



Realidad virtual en física y matemáticas para ingeniería agronómica: un estudio cuasi-experimental

- Virtual Reality in Physics and Mathematics for Agricultural Engineering: A Quasi-experimental Study
- Realidade virtual em física e matemática para a engenharia agronômica: um estudo quase-experimental

Forma de citar este artículo

Sarmiento-Vanegas, J. A., Méndez-Pineda, D. O., Cárdenas-Iriarte, K. y Hernández-Rodríguez, J. D. (2026). Realidad virtual en física y matemáticas para ingeniería agronómica: un estudio cuasi-experimental. *Tecné Episteme y Didaxis: TED*, (60), e24773, <https://doi.org/10.17227/ted.num60-24773>

Resumen

Este estudio evaluó el impacto de la realidad virtual (RV) en el aprendizaje de física y matemáticas en 46 estudiantes de los primeros semestres de Ingeniería Agronómica de la Universidad de Cundinamarca mediante un diseño cuasi-experimental con grupo experimental ($n = 35$, con RV) y grupo control ($n = 11$, sin RV). Se aplicaron pretest y posttest (0-100 %), alineados con el módulo de razonamiento cuantitativo de las pruebas Saber Pro. La intervención se implementó en Unity 6, con simulaciones físicas (NVIDIA PhysX) y soporte para Meta Quest 3. El análisis en Python 3.12 mediante ANOVA de medidas repetidas (2×2) mostró una mejora significativa en el grupo experimental (+32,6 puntos, $p < 0,001$, $d = 1,54$), frente a un cambio no significativo en el grupo control (+9,5 puntos, $p = 0,242$). La interacción Grupo $\times$ Momento fue significativa ($F(1, 88) = 8,33$, $p = 0,005$). Además, según el RCI, el 74,3 % de los estudiantes con RV reportó mejoras confiables, y el número necesario a tratar (NNT) fue 3, lo que indica alta eficiencia. Los hallazgos respaldan la RV como estrategia pedagógica eficaz para la enseñanza de las ciencias básicas en el marco de la Agricultura 4.0.

Palabras clave

tecnología educativa; instrucción en ciencias; simulación computacional; diseño cuasi-experimental

Javier Alberto Sarmiento-Vanegas* 
Diego Orlando Méndez-Pineda** 
Katherine Cárdenas-Iriarte*** 
Jeison David Hernández-Rodríguez*** 

- * Magíster en Ciencias (Física). Docente, Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá, Colombia. jsarmientov@ucundinamarca.edu.co
- ** Especialista en Educación Ambiental y Desarrollo de la Comunidad. Docente, Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá, Colombia. dmendezp@ucundinamarca.edu.co
- *** Especialista en Educación Ambiental y Desarrollo de la Comunidad. Docente, Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá, Colombia. kcardenas@ucundinamarca.edu.co
- **** Ingeniero de Sistemas y Computación. Estudiante, Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá, Colombia. jeisonhernandez@ucundinamarca.edu.co

Artículo de investigación

Fecha de recepción: 06/03/2026
Fecha de aprobación: 12/06/2026
Fecha de publicación: 01/07/2026



Abstract

This study evaluated the impact of virtual reality (VR) on physics and mathematics learning among 46 first-semester Agronomic Engineering students at the University of Cundinamarca, using a quasi-experimental design with an experimental group ($n=35$, VR-based) and a control group ($n=11$, non-VR). Pre- and post-tests (0–100 %) aligned with the quantitative reasoning module of the Saber Pro exams were administered. The VR application was developed in Unity 6, incorporating NVIDIA PhysX physics simulations and Meta Quest 3 compatibility. Quantitative analysis, performed in Python 3.12 using a 2×2 repeated-measures ANOVA, revealed a significant improvement in the experimental group (+32.6 points, $p<0.001$, $d=1.54$), compared to a non-significant gain in the control group (+9.5 points, $p=0.242$). The Group $\times$ Time interaction was significant ($F(1,88)=8.33$, $p=0.005$). Furthermore, 74.3 % (corresponding RCI) of VR-exposed students achieved reliable learning gains, and the Number Needed to Treat (NNT) was 3, indicating high effectiveness. Findings support VR as an effective pedagogical strategy for teaching foundational sciences within the context of Agriculture 4.0.

Keywords

educational technology; science instruction; computer simulation; quasi-experimental design

Resumo

Este estudo avaliou o impacto da realidade virtual (RV) na aprendizagem de física e matemática em 46 estudantes dos primeiros semestres de Engenharia Agrônômica da Universidade de Cundinamarca, por meio de um delineamento quase-experimental com grupo experimental ($n = 35$, com RV) e grupo controle ($n = 11$, sem RV). Foram aplicados pré-teste e pós-teste (0–100 %), alinhados ao módulo de raciocínio quantitativo das provas Saber Pro. A intervenção foi implementada no Unity 6, com simulações físicas (NVIDIA PhysX) e suporte para Meta Quest 3. A análise em Python 3.12, por meio de ANOVA de medidas repetidas (2×2), mostrou uma melhora significativa no grupo experimental (+32,6 pontos, $p < 0,001$, $d = 1,54$), em comparação com uma mudança não significativa no grupo controle (+9,5 pontos, $p = 0,242$). A interação Grupo $\times$ Momento foi significativa ($F(1,88) = 8,33$, $p = 0,005$). Além disso, 74,3 % (correspondente RCI) dos estudantes com RV relataram melhorias confiáveis, e o Número Necessário para Tratar (NNT) foi 3, indicando alta eficiência. Os resultados corroboram a RV como uma estratégia pedagógica eficaz para o ensino de ciências básicas no contexto da Agricultura 4.0.

Palavras-chave

tecnologia educativa; ensino das ciências; simulação computacional; desenho quase-experimental

Introducción

La física y las matemáticas son una base teórica indispensable cuando se habla de ingenierías o ciencias aplicadas, ya que, a partir de conceptos, interpretaciones y ecuaciones, permiten validar leyes universales mediante distintos métodos. El aprendizaje de estas disciplinas exige habilidades lógico-matemáticas, así como diferentes habilidades cognitivas (Duarte-Gastélum, 2023). Además, requiere una enseñanza que no se base totalmente en el uso de textos y en la transmisión unidireccional del conocimiento (Elizondo-Treviño, 2013). Por ello, enseñar física y matemáticas no puede reducirse a transmitir ecuaciones: exige diseñar experiencias en las que docentes y estudiantes construyan juntos el conocimiento, apoyados en herramientas que despierten la curiosidad y sostengan el interés a lo largo del proceso formativo.

