échoguidée sur des modèles de colonne vertébrale anormale: une étude randomisée contrôlée. *Can J Anesth.* 2015;62:777–784, <http://dx.doi.org/10.1007/S12630-015-0367-2/TABLES/2>. PMID: 25804431.
 25. May BJ, Khoury JK, Winokur RS. Tools for simulation; low budget and no budget. *Tech Vasc Interv Radiol.* 2019;22:3–6, <http://dx.doi.org/10.1053/J.TVIR.2018.10.002>. PMID: 30765073.
 26. Colaco HB, Hughes K, Pearse E, Armander M, Tennent D. Construct validity assessment of the learning curve, and experience of using a low-cost arthroscopic surgical simulator. *J Surg Educ.* 2017;74:47–54, <http://dx.doi.org/10.1016/J.JSURG.2016.07006>. PMID: 27720405.