En el caso específico de la ingeniería agronómica, esta necesidad se vuelve más urgente. La enseñanza de estas disciplinas enfrenta una desconexión estructural entre asignaturas básicas y aplicadas que genera desinterés estudiantil y déficits en competencias cognitivas (Biasoni *et al.*, 2012). Esta brecha se profundiza porque dichas asignaturas se imparten en los primeros semestres, antes de que los estudiantes tengan contacto con su área profesional, lo que entorpece la construcción de vínculos significativos con el contexto disciplinar (Biasoni *et al.*, 2012; Perdigones *et al.*, 2014). Los datos son significativos: entre el 10 % y el 17 % no identifican relaciones entre la física y su futura profesión (Bulgakova *et al.*, 2023), mientras que materias como Matemáticas I y Física I registran tasas de rendimiento académico muy bajas en carreras afines (Perdigones *et al.*, 2014). Este escenario evidencia la necesidad de propuestas pedagógicas que integren de manera más efectiva las ciencias

básicas con las aplicaciones propias del campo agronómico (Mena y Mena, 2011).

Frente a este desafío, la transformación digital de la educación ha consolidado la realidad virtual (RV) y la realidad aumentada (RA) como herramientas clave en contextos STEM, pues generan ambientes inmersivos que enriquecen la comprensión de conceptos físicos y matemáticos (Wen *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024). A nivel tecnológico, estas herramientas ofrecen una interfaz intuitiva y adaptable que genera entornos controlados con fuerte semejanza a la realidad, en los que el estudiante puede manipular variables y obtener resultados en tiempo real, lo que posibilita el análisis, el seguimiento de patrones y la experimentación sin consecuencias (Aguilar-Acevedo *et al.*, 2022; Kumar *et al.*, 2023).

Desde una perspectiva pedagógica, la interacción con escenarios de RV permite que el estudiante construya su conocimiento a partir de la experiencia y potencia los conceptos de las áreas de estudio (Tsichouridis *et al.*, 2020; Valarezo *et al.*, 2023). Estos entornos favorecen la autonomía, la seguridad y la interactividad, ya que permiten aprender según las necesidades, los tiempos y las particularidades cognitivas de cada persona (Schaspchuck *et al.*, 2022; Gallego *et al.*, 2013; Cadena *et al.*, 2019). La literatura es consistente al respecto: el 75 % de las investigaciones reportan resultados positivos en aprendizaje mediante RV; el 60 %, mayor motivación, y el 45 %, mejor transferencia de conocimiento (Moya-Cabrera, 2023). Distintas experiencias documentadas han mostrado mejoras en el desempeño académico, así como en destrezas de razonamiento visual y espacial (Aguilar-Acevedo *et al.*, 2022; Parroquín *et al.*, 2016; Mejía-Carrillo *et al.*, 2024).

Esta evidencia adquiere especial relevancia en la ingeniería agronómica, disciplina que, en el marco de la Agricultura 4.0

(Dayioğlu y Turker, 2021), demanda profesionales con sólidas bases científicas y competencias digitales (Rodríguez-Peña, 2014; Sultan *et al.*, 2024). En este escenario, la RV ofrece una estrategia pedagógica para fortalecer esas bases desde los primeros semestres, incluso en contextos donde la tecnología no siempre es percibida como accesible (Pogorelskaia y Várallyai, 2020).

Con base en este panorama, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el impacto de la realidad virtual en el aprendizaje de la física y la matemática en estudiantes de los primeros semestres de Ingeniería Agronómica de la Universidad de Cundinamarca. Para ello, se diseñaron ocho escenarios de realidad virtual orientados a temáticas específicas de física y matemática aplicada, y se implementó un diseño cuasi-experimental con grupo experimental y grupo control, mediante la aplicación de pruebas de entrada y salida alineadas con el módulo de razonamiento cuantitativo de las pruebas Saber Pro. El análisis estadístico permitió determinar la incidencia de la intervención en el rendimiento académico y en el desarrollo de competencias cognitivas de los participantes.

Metodología

Para el desarrollo de esta investigación, la población objetivo estuvo conformada por estudiantes de pregrado de primer y segundo semestre inscritos en los campos multidimensionales de aprendizaje (CADI) de física y matemática aplicada del programa de Ingeniería Agronómica de la Universidad de Cundinamarca, con una muestra de 46 estudiantes divididos en dos grupos: un grupo experimental, integrado por estudiantes que interactuaron con realidad virtual (RV), y un grupo control, que recibió enseñanza tradicional.

Esta investigación adoptó un diseño cuasi-experimental con enfoque mixto, que combinó análisis cuantitativos (pretest y postest) con un componente cualitativo (encuesta de satisfacción), lo que permitió evaluar el impacto de la realidad virtual tanto en el rendimiento académico como en las experiencias individuales de los estudiantes. De esta manera, se definió:

- Variable independiente 1 (entre-sujetos): Grupo (RV, control)
- Variable independiente 2 (intra-sujetos): Momento (pretest, postest)
- Variable dependiente: puntaje de competencias (escala 0-100 %)

Para el desarrollo de las pruebas se seleccionaron diversos temas fundamentales, los cuales se organizaron como se muestra en la Tabla 1. Además, cada prueba contenía veinte preguntas de selección múltiple con única respuesta, debidamente estructuradas y organizadas por competencias.

En este estudio, el término *competencias* se operacionaliza a través del desempeño en ítems alineados con las competencias de razonamiento cuantitativo definidas por el Instituto Colombiano para la Evaluación de la Educación (ICFES, 2025): interpretación y representación, formulación y ejecución, y argumentación.

Si bien estas dimensiones no abarcan la totalidad del constructo de competencia en sentido amplio, permiten aproximarse a habilidades cognitivas clave relacionadas con la aplicación y el análisis de conceptos físico-matemáticos en contextos académicos.

Tabla 1.

Temáticas seleccionadas en física y matemáticas para aplicación de pruebas pretest y postest

Física		Matemática aplicada
Cinemática	• Movimiento rectilíneo uniforme (MRU). • Movimiento uniformemente acelerado (MUA).	• Geometría analítica. • Ecuaciones. • Desigualdades. • Funciones. • Trigonometría. • Estadística descriptiva.
Dinámica	• Leyes de Newton. • Movimiento circular. • Trabajo y energía.	

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, el desarrollo del software se estructuró según la metodología de desarrollo incremental, combinada con una arquitectura de *software* orientada a componentes para la gestión modular de las funcionalidades. Este enfoque permitió construir el aplicativo de forma iterativa e incorporar gradualmente los distintos módulos de interacción, simulación y visualización. La metodología incremental facilitó la integración progresiva de subsistemas complejos, como el motor de física, la interacción y la optimización del rendimiento, lo que redujo los riesgos asociados a la implementación de múltiples dependencias entre módulos.

El desarrollo del sistema se dividió en cuatro fases:

Fase 1. Levantamiento de requerimientos

En la primera fase, se definieron los requerimientos funcionales del sistema y se identificaron los fenómenos físicos que se debían representar: caída libre, plano inclinado,

movimiento rectilíneo uniforme y movimiento circular uniforme, así como las características funcionales de cada uno de ellos. Posteriormente, se eligió Unity 6 con C# como lenguaje de scripting.

Fase 2. Definición de arquitectura y diseño

El desarrollo de los módulos se realizó bajo la arquitectura orientada a componentes de Unity (CBA, por sus siglas en inglés): en lugar de usar objetos monolíticos, se diseñaron elementos independientes con scripts propios, ajustes configurables y dependencias definidas. Esto permitió armar los objetos del entorno virtual como si fueran piezas de rompecabezas.

Fase 3. Implementación

En esta fase, se construyó el entorno con Unity 6 mediante su motor de física integrado basado en NVIDIA PhysX, ya que permitió simular colisiones, fuerzas y movimientos con un realismo suficiente para los fines del estudio. Gracias a esto, se recrearon entornos físicos con opciones para ajustar propiedades como masa, fricción, fuerzas, etc. Para la interacción, se combinó el XR Interaction Toolkit de Unity con el SDK de Meta y la librería AutoHand, con el fin de permitir al usuario agarrar, mover y soltar objetos como en el mundo real.

Fase 4. Testeo

Una vez construidos los escenarios, se realizaron pruebas de funcionalidad para verificar la consistencia entre el mundo real y el virtual. Además, se determinaron los tiempos de respuesta una vez instalados los escenarios en dispositivos Meta Quest 3. Estas pruebas fueron complementadas con sesiones de retroalimentación interna enfocadas en la experiencia de usuario y la coherencia pedagógica del sistema.

Posteriormente, para la recolección de datos cualitativos, se empleó una encuesta de satisfacción conformada por un conjunto

de ítems con escala tipo Likert de cinco niveles, orientados a tres dimensiones principales:

- Aspectos técnicos y estéticos: se vinculan con el funcionamiento y el diseño de los escenarios, ya que permitieron valorar la estabilidad del sistema, así como la calidad gráfica como factor de inmersión y aceptación de la herramienta tecnológica.
- Usabilidad y motivación: se refiere al manejo, la accesibilidad, el nivel de entretenimiento y la comprensión de la herramienta de RV. Esta dimensión buscó identificar la experiencia del usuario y su disposición motivacional hacia el aprendizaje mediado por la tecnología.
- Aplicabilidad del tutorial o guía de uso: hace referencia a la comprensión y facilidad de la guía para que el usuario aprenda a utilizar la aplicación. Esta sección permitió identificar la pertinencia de la guía de uso como soporte para la solución de dudas durante la utilización de la herramienta.

Esta herramienta fue diseñada con el propósito de evaluar la percepción de los participantes que interactuaron con la realidad virtual, lo que permitió obtener valoraciones subjetivas graduadas sobre diversos atributos del entorno virtual.

Finalmente, para el componente cuantitativo, se aplicó un ANOVA mixto con un diseño cuasi-experimental 2 x 2 mixto, uno experimental (RV) y otro control con dos momentos de medición: pretest y posttest. Este diseño combina un factor entre sujetos, representado por el grupo al que pertenece cada participante, y un factor intra sujetos, referido al momento de medición, ya que cada persona fue evaluada dos veces. Este enfoque permite comparar a cada participante consigo mismo, lo que controla la variabilidad individual y permite analizar si el cambio a lo largo del tiempo (pretest a posttest) depende del grupo. Esto es clave, pues permite determinar si la intervención produjo un efecto diferencial. El análisis estadístico se desarrolló con Python 3.12, complementado con bibliotecas especializadas: SciPy 1.11.0, para la ejecución de pruebas estadísticas fundamentales, y statsmodels 0.14.0, para la implementación de modelos lineales y análisis ANOVA. La organización y manipulación de datos se realizó con pandas 2.0.0. Finalmente, las representaciones gráficas se llevaron a cabo con las librerías matplotlib y seaborn, que permitieron generar visualizaciones claras para apoyar la interpretación de los resultados.

Resultados y análisis

Los resultados muestran una interacción Grupo $\times$ Momento estadísticamente significativa y tamaños del efecto elevados a favor del grupo que utilizó realidad virtual. Sin embargo, es importante interpretar estos hallazgos a la luz del diseño cuasi-experimental empleado. La ausencia de asignación aleatoria y el desba-

lance en el tamaño de los grupos impiden establecer relaciones causales estrictas. No obstante, la equivalencia basal verificada en el pretest y la consistencia de los resultados bajo múltiples enfoques estadísticos sugieren que las mejoras observadas son consistentes con un efecto diferencial asociado a la intervención con realidad virtual.

En este sentido, la Tabla 2 y la Figura 1 condensan la información descriptiva del pretest y el posttest. Al inicio del estudio, el grupo experimental (realidad virtual [RV], $n = 35$) y el grupo control ($n = 11$) no presentaron diferencias significativas en los resultados. Además, de la prueba t para muestras independientes en el pretest se obtiene: , , lo que confirma equivalencia basal entre los grupos.

Tabla 2.

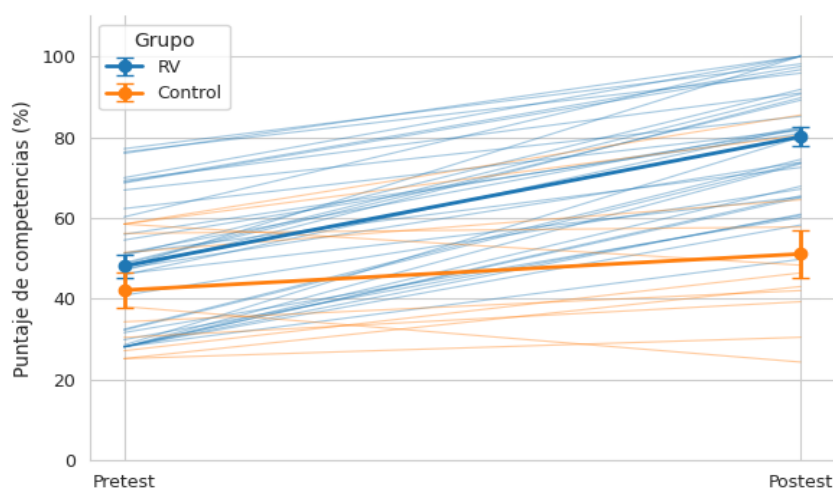
Estadísticos descriptivos (media, desviación estándar, mediana, rango) para pretest, posttest y ganancia por grupo

Grupo	Momento	n	Media	Desviación Estándar	Puntaje min.	Puntaje max.	Mediana
RV	Pretest	35	48,1	16,6	24,6	86,4	45,8
RV	Posttest	35	80,8	15,6	33,3	100	84,7
RV	Ganancia	35	32,6				35,8
Control	Pretest	11	41,6	15,2	25,2	79,2	38,0
Control	Posttest	11	51,1	19,3	21,3	91,9	43,0
Control	Ganancia	11	9,5				2,5

Fuente: elaboración propia.

Figura 1.

Trayectorias individuales y medias por grupo

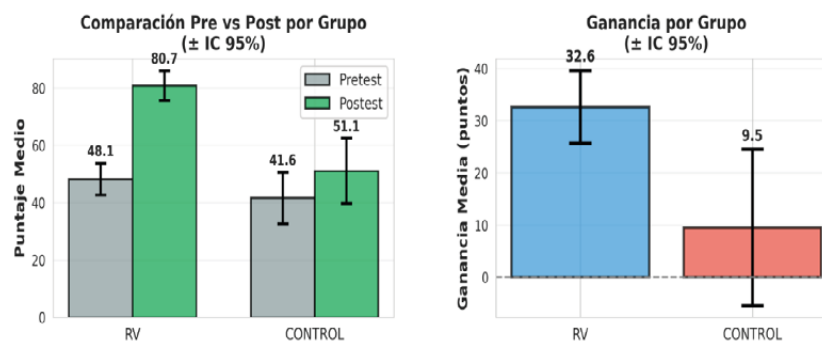


Fuente: elaboración propia a partir de los datos recopilados en el estudio.
Gráfico generado con Python (matplotlib/seaborn).

Luego de la intervención, el grupo que utilizó RV mostró resultados significativos en comparación con el grupo control. La ganancia media (postest menos pretest) fue de 32,6 puntos, con desviación estándar moderada (Tabla 2), para el grupo con interacción RV, y de 9,5 puntos, con desviación estándar mayor, para el grupo control, lo que refleja que algunos estudiantes incluso retrocedieron o mostraron cambios muy inconsistentes. Sin embargo, lo más importante es lo que ocurre en el centro de la distribución: la mediana de la ganancia es mayor en RV frente a la ganancia en el grupo control. Esto indica que, si se eliminan los casos extremos (mejores y peores resultados), aproximadamente la mitad de los estudiantes que interactuaron con RV presentó ganancias iguales o superiores a la mediana reportada. Por el contrario, la mitad del grupo control prácticamente no progresó.

Figura 2.

Comparación pretest-postest y ganancia media por grupo (RV vs. control), con intervalos de confianza del 95 %



Fuente: elaboración propia a partir de los datos recopilados en el estudio. Gráfico generado con Python (matplotlib/seaborn).

Efecto de la intervención: ANOVA de medidas repetidas

La Tabla 3 muestra los resultados de la prueba estadística ANOVA de medidas repetidas 2×2 , que analiza cómo varía el puntaje de competencias según dos factores: grupo (RV vs. control) y momento (pretest vs. postest).

Tabla 3.

ANOVA de medidas repetidas: análisis de la interacción Grupo $\times$ Momento en el rendimiento académico

Fuente de variación	Suma de cuadrados (sc)	Grados de libertad (gl)	Cuadrado medio (cm)	Estadístico (F)	p-valor	Significancia
Grupo (entre- sujetos)	5494,38	1	5494,38	20,47	<0,001	***
Momento (intra-sujetos)	16877,88	1	16877,88	62,87	<0,001	***
Grupo x momento	2236,36	1	2236,36	8,33	0,005	**
Residual	23625,63	88	268,47	-----	-----	-----

Nota: ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

Fuente: elaboración propia.

El análisis mostró un efecto principal significativo del momento ($F(1, 88) = 62,87$, $p < 0,001$), lo que indica una mejora global entre el pretest y el posttest. Asimismo, se observó un efecto principal significativo del grupo ($F(1, 88) = 20,47$, $p < 0,001$), lo que evidencia puntajes superiores en el grupo que utilizó realidad virtual. De manera central para los objetivos del estudio, la interacción Grupo $\times$ Momento fue estadísticamente significativa ($F(1, 88) = 8,33$, $p = 0,005$), lo que confirma que la magnitud del cambio a lo largo del tiempo difiere en función del tipo de intervención recibida.

Comparaciones post hoc y tamaños del efecto

Las comparaciones intragrupo (Tabla 4 y Figura 2) revelaron que el grupo con interacción RV experimentó una mejora significativa entre pretest y posttest, mientras que el grupo control no mostró un cambio significativo. Además, la comparación entre grupos en términos de ganancia reveló una diferencia media de 23,12 puntos a favor de RV, $t(44) = 3,01$, $p = 0,004$, $ic\ 95\ \% = [6,57, 39,66]$.

Tabla 4.

Resultados de las pruebas t pareadas: comparación pretest-posttest dentro de cada grupo

Grupo	test	Estadístico	p-valor	Conclusión
RV	t pareado	$t(34) = 9,11$	< 0,001	Mejora significativa
Control	t pareado	$t(10) = 1,24$	0,242 NS	Sin mejora significativa

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 5 muestra un impacto claramente diferenciado en los grupos. Para el grupo RV, el valor de d de Cohen fue grande, lo que evidencia una mejora significativa dentro del mismo grupo. En contraste, el grupo control presentó un valor de d de Cohen bajo, lo que reveló un efecto pequeño dentro del grupo y estadísticamente no significativo, y sugiere que sus cambios podrían explicarse por variabilidad natural más que por la intervención.

Al comparar las ganancias entre grupos, los resultados mostraron un impacto notable y respaldaron la intervención con RV. En general, estos resultados implican que un estudiante

promedio del grupo RV, después de utilizar las herramientas tecnológicas, supera aproximadamente el 94 % de su propio desempeño inicial y al 85 % del grupo control, lo que refleja un avance real y relevante desde una perspectiva educativa.

Tabla 5.

Tamaños del efecto (Cohen's d) en las comparaciones entre grupos y momentos de evaluación

Comparación	Cohen's d	ic 95 %	Magnitud	Interpretación
RV: pre-post	1,54	[1,05, 2,03]	Muy grande	Efecto muy fuerte
Control: pre-post	0,38	[-0,23, 0,99]	Pequeño	Efecto débil
Ganancia: RV vs. control	1,04	[0,34, 1,74]	Grande	Diferencia sustancial

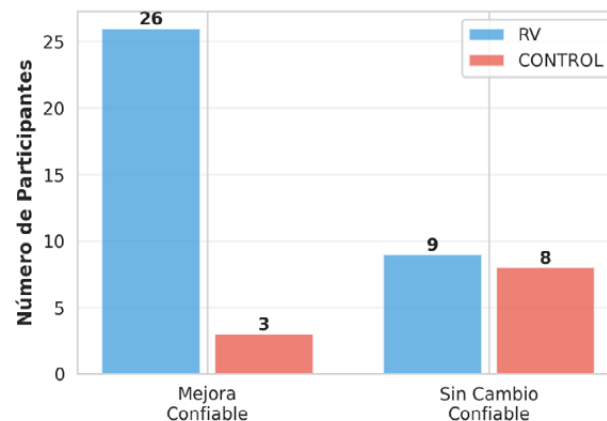
Fuente: elaboración propia

Cambio confiable y relevancia práctica

Mediante el índice de cambio confiable (RCI) (Figura 3), se determinó que el 74,3 % (26/35) de los estudiantes que interactuaron con RV experimentaron mejoras, frente a solo el 27,3 % (3/11) en el grupo control (Figura 4). La diferencia absoluta es de 47,0 puntos porcentuales, como se refleja en la Tabla 6. Además, el número necesario a tratar (NNT) se estimó en 2,1, valor que se redondeó a 3. Esto implica que, por cada tres estudiantes expuestos a la intervención con RV, uno adicional logrará una mejora significativa que no habría alcanzado sin el uso de la herramienta. Un $NNT < 5$ se considera indicativo de una intervención muy eficiente (Slavin y Smith, 2009).

Figura 3.

Distribución de participantes según cambio individual confiable (RCI, $\alpha = 0.05$) por grupo: RV vs. Control



Fuente: elaboración propia a partir de los datos recopilados en el estudio. Gráfico generado con Python (matplotlib/seaborn).

Tabla 6.

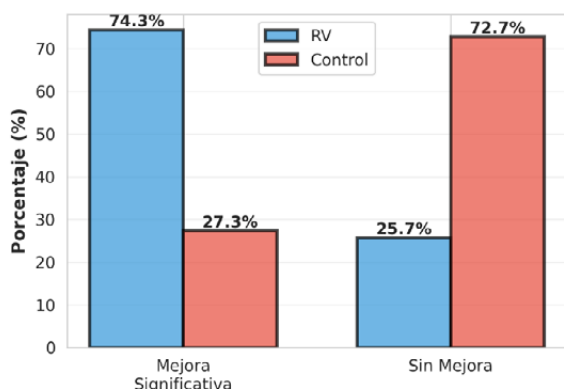
Análisis de cambio individual confiable (RCI) por grupo: número y porcentaje de participantes con mejoras significativa

Grupo	n	RCI crítico	Mejoras Confiables	%	Sin cambio
RV	35	$\pm 20,57$	26	74,3	9 (25,7 %)
Control	11	$\pm 18,81$	3	27,3	8 (72,7 %)

Fuente: elaboración propia

Figura 4.

Tasas de éxito por grupo: 74,3 % de mejora significativa en RV vs. 27,3 % en Control (NNT = 3)



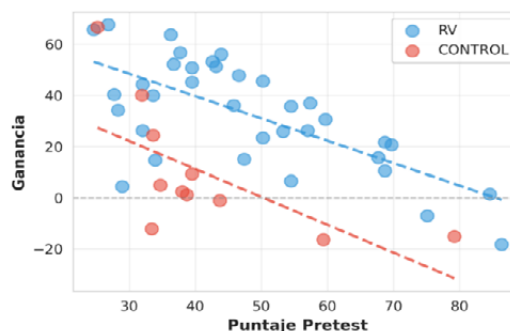
Fuente: elaboración propia a partir de los datos recopilados en el estudio. Gráfico generado con Python (matplotlib/seaborn).

Aunque el índice de cambio confiable (RCI) y el número necesario a tratar (NNT) provienen originalmente del ámbito clínico, su incorporación en este estudio se plantea como una aproximación exploratoria para estimar la relevancia práctica del impacto educativo. En este escenario, dichas métricas permiten complementar los tamaños del efecto tradicionales, pues ofrecen una interpretación centrada en el cambio individual y la eficiencia pedagógica de la intervención. No obstante, estos indicadores deben interpretarse con cautela y como un aporte metodológico inicial susceptible de validación futura en investigaciones educativas.

Efecto compensatorio y patrones diferenciales

Figura 5.

Correlación pretest vs. ganancia para grupos experimental y control.



Fuente: elaboración propia a partir de los datos recopilados en el estudio. Gráfico generado con Python (matplotlib/seaborn).

La Figura 5 muestra la relación entre el puntaje pretest (eje horizontal) y la ganancia (eje vertical) para los dos grupos de estudiantes (RV y control). Se observa una correlación negativa fuerte en ambos grupos. Esto significa que, cuanto menor fue el puntaje inicial, mayor fue la ganancia. Es decir, los estudiantes con peor desempeño inicial fueron los que más progresaron. La Tabla 7 muestra los resultados de las correlaciones estadísticas de Pearson (r) y Spearman (ρ). Para el grupo experimental, los resultados indican una correlación negativa fuerte y estadísticamente significativa. Por su parte, para el grupo control, la correlación también fue negativa y significativa, aunque ligeramente más débil.

Tabla 7.

Coefficientes de correlación entre puntaje inicial y ganancia de aprendizaje en los grupos RV y Control

Grupo	Pearson r	p-valor	Spearman ρ	p-valor
RV	-0,685	< 0,001	-0,599	0,0001
Control	-0,652	0,030	-0,745	0,009

Fuente: elaboración propia.

La pendiente más pronunciada en el grupo RV sugiere que la intervención tuvo un mayor impacto en los estudiantes con bajo rendimiento inicial. Este patrón refuerza la idea de un efecto compensatorio, lo que sugiere que la tecnología de realidad virtual no solo beneficia al conjunto de estudiantes, sino que ayuda a quienes más lo necesitan y reduce las brechas de aprendizaje en lugar de amplificarlas.

Adicionalmente, ambos grupos muestran la misma dirección de la relación (negativa). Sin embargo, la línea de tendencia del grupo RV está sistemáticamente más arriba en términos de ganancia, especialmente en el rango de puntajes iniciales bajos y medios. Esto indica que la RV potenció más la mejora de estudiantes con menor rendimiento inicial.

Robustez de los hallazgos

Todos los supuestos estadísticos fueron verificados a través de cinco pruebas independientes, con $p > 0,05$ en todos los casos, como se muestra en la Tabla 8. Este valor indica que no hay evidencia estadísticamente significativa de diferencias en las varianzas entre los grupos. Para el pretest, $F = 1,22$ y $p = 0,275$ cumplen el supuesto de homogeneidad de varianzas, lo que permitió utilizar con confianza pruebas paramétricas, como t de Student y ANOVA. En el posttest, $F = 0,18$ y $p = 0,677$ refuerzan que las varianzas entre grupos son equivalentes en el puntaje final. Esto sugiere que la RV no generó una dispersión diferente en los resultados finales respecto al grupo control, sin modificar de manera sustancial la variabilidad del rendimiento. Posteriormente, en las ganancias (diferencia posttest-pretest), $F = 0,00$ y $p = 0,998$ (un valor muy alto de p) indican que no existe diferencia en las varianzas de las ganancias entre los grupos. Esto es especialmente importante, ya que indica que la variabilidad en el progreso individual fue similar en ambos grupos.

Tabla 8.

Evaluación de la normalidad de los datos en los grupos de interacción (RV) y control mediante múltiples pruebas estadísticas

Prueba	Grupo RV	p-valor	Control	p-valor	Conclusión
Shapiro-Wilk	W=0,978	0,677	W=0,872	0,082	Normal
Lilliefors	D=0,083	0,790	D=0,230	0,104	Normal
Anderson-Darling	= 0,221	$p > 0,05$	= 0,576	$p > 0,05$	Normal
Jarque-Bera	JB=1,176	0,555	JB=2,379	0,305	Normal
D'Agostino-P	= 1,191	0,551	= 5,269	0,072	Normal

Fuente: elaboración propia.

Con el análisis *post hoc* se evidenció una sensibilidad estadística del 83,8 %, suficiente para detectar un efecto de magnitud $d = 1,04$, lo que indica que el estudio tuvo la precisión necesaria para identificar cambios reales entre los grupos. De manera complementaria, las pruebas no paramétricas respaldan los hallazgos centrales (Tabla 9). La prueba Mann-Whitney U evidenció diferencias significativas en las ganancias de los grupos, mientras que el

test de Wilcoxon confirmó una mejora sólida en el grupo RV y la ausencia de cambios en el grupo control. La coincidencia entre resultados paramétricos y no paramétricos refuerza la validez interna del análisis y aporta solidez a los resultados, pues muestra que los patrones observados no dependen del supuesto de normalidad y se mantienen invariantes bajo distintos enfoques estadísticos.

Tabla 9.

Comparación de resultados entre pruebas paramétricas y no paramétricas: consistencia en las conclusiones estadísticas

Comparación	Prueba paramétrica	p	Prueba no paramétrica	p	Acuerdo
Ganancias	t independiente	0,004	Mann-Whitney U	0,006	Si
			Kruskal-Wallis	0,006	Si
RV: pre vs. post	t pareado	<0,001	Wilcoxon Signed-Rank	<0,001	Si
Control: pre vs. post	t pareado	0,242	Wilcoxon Signed-Rank	0,365	Si

Fuente: elaboración propia.

Este conjunto de resultados proporciona evidencia sólida, multifacética y estadísticamente robusta de que la interacción con escenarios de realidad virtual orientados a física y matemática produce mejoras significativas en el desarrollo de competencias educativas.

Resultados cualitativos

Se aplicó una encuesta de satisfacción a 22/35 estudiantes que interactuaron con los dispositivos de realidad virtual. Tras su experiencia con la herramienta, los resultados revelaron una evaluación muy positiva en todas las dimensiones evaluadas: funcionamiento técnico, diseño, usabilidad, claridad de la información, entretenimiento y utilidad del tutorial. Los resultados mostraron:

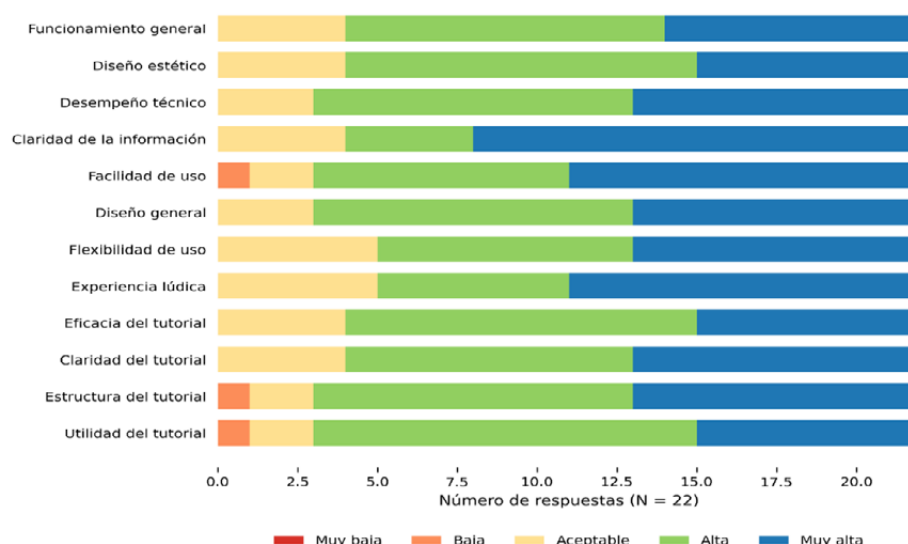
- Más del 80 % de los participantes calificó como “buena”, “excelente”, “muy atractiva”, “muy fácil” o “muy útil” los distintos aspectos de la herramienta.
- No se registraron respuestas negativas en ninguna categoría por parte de los encuestados (0 % en “muy deficiente”, “nada útil”, etc.).
- La mayoría de las respuestas se centró en los dos niveles superiores de las escalas Likert, lo que sugiere una experiencia de usuario altamente satisfactoria.
- Aspectos como el desempeño técnico (86 % en “bueno” o “excelente”), la claridad de la información (64 % en “muy clara y bien organizada”) y la utilidad del tutorial (86 % en “útil en la mayoría de los casos” o “muy útil”) fueron muy bien valorados.

Estos resultados respaldan la viabilidad del uso de escenarios de realidad virtual (RV) como herramienta tecnológica y pedagógica en contextos técnicos y científicos, especialmente en áreas con fuerte componente visual y espacial, como la ingeniería agronómica.

Este estudio mostró una mejora de 32,6 puntos, con un tamaño del efecto d de Cohen = 1,54, y una interacción Grupo $\times$ Momento significativa. Estas evidencias se alinean con la literatura reciente sobre el uso de la realidad virtual (RV) en contextos STEM (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas). Investigaciones en educación médica, ingeniería y ciencias naturales han documentado que el uso de herramientas inmersivas incide en mejoras en la comprensión conceptual, la retención de la información y la transferencia del conocimiento (García-Rivera y Céspedes-Guevara, 2025).

Figura 6.

Distribución de la satisfacción percibida en las dimensiones clave de la herramienta de realidad virtual ($n = 22$)



Fuente: elaboración propia a partir de los datos recopilados mediante encuesta de satisfacción aplicada a estudiantes. Gráfico generado con Python (matplotlib/seaborn).

Makransky y Lilleholt (2018) afirman que las variables emocionales y la percepción del aprendizaje están estrechamente relacionadas con la inmersión en RV. De igual manera, Çoban *et al.* (2022) reportaron efectos significativos en el aprendizaje ($g = 0,38$) y la autorregulación emocional. Desde esta perspectiva, el valor de d de Cohen en el posttest de este estudio supera ampliamente el valor reportado, lo que sugiere que la interacción de los estudiantes con la RV fue altamente efectiva en este contexto. Además, diferentes estudios demuestran que la RV no es una simple “herramienta visual”, sino un medio experiencial que mejora la comprensión y la visualización de procesos físicos, químicos y matemáticos

complejos, lo que facilita la construcción de modelos mentales (Grosser *et al.*, 2023). Esta capacidad se explica, en parte, porque los usuarios manipulan variables dentro de los escenarios, lo que promueve un aprendizaje basado en indagación, alineado con la teoría de la cognición situada (García-Herrera, 2018).

En consecuencia, la alta ganancia y el efecto compensatorio que se muestra en la Tabla 6 sugieren un impacto motivacional diferencial. Es decir, los estudiantes con bajo rendimiento inicial, que suelen desvincularse en clases tradicionales, encontraron en la RV una vía para reconectar con las asignaturas. Esto se alinea con diferentes reportes positivos sobre la utilización de la RV y sus consecuencias favorables en habilidades, autoeficacia, compromiso y disminución de la deserción en carreras STEM (Elme *et al.*, 2022).

Finalmente, la mejora no solo fue teórica. El puntaje posttest en RV (Figura 2) refleja una mejora en las habilidades y en la comprensión de situaciones reales en contextos simulados. Esto constituye una competencia que requiere mayor atención en la formación profesional moderna.

De otro lado, el mundo moderno exige ingenieros agrónomos altamente capacitados, con habilidades avanzadas y capaces de operar en entornos físico-digitales. De este modo, la RV no solo produce un resultado educativo, sino que constituye un medio indispensable para el aprendizaje profesional y la modernización. Como destacan Petropoulos *et al.* (2025), las competencias digitales en agronomía ya no son opcionales, sino esenciales para la sostenibilidad y la innovación en agricultura. Los resultados de NNT señalan que basta exponer a tres estudiantes a la interacción con RV para que uno logre un avance significativo. Este resultado acentúa la alta eficiencia de la RV como estrategia de formación en ciencias

básicas de futuros ingenieros agrónomos. Más aún, el efecto compensatorio indica que la RV puede ser una herramienta de equidad digital, ya que, en lugar de ampliar brechas entre estudiantes con o sin acceso a tecnologías, la RV en el aula nivela oportunidades, especialmente para quienes parten de un nivel más bajo.

A pesar de la robustez estadística, este estudio presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas. En primer lugar, el desbalance entre el grupo experimental y el grupo control, así como el tamaño muestral reducido, limitan los hallazgos. En segundo lugar, la ausencia de asignación aleatoria impide establecer relaciones causales. Adicionalmente, la duración limitada de la intervención no permite evaluar la retención del aprendizaje a largo plazo. Finalmente, no se analizaron variables como carga cognitiva, presencia o motivación intrínseca, que podrían explicar los mecanismos responsables del efecto observado. Estas limitaciones abren oportunidades para investigaciones futuras con diseños experimentales más controlados.

Conclusiones

Este estudio reveló que la realidad virtual no solo funciona en contextos educativos, sino que demuestra cómo, para quiénes y con qué magnitud lo hace. El uso de la herramienta de RV produjo una mejora promedio de 32,6 puntos en el grupo experimental, casi el doble del puntaje inicial, mientras que el grupo control apenas avanzó 9,5 puntos, sin alcanzar significancia estadística (comparaciones intragrupo, Tabla 4 y Figura 2). Esta diferencia no debe atribuirse al azar ni al efecto del tiempo por sí solo: la interacción Grupo $\times$ Momento es significativa, lo que constituye evidencia sólida de que la mejora se debe a la interacción con RV y no a factores externos.

Más allá de los promedios grupales, el análisis individual revela patrones igualmente relevantes. Aproximadamente tres de cada cuatro estudiantes en el grupo experimental RV (74,3 %) experimentaron mejoras. Es decir, cambios reales, confiables, no atribuibles a ruido estadístico, frente a apenas 3 de 11 estudiantes del grupo control (Figura 4). Este resultado trasciende la significancia estadística: evidencia una transformación concreta y medible en el dominio de competencias físico-matemáticas.

Además, la interacción con RV no solo beneficia a quienes manejan conceptos y herramientas de física y matemáticas, sino que también favorece a quienes parten de un nivel más bajo (Tabla 7). En un contexto educativo con múltiples desafíos, este resultado es particularmente valioso, puesto que la RV reduce desigualdades.

En términos de eficiencia práctica, el estudio reveló que, en promedio, es suficiente que tres estudiantes interactúen con la RV para que uno logre una mejora significativa. Además, vale destacar que los resultados se sostienen bajo varias pruebas paramétricas y no paramétricas que coinciden en sus conclusiones. Los supuestos de normalidad y homogeneidad se cumplen rigurosamente, y el poder estadístico (83,8 %) es suficiente para detectar el efecto observado. Esta robustez refuerza la confianza en las conclusiones.

No obstante, este estudio presenta limitaciones en el tamaño del grupo control, el seguimiento a largo plazo y la asignación aleatoria. Sin embargo, ninguna de estas limitaciones invalida el hallazgo central. Al contrario, plantean líneas de investigación futura de alto valor metodológico.

Finalmente, los resultados revelan que la herramienta de realidad virtual fue percibida como altamente funcional, atractiva, fácil de usar y pedagógicamente efectiva por los estudiantes de Ingeniería Agronómica (Figura 6). La ausencia de valoraciones negativas y la concentración en las categorías más favorables refuerzan la idea de que las tecnologías inmersivas pueden integrarse con éxito en la enseñanza de disciplinas como la física y la matemática aplicada en contextos agrícolas, siempre que se diseñen con claridad, facilidad de adaptación para cualquier usuario y entornos atractivos.

Si bien la intervención se centró en contenidos de física y matemáticas básicas, los resultados permiten vislumbrar el potencial de la realidad virtual como herramienta formativa alineada con las demandas de la Agricultura 4.0. No obstante, esta conexión debe entenderse como una proyección formativa y no como una medición directa de competencias profesionales agronómicas. Estudios futuros deberán incorporar escenarios virtuales específicos del dominio agrícola para evaluar de manera directa su impacto en competencias profesionales avanzadas.

Referencias

- Aguilar Acevedo, F., Flores Cruz, J. A., Hernández Aguilar, C. A. y Pacheco Bautista, D. (2022). Diseño e implementación de un simulador basado en realidad aumentada móvil para la enseñanza de la física en la educación superior. *EduTec, Revista Electrónica de Tecnología Educativa*, 80, 66-83. <https://doi.org/10.21556/edutec.2022.80.2509>
- Biasoni, E., Villalba, G., Cattaneo, C. y Larcher, L. (2012). La enseñanza de la física para formar competencias en Ingeniería Agronómica. En *IV Congreso Nacional y III Congreso Internacional de Enseñanza de las Ciencias Agropecuarias* (t. I, pp. 251-255). Universidad Nacional de La Plata. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/21565>
- Bulgakova, O., Zbaravska, L., Slobodian, S., Shynkaruk, N. y Dukulis, I. (2023). *Modernization of Content of Lecture Course in Physics to Train Future Agricultural Engineers. Engineering for Rural Development*, 22, 674-682. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF139>
- Cadena Cairasco, A. F., Pabón Santacruz, P. J., Jurado Eraso, M. A. y Arellano Arboleda, C. A. (2019). Realidad virtual en la enseñanza de las ciencias en Ingeniería Ambiental. *Boletín Informativo CEI*, 6(3), 108-112. <https://revistas.umariana.edu.co/index.php/BoletinInformativoCEI/article/view/2133>
- Mejía Carrillo, M. de J., Egas Villafuerte, V. P., Jimbo Román, F. M. y Saltos García, P. A. (2024). Análisis sobre el uso de la realidad virtual como herramienta para simular escenarios de liderazgo y trabajo en equipo en la educación superior. *Sapiens in Artificial Intelligence*, 1(1), 1-19. <https://doi.org/10.71068/ycrv5r21>
- Çoban, M., Bolat, Y. I. y Göksu, I. (2022). The Potential of Immersive Virtual Reality to Enhance Learning: A Meta-Analysis. *Educational Research Review*, 36, 100452. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2022.100452>
- Dayioğlu, M. A. y Turker, U. (2021). Digital Transformation for Sustainable Future—Agriculture 4.0: A Review. *Journal of Agricultural Sciences*, 27(4), 373-399. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.986431>
- Duarte-Gastélum, J. E. y Bustamante Ávila, R. (2023). *La revolución tecnológica en la educación* [Preprint]. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20354.29128>
- Elme, L., Jørgensen, M. L. M., Dandanell, G., Mottelson, A. y Makransky, G. (2022). Immersive Virtual Reality in STEM: Is IVR an Effective Learning Medium and Does Adding Self-Explanation After a Lesson Improve Learning Outcomes? *Educational Technology Research and Development*, 70(5), 1601-1626. <https://doi.org/10.1007/s11423-022-10139-3>
- Elizondo Treviño, M. D. S. (2013). Dificultades en el proceso enseñanza-aprendizaje de la física. *Presencia Universitaria*, 3(5), 70-77. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/3368>
- Gallego Delgado, R., Saura Parra, N. y Núñez Trujillo, P. M. (2013). AR-learning: Libro interactivo basado en realidad aumentada con aplicación a la enseñanza. *Tejuelo: Didáctica de la Lengua y la Literatura. Educación*, 8, 74-89. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5385923>
- Grosser, P. F., Xia, Z., Alt, J., Rüppel, U. y Schmalz, B. (2023). Virtual Field Trips in Hydrological Field Laboratories: The Potential of Virtual Reality for Conveying Hydrological Engineering Content. *Education and Information Technologies*, 28(6), 6977-7003. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11434-5>

- García Herrera, C. A. (2018). Cognición situada. *INSTA Magazine*, 1(1), 10-12. <https://doi.org/10.63074/26973308.v1i1.3>
- Instituto Colombiano para la Evaluación de la Educación. (2025). *Guía de orientación: Módulos genéricos Saber Pro 2025-1*. https://www.icfes.gov.co/wp-content/uploads/2025/02/02-Diciembre_Guía-de-Orientación-Módulos-Genéricos-Saber-Pro-2025-1.pdf
- Kumar, K. S., Selvan, T., Prabu, M. M., Kalaiyarasan, G., Ramnath, R. y Kumar, N. S. (2023). Examining the Role of Virtual Reality, Augmented Reality, and Artificial Intelligence in Adapting STEM Education for Next-Generation Inclusion. *International Journal of Emerging Knowledge Studies*, 2(12), 876-883. <https://doi.org/10.70333/ijeks-02-12-025>
- Makransky, G. y Lilleholt, L. (2018). A Structural Equation Modeling Investigation of the Emotional Value of Immersive Virtual Reality in Education. *Educational Technology Research and Development*, 66(5), 1141-1164. <https://doi.org/10.1007/s11423-018-9581-2>
- Mena, J. L. y Mena, J. A. (2011). Concepción didáctica para una enseñanza-aprendizaje de las ciencias básicas centrada en la integración de los contenidos en la carrera de Agronomía. *Pedagogía Universitaria*, 16(4), 53-81. <http://cvi.mes.edu.cu/peduniv/base-de-datos/2011-vol-xvi-no.-4>
- Moya-Carrera, Y. (2023). Uso de realidad virtual y aumentada para mejorar la comprensión de conceptos abstractos en matemáticas. *Revista Científica Kosmos*, 2(1), 26-38. <https://doi.org/10.62943/rck.v2n1.2023.42>
- Parroquín Amaya, P., Ramírez Sánchez, J., González Demoss, V. y Mendoza Carreón, A. (2016). Aplicación de realidad aumentada en la enseñanza de la física. *Cultura Científica y Tecnológica*, 51. <https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/953>
- Perdigones Borderías, A., Gallego Vázquez, E., García García, M. N., Fernández Álvarez, P., Pérez Martín, E. y Cerro Carrascosa, J. D. (2014). Physics and Mathematics in the Engineering Curriculum: Correlation with Applied Subjects. *International Journal of Engineering Education*, 30(6A), 1509–1521. <https://oa.upm.es/33336/>
- Petropoulos, D., Deirmentzoglou, G. A., Apostolopoulos, N., Paris, B., Michas, D., Balafoutis, A. T., Athanasopoulou, E., Nibbi, L., Li, H., Carvalho, L., Moreira da Silva, M. H. y Moreira da Silva, J. F. (2025). Digital and Entrepreneurial Competencies for the Bioeconomy: Perceptions and Training Needs of Agricultural Professionals in Greece, Italy, Portugal, and Sweden. *Agriculture*, 15(10), 1106. <https://doi.org/10.3390/agriculture15101106>
- Pogorelskaia, I. y Várallyai, L. (2020). Agriculture 4.0 and the Role of Education. *Journal of Agricultural Informatics*, 11(1), 45-51. <https://doi.org/10.17700/jai.2020.11.1.571>

- Rodríguez Peña, Y. (2014). Interdisciplinariedad en la carrera de Ingeniería Agrónoma: un enfoque desde la disciplina de física. *Latin-American Journal of Physics Education*, 8(1), 218-223. https://www.lajpe.org/march14/30_LAJPE_864_Yaima_Rodríguez.pdf
- García Rivera, V. H. y Céspedes Guevara, N. Y. (2025). Realidad virtual inmersiva para la educación. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(3), 5760-5784. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i3.18214
- Schaspchuck, P., Peralta, G., Mansilla, C. M. y Becchio, R. M. (2022). Realidad aumentada en la enseñanza de la física. *Revista de Enseñanza de la Física*, 34, 321-328. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/article/download/39793/39919/148468>
- Slavin, R. y Smith, D. (2009). The Relationship Between Sample Sizes and Effect Sizes in Systematic Reviews in Education. *Educational Evaluation and Policy Analysis*, 31(4), 500-506. <https://doi.org/10.3102/0162373709343004>
- Sultan, M. (2024). Emerging Agricultural Engineering Sciences, Technologies, and Applications. *AgriEngineering*, 6(3), 2057-2066. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030120>
- Tsichouridis, C., Batsila, M., Vavougios, D. y Ioannidis, G. (2020). Virtual and Augmented Reality in Science Teaching and Learning. En M. E. Auer y T. Tsiatsos (eds.), *The Impact of the 4th Industrial Revolution on Engineering Education* (pp. 193-205). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40274-7_20
- Valarezo-Guzmán, G. E., Sánchez-Castro, X. E., Bermúdez-Gallegos, C. y García-Alay, R. (2023). Simulación y realidad virtual aplicadas a la educación. *Recimundo*, 7(1), 432-444. <https://doi.org/10.26820/recimundo/7.1.enero.2023.432-444>
- Wen, T., Wen, Y., Chan, M. Y., Azam, A. B., Looi, C. K., Taib, S., Ooi, C. H., Huang, L. H., Xie, Y. y Cai, Y. (2024). Investigation of Virtual and Augmented Reality Classroom Learning Environments in University STEM Education. *Interactive Learning Environments*, 32(6), 2617-2632. <https://doi.org/10.1080/10494820.2022.2155838>
- Zhang, Y., Feijoo-García, M. A., Gu, Y., Popescu, V., Benes, B. y Magana, A. J. (2024). Virtual and Augmented Reality in Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) Education: An Umbrella Review. *Information*, 15(9), 515. <https://doi.org/10.3390/info15090515>